

Воронин Павел Александрович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: heyholyrampage@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79857048284; ассистент.

Белевцев Андрей Михайлович – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Садреев Фарид Гайнутдинович – e-mail: sadreevfg@yandex.ru; тел.: +79773635011; к.т.н.; доцент.

Voronin Pavel Aleksandrovich – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: heyholyrampage@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79857048284; assistant;

Belevtsev Andrey Michailovitch – e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Sadreev Farid Gainutdinovich – e-mail: sadreevfg@yandex.ru; phone: +79773635011; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.519.816

DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-15-29

Е.М. Герасименко, В.В. Курейчик, С.И. Родзин, А.П. Кухаренко

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОБ ЭВАКУАЦИИ ПРИ НАВОДНЕНИИ*

Речь идет о стихийных бедствиях, таких как наводнение, которые можно спрогнозировать за несколько часов до того, как они произойдут, чтобы можно было организовать эвакуацию населения. Эвакуация означает, что люди в районах бедствия должны покинуть эти районы и добраться до укрытий или убежищ. Представлен анализ процесса принятия решения об эвакуации, основные критерии, определяющие решение и основные этапы применения нечеткой логики для принятия решения об эвакуации на основе качественных и количественных значений критериев принятия решения. Эти этапы включают выбор критериев, определение качественных входных и выходных переменных, фаззификацию переменных, определение базы нечетких правил, построение нечеткого вывода, визуализацию результатов и анализ чувствительности. При моделировании учитывались следующие критерии: прогнозируемый уровень наводнения, уровень опасности, уязвимость района предполагаемого наводнения и возможность безопасной эвакуации. Прогнозируемый уровень наводнения основывался на параметрах максимального уровня и скорости подъема воды. Уровень опасности отражал физические характеристики наводнения и его потенциальное воздействие на безопасность людей в районе наводнения. Уязвимость района предполагаемого наводнения определялась как неспособность на местном уровне предотвратить непосредственный контакт людей с наводковыми водами во время события. Возможность безопасной эвакуации определялась как множество ограничений и потенциальных негативных аспектов, которые могут задержать или помешать успешному проведению эвакуации. Представлено описание качественных переменных критериев принятия решения о необходимости эвакуации, примеры определения базы нечетких правил. Нечеткая модель реализована с помощью Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Описана процедура нечеткого вывода и интерпретации решения и модель нескольких сценариев и ситуаций наводнения. Рассмотрен способ, с помощью которого нечеткая модель принятия решения об эвакуации может быть применена в сочетании с геоинформационной системой. Представлены действия, связанные с необходимостью эвакуации для различных сценариев и обстоятельств.

Принятие решений, эвакуация, чрезвычайная ситуация, факторы неопределенности, нечеткая логика, «мягкие» вычисления.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

E.M. Gerasimenko, V.V. Kureichik, S.I. Rodzin, A.P. Kukharengo

APPLICATION OF FUZZY LOGIC FOR MAKING DECISIONS ABOUT EVACUATION IN CASE OF FLOODING

We are talking about natural disasters, such as flooding, which can be predicted a few hours before they occur so that evacuation of the population can be organized. Evacuation means that people in disaster areas must leave these areas and reach shelters. The article presents an analysis of the decision-making process on evacuation, the main criteria determining the decision and the main stages of using fuzzy logic to make a decision on evacuation based on qualitative and quantitative values of the decision-making criteria. These stages include selection of criteria, determination of qualitative input and output variables, fuzzification of variables, definition of the base of fuzzy rules, construction of fuzzy inference, visualization of results and sensitivity analysis. When modeling, the following criteria were taken into account: the predicted flood level, the level of danger, the vulnerability of the area of the expected flood and the possibility of safe evacuation. The predicted flood level was based on the parameters of the maximum level and the rate of water rise. The hazard level reflected the physical characteristics of the flood and its potential impact on the safety of people in the flood area. The vulnerability of the area of the expected flood was defined as the inability at the local level to prevent people from direct contact with flood waters during the event. The possibility of safe evacuation was defined as a set of limitations and potential negative aspects that could delay or hinder the successful evacuation. The description of qualitative variable criteria for making a decision on the need for evacuation, examples of determining the base of fuzzy rules are presented. The fuzzy model is implemented using Matlab Fuzzy Logic Toolbox. The procedure of fuzzy inference and interpretation of the solution and a model of several scenarios and flood situations are described. The method by which a fuzzy model of decision-making on evacuation can be applied in combination with a geoinformation system is considered. The actions related to the need for evacuation for various scenarios and circumstances are presented.

Decision-making; evacuation; emergency; uncertainty factors; fuzzy logic; "soft" calculations.

Введение. Для эффективного управления чрезвычайной ситуацией при наводнении необходимо сочетание экспертных знаний и информации с местной ситуации [1]. Нечеткая логика позволяет интегрировать экспертные знания и информацию с мест бедствия [2].

Интерес представляет исследование многокритериальной методологии принятия решений с использованием нечеткой логики для оценки необходимости эвакуации путем объединения качественных и количественных значений критериев принятия решения [3]. Термин "необходимость эвакуации" (*Necessity to Evacuate, NTE*) получил международное признание и определяется как число в диапазоне от 0 до 1, которое указывает на уровень потенциальной потребности в эвакуации в районе стихийного бедствия или техногенной катастрофы. Чем выше значение *NTE*, например при наводнении, тем более необходимой является эвакуация с целью защиты местного населения. *NTE* представляет синтетическую информацию, основанную на прогнозе потенциальной опасности для людей, а также возможности безопасной эвакуации в случае чрезвычайной ситуации. С помощью геоинформационной системы (ГИС) *NTE* может быть отображен на картах, которые используются в качестве инструмента поддержки принятия решений для организации и управления эвакуацией.

В статье представлен анализ процесса принятия решения об эвакуации, основные критерии, определяющие решение и процедура применения нечеткой логики для принятия решения об эвакуации на основе *NTE*.

Проблемы принятия решения об эвакуации и нечеткая логика. Речь идет о стихийных бедствиях, которые можно спрогнозировать за несколько часов до того, как они произойдут в подверженных риску районах, чтобы можно было ор-

организовать превентивную эвакуацию населения. Эвакуация означает, что люди в районах бедствия должны покинуть эти районы и добраться до укрытий или убежищ. В некоторых случаях укрытия могут находиться внутри зоны риска (вертикальная эвакуация). Организация антикризисного управления не может быть импровизированной, особенно в случае массовой эвакуации, для которой должны быть заранее подготовлены конкретные планы задолго до кризиса. Эти планы могут использоваться в качестве поддержки принятия решений на начальном этапе, но их недостаточно для учета обновляемых данных в режиме реального времени.

Большинство существующих методов и инструментов для подготовки и управления эвакуацией были разработаны для речных наводнений и ураганов [4]. Если прогнозируется наводнение, то власти в режиме реального времени должны ответить на основные вопросы относительно решения об эвакуации:

- ◆ каков реальный уровень опасности для жизни людей в подверженных риску районах и требуется ли эвакуация из этих районов?
- ◆ насколько безопасно может быть проведена эвакуация?
- ◆ способны ли местные органы власти с точки зрения ресурсов и времени эвакуировать часть или все население, находящееся в зоне риска, за время до наступления события?

Необходимость принятия решения об эвакуации вызвана потенциально катастрофической угрозой в виде сильного наводнения. Гидрографическая информация об угрозе наводнения сравнивается с заранее определенными пороговыми значениями за определенный период наблюдений. В системах прогнозирования и предупреждения используются следующие уровни предупреждения: красный, оранжевый, желтый и т.д., которые указывают на прогнозируемый уровень риска (высокий, умеренный, незначительный).

Требуется анализ факторов риска наводнения и его потенциальных последствий для ответа на вопрос об уровне риска, при котором эвакуация является оправданной с точки зрения безопасности. Эвакуация уменьшает риски угрозы жизни и движимому имуществу. Поэтому понимание риска наводнения и опасности для жизни является основным вопросом при принятии решения об эвакуации. Угроза жизни людей вызвана сочетанием уязвимости места нахождения людей (внутри/снаружи здания, характер жилья), характеристик наводнения (уровень подъема воды, его скорость) и характеристик населения (возраст, состояние здоровья).

Ответ на вопрос о безопасности эвакуации в основном связан с погодными условиями, временным фактором и безопасностью инфраструктуры. Погодные условия (дождь, туман, снег, ветер) влияют на безопасность дорожного движения. Время, как и состояние дорожной сети, возможности местных органов власти, также являются важными факторами при эвакуации.

Принятие решения об эвакуации зависит от множества определенных и неопределенных факторов:

- ◆ прогнозные и имитационные модели, основанные на местных уровнях воды и картировании рисков;
- ◆ фактическая доступность эвакуационных ресурсов;
- ◆ вероятность отказа сетей, аварий, нехватки топлива.

Для работы с множеством факторов принятия решений об эвакуации в сочетании экспертными знаниями целесообразно использовать нечеткую логику, позволяющую моделировать процесс принятия решения об эвакуации с учетом неопределенности.

Необходимо различать стохастическую неопределенность и субъективную неопределенность. Стохастическая неопределенность связана с тем, что информация по отдельным аспектам решаемой задачи и используемому инструментарию

носит вероятностный характер. Субъективная неопределенность означает нечеткость (размытость) некоторых представлений о проблеме и способах ее решения. Этот тип неопределенности возникает из-за лингвистической неточности, когда люди используют неточные понятия или выражения для описания свойств концепта. Разница в том, что субъективная неопределенность связана с человеческими определениями, а не с объективным фактом природы. Однако утверждения, использующие субъективные категории, играют важную роль в процессах принятия решений человеком [5].

Нечеткая логика дает соответствующие описания субъективной неопределенности с помощью нечетких множеств. Под нечётким множеством A понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X, \mu_A(x) \in [0,1],$$

Функция принадлежности $\mu_A(x)$ – это непрерывная кривая, которая определяет степень принадлежности любой числовой переменной к лингвистической переменной. Предложено множество различных типов функций принадлежности (*MFS*) для нечеткой логики: z -, λ -, π - и s -типа [6]. Для практических реализаций чаще всего используются функции принадлежности с линейной или сплайновой формами, как более простые и достаточно точные функции для моделирования большинства переменных в системах поддержки принятия решений. Согласно психолингвистическим исследованиям человеческой классификации качественных переменных, базовые функции принадлежности сплайнов неплохо моделируют лингвистические отношения для сложных приложений анализа данных и поддержки принятия решений [7].

В области планирования и моделирования эвакуации принадлежность к λ -типу и π -типу (треугольные и трапециевидные) функции используются для проектирования систем нечеткой логики. Например, в [8] использовалась функция π -типа для разработки системы нечеткой логики, которая моделировала поведение человека во время эвакуации во время урагана.

Предметом нечёткой логики является исследование рассуждений в условиях нечёткости, размытости. В некоторых обстоятельствах нечеткое высказывание, например “осторожно”, является более четким и эффективным, нежели попытки количественного описания ситуаций для принятия решения человеком, находящимся в опасности. Принципы нечеткой логики основаны на известных навыках человеческого мышления путем синтеза и упрощения сложных задач принятия решений в условиях неопределенности [8].

В контексте многокритериального анализа для принятия решения об эвакуации необходимо определить, как различные нечеткие переменные будут “объединены”, чтобы сделать выводы или предложить решения, в зависимости от типа проблемы. Подход нечеткой логики предлагает определить эвристические или экспертные продукционные правила типа “ЕСЛИ-ТО” для выражения взаимосвязей между комбинациями нечетких входных переменных и выводами, которые следуют из их комбинаций. Основная проблема при использовании нечетких продукционных правил заключается в том, чтобы на основе некоторых нечетких высказываний с известной степенью истинности, которые являются условиями нечетких правил, оценить степень истинности других нечетких высказываний, являющимися выводами нечетких правил. Чтобы иметь возможность решить эту проблему, необходимо ответить на более частный вопрос: чему должна быть равна степень истинности вывода нечеткого правила, если известна степень истинности условия этого правила? Таким образом, в системах нечетких продукций центральное место занимает метод определения истинности заключений [9].

Взаимосвязь между условием и заключением в нечетком правиле в общем случае представляет собой бинарное нечеткое отношение на декартовом произведении универсумов соответствующих нечетких высказываний. Этот подход используется для определения различных методов нечеткого вывода в продукционных нечетких системах.

Перед созданием базы правил нечеткой модели необходимо определить нечеткие множества и функции принадлежности, чтобы согласовать значение нечетких переменных, исходя из экспертных знаний и опыта. Нечеткая логика содержит широкий спектр нечетких операций, которые могут быть выполнены с нечеткими отношениями и нечеткими множествами:

- ◆ $\mu(x) = \max(\mu_i)$ – нечеткое ИЛИ определяется как максимальное из значений *MFS*;
- ◆ $\mu(x) = \min(\mu_i)$ – нечеткое И определяется как минимальное из значений *MFS*;
- ◆ $\mu(x) = 1 - (\mu_i)$ – нечеткое НЕ определяется как аддитивное дополнение значений *MFS*;
- ◆ $\mu(x) = \text{product}(\mu_i)$ – нечеткое произведение определяется как алгебраическое произведение значений *MFS*;
- ◆ $\mu(x) = \sum \mu_i - \text{product}(\mu_i)$ – нечеткая сумма определяется как разность между алгебраической суммой *MFS* и алгебраическим произведением.

Нечеткие операции должны применяться к правилам вывода. Необходимо оперировать нечеткими входными данными и нечеткими отношениями для получения выходных данных, которые также представляют решение нечетким образом. Эта операция нечеткой импликации или нечеткого вывода ($A \rightarrow B$). Она не так проста и интуитивно понятна, как в классической логике. Ниже приведены некоторые наиболее часто используемые операторы нечеткой импликации:

- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max(\min(\mu_A(x), \mu_B(x)), 1 - \mu_A(x))$ – импликация по Заде;
- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ – импликация по Мамдани;
- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(1, 1 - \mu_A(x), \mu_B(x))$ – импликация по Лукасевичу;
- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\mu_A(x) \leq \mu_B(y)) \\ \mu_B(y) & \text{else} \end{cases}$ – импликация по Геделю;
- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max(1 - \mu_A(x), \mu_B(x))$ – импликация по Дайнесу-Решеру;
- ◆ $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$ – импликация по формуле произведения.

Основанные на правилах нечеткой импликации системы могут быть использованы для прогнозирования наводнений, управление рисками наводнений, моделирование поведения людей при эвакуации.

Нечеткая система, основанная на экспертных знаниях, включает в себя базу нечетких правил и механизм вывода. База нечетких правил "ЕСЛИ-ТО" – это знания и ноу-хау экспертов о конкретной проблеме, например, об эвакуации районов, подверженных риску, в случае сильного наводнения [10]. Механизм вывода интерпретирует базу правил с помощью *MFS* входных и выходных нечетких переменных, операторов импликации и методов дефаззификации. Система вывода на основе правил реализует отображение входных нечетких множеств в выходные нечеткие множества. Процесс фаззификации и дефаззификации используется для того, чтобы обеспечить возможность управления системой с нечеткими входами и нечеткими выходами.

Фаззификация преобразует входные параметры системы в «нечёткую» область, описываемую лингвистическими переменными в базе знаний с использованием *MFS*. Фаззификация не является строгой процедурой и выполняется экспертами на основе опыта и знаний.

Дефаззификация – это преобразование нечеткого множества в четкое число. Перед дефаззификацией выходных данных все нечеткие выходные данные системы объединяются с помощью оператора нечеткого максимума. Существуют различные методы дефаззификации: центр области под кривой *MFS* нечеткого выходного множества, биссектриса площади под кривой *MFS*, среднее значение нечеткого выходного множества среди максимальных значений *MFS*, наибольшее значение нечеткого выходного множества среди максимальных значений *MFS*, минимальное значение нечеткого выходного множества среди максимальных значений *MFS*. Выбор метода дефаззификации зависит от контекста проблемы принятия решения.

Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении. Окончательное решение о массовой эвакуации при наводнении сталкивается с двумя трудностями: (1) необходимо учитывать многочисленные и разнородные критерии при неточной и неполной информации; (2) большинство значений этих критериев имеют неопределенную границу принятия решения.

Примером трудности (1) может быть выбор маршрута эвакуации с учетом заторов, условий дорожного движения (“легкие”, “тяжелые”, “бампер к бамперу”). Качественная информация, которая представляет собой субъективное знание, использующее лингвистические описания, должна обрабатываться при принятии решений. Однако такую информацию трудно обработать с помощью классической математической логики. Между тем, качественная информация не должна игнорироваться при принятии решений. Очевидно, что качественная информация о наводнении от незначительного до крупного, поскольку она была определена на основе существующих и подтвержденных пороговых значений, имеет больше смысла для ЛПР. Такую неопределенность в человеческом восприятии можно легко смоделировать с помощью нечеткой логики.

Для трудности (2) значения критериев могут включать некоторую неопределенность границ критериев, что может повлиять на принятие решения. Например, прогнозируемый уровень воды (например, от 4,85 до 5,05 м), варианты решения об эвакуации для конкретного района (“без эвакуации”, “бдительность”, “рекомендация”, “мягкий приказ”, “экстренная эвакуация”) с помощью нечеткой логики могут быть представлены через *MFS*.

Рассмотрим, как применяется нечеткая логика путем объединения качественной и количественной информации для оценки и принятия решения о необходимости эвакуации (*NTE*) в случае чрезвычайной ситуации из-за наводнения.

В нечеткой системе для принятия решения об эвакуации при наводнении критерии принятия решения выбираются в качестве входных данных, а *NTE* определяется как единственная выходная переменная, которая колеблется в интервале [0, 1].

Основными этапами проектирования нечеткой системы являются (1) выбор критериев; (2) определение качественных переменных критериев и *NTE*; (3) построение *MFS*; (4) определение нечетких правил; (5) определение нечеткого вывода; (6) визуализация и анализ чувствительности.

Вначале путем консультаций с экспертами, заинтересованными сторонами, анализом плана эвакуации определяются исходные данные (критериев принятия решения) с учетом прогноза наводнения, опасности для населения, расчетного времени эвакуации и т.д.

Затем необходимо уточнить количественные и качественные переменные для каждого критерия и *NTE*. Все диапазоны значений количественных переменных затем классифицируются для определения качественных переменных и множества их возможных значений. Эти переменные определяются с использованием экспертных знаний, статистических данных, исторических данных о наводнениях в данной местности и имеющихся планов эвакуации.

Далее, строятся *MFS* каждого критерия и *NTE*. Определяется экспертная база правил, описывающая нечеткие отношения между критериями принятия решений и *NTE*, которая интерпретируется с использованием процедуры нечеткого вывода для установления количественных отношений между критериями принятия решения и *NTE*. Чтобы облегчить анализ чувствительности *NTE* относительно входных данных рекомендуется визуализировать 3D-поверхности относительное влияние двух входных данных на *NTE*, чтобы принять окончательное решение об эвакуации.

Пространственное распределение конечного значения *NTE* может быть визуализировано на картах для получения более детальных решений, таких как определение приоритетов районов эвакуации. Проиллюстрируем подробнее каждый из этапов нечеткой системы принятия решения об эвакуации при наводнении.

Этапы принятия решения об эвакуации при наводнении

Этап 1: выбор критериев.

Принятие решения об эвакуации из-за наводнения зависит от результатов оценки риска наводнения, а также возможностей безопасной эвакуации. Риск наводнения отражает потенциальную угрозу населению, в то время как возможность безопасной эвакуации отражает потенциальные аспекты, которые могут помешать успешной эвакуации. Таким образом критерии принятия решения должны включать потенциальную опасность наводнения, угрозу для жизни населения, а также пропускную способность эвакуационного транспорта, время для эвакуации.

В данном исследовании с целью иллюстрации применения нечеткой логики при принятии решений об эвакуации при наводнении выбрано конкретное критериев: (1) прогнозируемый уровень наводнения, (2) уровень опасности, (3) уязвимость района предполагаемого наводнения и (4) возможность безопасной эвакуации.

Этап 1.1. Прогнозируемый уровень наводнения основывается на нескольких параметрах, из которых наиболее важной является информация о максимальном уровне и скорости подъема воды.

Этап 1.2. Уровень опасности. Прогнозируемый уровень наводнения дает представление о наводнении в целом, но его недостаточно для оценки опасности для населения в каждом районе, подверженном наводнению. Уровень опасности отражает физические характеристики наводнения и его потенциальное воздействие на безопасность людей в каждом районе, на каждой улице. Это детальное знание определяет решение об эвакуации отдельных районов в приоритетном порядке. Будем рассматривать уровень подъема воды на локальных участках в качестве количественной переменной уровня опасности.

Этап 1.3. Уязвимость района предполагаемого наводнения определяется как неспособность предотвратить непосредственный контакт людей с паводковыми водами во время события. Поэтому возможности защиты данного района от наводнения необходимо учитывать до принятия решения об эвакуации. Переменные уязвимости района от наводнения включают характер проживания, высоту зданий и т.п.

Этап 1.4. Возможность безопасной эвакуации может быть определена как набор ограничений (например, пропускная способность дорог) и потенциальных негативных аспектов (плохие погодные условия, аварии, пробки на дорогах), которые могут задержать или помешать успешному проведению эвакуации. Этот критерий включает множество переменных, таких как количество людей, подлежащих эвакуации, доступное время для эвакуации, доступный транспорт, пропускная способность дорог, точки выхода из районов, подверженных наводнениям.

Время является наиболее важной переменной во время эвакуации. В последние десятилетия были разработаны модели эвакуации, включая моделирование дорожного движения, чтобы помочь оценить время эвакуации, загруженность перекрестков маршрутов, расстояния эвакуации, уровни заторов [11].

Различные параметры, отражающие способность и безопасность эвакуации, должны быть объединены в единый показатель, представляющий расчетное соотношение эвакуируемых. Расчетное соотношение эвакуированных определяется как процент людей, успевших эвакуироваться до наступления наводнения.

Этап 2: определение качественных переменных критериев принятия решений и NTE.

Первоначально различные критерии принятия решения об эвакуации имеют либо количественные, либо качественные значения. Перед построением нечеткой системы для принятия решения об эвакуации необходимо связать каждый критерий с качественными переменными в соответствии со значениями его количественной переменной. Качественные переменные представляют некоторый диапазон количественных значений, определяемых обычно экспертами.

Этап 2.1. Качественную переменную для прогнозируемого уровня наводнения и связанного с этим уровня риска определим через цветовую кодировку; “красный” (крупное наводнение, создающее прямую угрозу безопасности людей и имущества), “оранжевый” (риск возникновения значительного уровня затопления, которое может оказать значительное влияние на безопасность имущества и людей), “желтый” (риск наводнения, которое не влечет за собой значительного ущерба, но требует бдительности) и “зеленый” (нет риска наводнения). Пороговые значения уровня воды, которые вызывают соответствующее оповещение, зависят от конкретного водного бассейна. Например, для прогнозируемого уровня наводнения примем следующие пороговые значения уровня воды (м), которые вызывают соответствующее оповещение: зеленый (менее 6,5), желтый ([6,5; 6,7]), оранжевый ([6,7; 7,0]), красный (более 7,0).

Этап 2.2. Качественная переменная уровня опасности. На практике во многих исследованиях учитывается только высота подъема воды. Соответственно области наводнения в зависимости от высоты подъема воды (h) принято делить на зоны. Например, зона (a) определяется произведением h на скорость потока воды (v) и составляет более $7 \text{ м}^2/\text{с}$ (прорыв дамбы), зона (b) с максимальной высотой подъема воды 1 м, зона (c) с максимальной высотой подъема воды $0,5 \text{ м} < h < 1 \text{ м}$, зона (d) с максимальной высотой подъема воды $0,25 \text{ м} < h < 0,5 \text{ м}$, зона (e) с максимальной высотой подъема воды $h < 0,5 \text{ м}$. Иными словами, термины зон (a), (b), (c), (d), (e) представляют значения качественной переменной уровня опасности, связанного с уровнем затопления.

Этап 2.3. Качественная переменная уязвимости района предполагаемого наводнения, например, может характеризоваться следующими уровнями: высокий, средний и низкий, в основном в зависимости от возможности укрытия на месте. Высокий уровень уязвимости означает небольшое количество убежищ, находящихся в районе с паводковыми водами, средний уровень уязвимости – имеются убежища и высокие дома, низкий уровень уязвимости – большое число укрытий, однако при сильном наводнении целостность этих укрытий может быть нарушена. Количественных оценок этих уровней нет, однако, чтобы построить непрерывную функцию принадлежности можно назначить низкому, среднему и высокому уровням номер, например 1, 2 или 3, соответственно.

Этап 2.4. Качественная переменная, отражающая возможность безопасной эвакуации. Будем характеризовать эту переменную пятью качественными значениями: очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая, в зависимости от значений процента людей, решивших эвакуироваться. Например, очень низкая – [0; 27,5], низкая – [27,5; 37,5], средняя – [37,5; 67,5], высокая – [67,5; 80], очень высокая – более 80.

Этап 2.5. Определение качественной переменной *NTE*. В некоторых из существующих подходов предлагается принятие решения об эвакуации с учетом затрат [12]. Однако если главной целью является спасение жизни людей, то для оценки необходимости эвакуации целесообразно использовать несколько иной подход. Переменная *NTE* определяется как уровень потенциальной потребности эвакуации относительно приоритетной цели обеспечения безопасности людей. *NTE* варьируется от 0 до 100% и является синтетическим показателем для ЛПП при нечетком многокритериальном анализе, основанном на входных критериях: прогнозируемый уровень наводнения, уровень опасности, уязвимость района предполагаемого наводнения и возможность безопасной эвакуации в случае чрезвычайной ситуации с наводнением [13]. Пусть *NTE* определяется пятью качественными значениями со следующими пороговыми значениями: “очень низкий” – [0; 27,5], “низкий” – [27,5; 37,5], “средний” – [37,5; 67,5], “высокий” – [67,5; 80], “очень высокий” более 80.

Этап 3: фаззификация входных и выходных данных.

После того, как все качественные и количественные переменные критериев принятия решения и *NTE* определены, входные и выходные данные нечеткой системы для принятия решения об эвакуации “размываются” путем проектирования *MFS*. В качестве примера будем использовать треугольные и трапециевидные формы *MFS*, потому что их легко интерпретировать (линейная экстраполяция) и достаточно для проектирования системы нечеткой логики.

Этап 4: определение базы нечетких правил.

Нечеткие правила в базе правил ЕСЛИ-ТО указывают на логические связи между качественными переменными и отражают различные виды ситуаций и экспертные выводы, которые могут быть сделаны в соответствии с имеющимися знаниями и опытом [14]. Например, *IF* (прогнозируемый уровень наводнения – красный *AND* уровень опасности – зона (а) *AND* уязвимость района предполагаемого наводнения – высокая *AND* возможность безопасной эвакуации – очень высокая) *THEN* (необходимость эвакуации – очень высокая).

Доступные знания на самом деле ограничены, особенно при анализе новых катастроф. Поэтому только часть всех потенциальных правил может быть определена в нечеткой системе. Однако база правил может дополняться новыми правилами с добавлением новой информации и опыта, что повышает точность нечеткой модели в долгосрочной перспективе. Теоретически, общее число возможных правил, которые могут быть определены в нечеткой системе, равно числу всех комбинаций качественных значений входных данных [15, 16]. Например, в представленной выше нечеткой системе общее количество правил равно $4 \times 5 \times 3 \times 5 = 300$. Чтобы упростить обработку правил или ограничить количество входных данных в нечеткой системе, можно формировать синтетические показатели в качестве входных данных нечеткой системы. Другое решение заключается в разработке многослойной нечеткой системы.

Этап 5: процедура нечеткого вывода и интерпретации решения.

Этап 5.1: применение функций принадлежности для получения нечетких входных данных из реальных значений входных переменных;

Этап 5.2: применение нечетких операторов для получения одного нечеткого ввода;

Этап 5.3: применение операторов импликации для получения нечетких выходных данных;

Этап 5.4: применение нечетких операторов для агрегирования нечеткого выходного сигнала;

Этап 5.5: применение методов дефаззификации для получения четкого значения выходной переменной.

Проиллюстрируем процедуру нечеткого вывода в нечеткой системе на примере двух правил:

Правило 1. *IF* (прогнозируемый уровень наводнения – оранжевый *AND* уровень опасности – зона (b) *AND* уязвимость района предполагаемого наводнения – высокая *AND* возможность безопасной эвакуации – высокая) *THEN* (*NTE* – высокая);

Правило 2. *IF* (прогнозируемый уровень наводнения – красный *AND* уровень опасности – зона (a) *AND* уязвимость района предполагаемого наводнения – высокая *AND* возможность безопасной эвакуации – очень высокая) *THEN* (*NTE* – очень высокая).

Пусть реальные количественные значения четырех входных переменных следующие: прогнозируемый уровень наводнения – 7,12 м; уровень опасности – 2,13 м; уязвимость района – 3; возможность безопасной эвакуации – 75 %.

Применим треугольные и трапециевидных *MFS* для получения нечетких значений из реальных значений входных переменных. Например, для размытия реального значения 7,12 м прогнозируемого уровня, связанного с нечеткой переменной “красный” в Правиле 1, получим степень принадлежности 0,8.

В примере четыре входных переменных и два правила, поэтому результатом фаззификации будут четыре нечетких входных переменных для каждого правила.

Объединяем все нечетких входных данных каждого правила для получения единого нечеткого входного условия с использованием нечетких операторов, соответствующих логическим операторам *AND* в условной части правил. К логическому отношению *AND* можно применить два стандартных нечетких оператора: нечеткое *AND* и нечеткое произведение: *Fuzzy AND*: $\mu(x) = \min(\mu_i)$; *Fuzzy product*: $\mu(x) = \text{product}(\mu_i)$.

Выберем нечеткий оператор *AND*. Операция минимизации четырех нечетких входных данных в *IF*-части Правил 1 (степени принадлежности: 0,2; 0,4; 1,0; 0,75) дает одну нечеткую входную переменную со степенью принадлежности, равной 0,2. Операция минимизации четырех нечетких входных данных в *IF*-части Правил 2 (максимальные степени принадлежности: 0,8; 0,6; 1,0; 0,25) дает один нечеткий вход со степенью принадлежности равной 0,25.

Применим оператор импликации по Мамдани для получения нечеткого вывода для каждого правила: $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$

Для Правил 1 применение оператора импликации Мамдани ($\min(0,2; 1)$) устанавливает значение *NTE* “высокий” на уровне 0,2. Аналогично, MF “очень высокий” *NTE* в Правиле 2 определяется на уровне 0,25.

Объединяем все нечеткие выходные переменные в базе правил. Для агрегирования можно использовать два стандартных нечетких оператора (нечеткий ИЛИ, нечеткая сумма): $\mu(x) = \max(\mu_i)$; $\mu(x) = \sum \mu_i - \text{product}(\mu_i)$,

Выберем нечеткий оператор ИЛИ. В правиле 1 максимальная степень принадлежности составляет 0,2, в то время как в Правиле 2 максимальная степень принадлежности составляет 0,25. Оператор нечеткого ИЛИ дает максимальную степень принадлежности конечного нечеткого вывода, равную 0,25.

В качестве метода дефаззификации для получения конечного значения *NTE*, например, выберем метод центра площади. Тогда значение *NTE*, основанное на двух правилах, составляет 79,7 %.

Нечеткая система для принятия решения об эвакуации при наводнении была реализована с помощью *Matlab Fuzzy Logic Toolbox*. Этот инструмент также позволяет визуализировать 3D нечеткие поверхности, которые представляют отношения между двумя входными переменными (остальные фиксированы) и одним выходом. Такого рода представление помогает понять, как система будет вести себя для всего диапазона значений во входном пространстве. Кроме того, его можно использовать для проверки и калибровки правил и *MFS*, а также для определения необходимости внесения изменений в базу правил для нечетких множеств.

Был проведен анализ чувствительности предлагаемого метода путем моделирования нескольких сценариев и ситуаций наводнения.

В частности, первый сценарий предполагал, что если уязвимость района наводнения фиксируется на низком уровне (значение 1), а возможность безопасной эвакуации – на очень высоком уровне (значение 95%), то 3D-поверхность позволяет понять, как ведет себя выходная переменная *NTE* при изменении прогнозируемого уровня наводнения и уровня опасности, обнаружить пороговые эффекты комбинации входных данных. Например, *NTE* становится чувствительным, когда прогнозируемый уровень приближается к 7 м, а уровень опасности одновременно приближается к 2 м. *NTE* значительно увеличивается более чем на 50% при уровне опасности выше 1,25 м.

Второй сценарий представлял ситуацию, когда прогнозируемый уровень наводнения достигает 6,9 м (оранжевый уровень), а уязвимость района низкая (значение 1). В этом сценарии *NTE*, в основном, зависит от местного уровня опасности. Однако, когда расчетное соотношение эвакуированных падает ниже 40%, то независимо от повышения местного уровня опасности, *NTE* составляет не более 50%. Это обстоятельство указывает на существование минимальных пороговых значений доступных ресурсов для начала эвакуации. Эту информацию некоторые ЛПР могут забыть в критической ситуации.

Третий пример сценария представляет ситуацию, когда уровень опасности зафиксирован как очень опасно (2 м), а уязвимость района низкая (значение 1). Когда предполагаемое количество эвакуированных составляет менее 40%, то независимо от увеличения прогнозируемого уровня *NTE* составляет не более 50%, как в предыдущем сценарии. Низкое расчетное соотношение эвакуируемых ограничивает *NTE*, поскольку эффективность эвакуации ограничена.

Четвертый сценарий представляет ситуацию, когда местный уровень опасности зафиксирован на уровне 2 м (очень опасно), а возможности эвакуации и безопасность очень высоки (значение 80%). В этом случае *NTE* существенно не меняется в зависимости от уязвимости области, поскольку возможности района по предотвращению наводнений очень ограничены, особенно в случае катастрофического события.

В целом, анализ чувствительности помогает откалибровать нечеткую нелинейную модель, а также изучить и сравнить различные сценарии и стратегии эвакуации. С этой точки зрения нечеткая модель принятия решений также может быть использована в качестве инструмента для подготовки плана эвакуации.

Применение нечеткой системы в сочетании с геоинформационной системой. Геоинформационные системы (ГИС), являясь универсальным программным средством, предлагают набор сервисов для пространственного анализа и поддержки принятия решений: графическую визуализацию географических объектов района в виде карты, пространственную базу данных с географической привязкой, статистику и анализ данных [17]. При интеграции в ГИС карты, база данных и статистика становятся очень мощными инструментами, особенно для управления чрезвычайными ситуациями. Например, рассмотрим способ, с помощью которого нечеткая логическая модель принятия решения об эвакуации может быть применена в сочетании с ГИС.

Пусть пространственные данные обрабатываются с помощью ГИС. Вначале необходимо подготовить данные о количественных значениях входных переменных в данной местности (местные уровни воды, уязвимость района и т.п.) перед обработкой в нечеткой системе [18]. Далее, необходимо импортировать пространственные данные из ГИС в *Matlab*. Перед выполнением импорта в *Matlab* таблица атрибутов должна быть преобразована в формат файла *Excel*. Затем нечеткий алгоритм, реализованный с помощью *Matlab*, может быть применен к каждой строке файла, соответствующей геометрическому объекту.

Наоборот, полученные с помощью *Matlab* выходные данные *NTE* могут быть импортированы в ГИС для создания карты пространственного распределения *NTE*. Рис. 1 иллюстрирует процесс применения модели нечеткой логики в сочетании с ГИС.

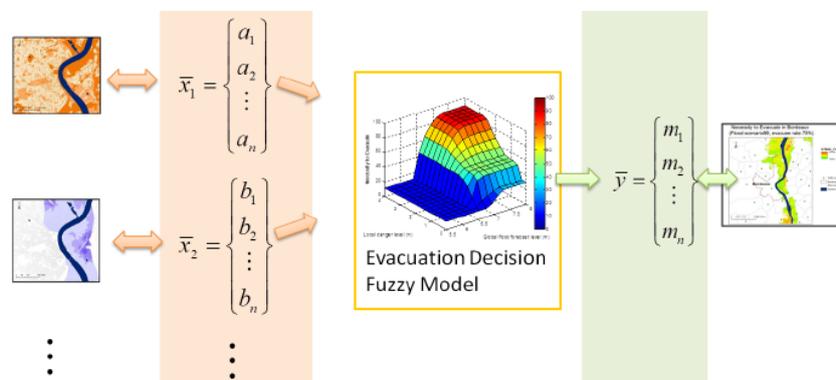


Рис. 1. Применение модели нечеткой логики в сочетании с ГИС

Это помогает ЛПР понять контекст ситуации, определить основную информацию, касающуюся возможной необходимости эвакуации, и принять решение на основе многокритериального анализа [19, 20].

Попробуем установить связь между числовым значением *NTE*, выраженным в процентах (%), и множеством качественных значений входных переменных. Одним из возможных решений для соответствующих предлагаемых действий, связанных с необходимостью эвакуации, может быть решение, указанное в табл. 1.

Таблица 1

Предлагаемые действия, связанные с необходимостью эвакуации

Вариант эвакуации	Описание	Необходимо эвакуировать (%)	
		уровень	диапазон
Никакой эвакуации	Никаких дополнительных действий не требуется	очень низкий	(0, 15)
Бдительность	Меры предосторожности при риске наводнения, включая подготовку к эвакуации	низкий	(15, 40)
Консультативная эвакуация	Частичная эвакуация, некоторым людям из группы риска, рекомендуется эвакуироваться	средний	(40, 65)
Мягкий приказ об эвакуации	Полная эвакуация людей из группы риска	высокий	(65, 80)
Приказ о срочной эвакуации	Приказ о полной эвакуации, населению, находящемуся в опасности, рекомендуется покинуть район наводнения	очень высокий	(80, 100)

Заключение. Предложена нечеткая модель принятия решения об эвакуации на основе таких критериев принятия решения как уровень прогнозируемого наводнения, уровень опасности, уязвимость района и возможность безопасной эвакуации. Нечеткая модель реализована с помощью *Matlab*. Данные пространственного измерения критериев принятия решения предварительно обрабатываются с

помощью платформы ГИС, а затем импортируются в нечеткую модель принятия решения об эвакуации для оценки *NTE* конкретной области. Пространственные значения *NTE* можно импортировать в платформу ГИС для отображения на картах, которые могут использоваться в качестве поддержки принятия решений для управления эвакуацией. Нечеткая модель принятия решения об эвакуации определяет нелинейную связь между критериями принятия решения и необходимостью эвакуации, основанную на эвристических правилах с использованием нечеткой логики. Это обеспечит оценку *NTE* для должностных лиц в конкретной области для различных сценариев и обстоятельств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lumbroso D., Vinet F.* Tools to Improve the Production of Emergency Plans for Floods: Are They Being Used by the People that Need Them? // *Jour. of Contingencies and Crisis Management.* – 2012. – Vol. 20. – P. 149-165.
2. *Gerasimenko E., Rozenberg I.* Earliest arrival dynamic flow model for emergency evacuation in fuzzy conditions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk Science and Technology.* – 2020. – Vol. 734 (1). – P. 012147.
3. *Родзин С.И.* Вычислительный интеллект: немонотонные логики и графическое представление знаний // *Программные продукты и системы.* – 2002. – № 1, – С. 20-25.
4. *Lindell M.K., Prater C.S.* A hurricane evacuation management decision support system (EMDSS) // *Natural Hazards.* – 2007. – Vol. 40. – P. 627-634.
5. *Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A.* Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making // *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems.* – 2021. – P. 256-268.
6. *Родзина О.Н.* Проблемно-ориентированные алгоритмы мягких вычислений. – Чебоксары: ИД "Среда", 2020. – 96 с. – DOI: 10.31483/a-200.
7. *Sivanandam S., Sumathi S., Deepa S.* Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. – Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
8. *Герасименко Е.М.* Нечеткая модель нахождения максимального динамического потока для решения задачи эвакуации зданий // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2019. – № 4 (206). – С. 15-26.
9. *Родзин С.И., Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А.* Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения. – Чебоксары: Изд. дом «Среда», 2019. – 224 с.
10. *Герасименко Е.М., Нужнов Е.В.* Решение задачи нахождения максимального потока в задачах эвакуации на основе нечетких колеблющихся операторов агрегирования // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2021. – № 4 (221), – С. 145-154.
11. *Tiglioglu T.S.* Modeling hurricane evacuation using transportation models, fuzzy set, and possibility theory: Ph.D. dissertation, Texas Tech University, 2001.
12. *Raymond A.M.* Modeling hurricane evacuation vulnerability: a case study of Pinellas County. Department of Geography, University of South Florida, 2005.
13. *Rodzin S., Rodzina O.* New computational models for big data and optimization // *Proc. 9th Int. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT'2015).* – 2015. – P. 3-7.
14. *Gerasimenko E., Kureichik V.V.* Minimum cost lexicographic evacuation flow finding in intuitionistic fuzzy networks // *Jour. of Intelligent and Fuzzy Systems.* – 2022. – Vol. 42, No. 1. – P. 251-263.
15. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл., Саак А.Э.* Эволюционный алгоритм для решения задачи диспетчеризации // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2021. – № 2 (219). – С. 50-59.
16. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл., Саак А.Э.* Основные стратегии и принципы при решении задач диспетчерования в сборнике // *Тр. межд. конгресса "Интеллектуальные системы и информационные технологии".* – 2020. – С. 235-241.
17. *Родзин С.И., Родзина Л.С.* Биоинспирированный поиск решений: теория и приложения для обработки проблемно-ориентированных знаний в геоинформатике // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 4 (165). – С. 203-216.
18. *Родзин С.И.* Биоэвристики многокритериальной оптимизации: проектирование и гибридизация // *Тр. межд. конгресса «IS&IT'18».* – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2018. – Т. 1. – С. 33-47.

19. Петровский А.Б. Снижение размерности признакового пространства: метод СОКПАТ // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 2. – С. 63-77.
20. Kailiponi P. Analyzing evacuation decision using Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 3. – P. 163-174.

REFERENCES

1. Lumbroso D., Vinet F. Tools to Improve the Production of Emergency Plans for Floods: Are They Being Used by the People that Need Them?, *Jour. of Contingencies and Crisis Management*, 2012, Vol. 20, pp.149-165.
2. Gerasimenko E., Rozenberg I. Earliest arrival dynamic flow model for emergency evacuation in fuzzy conditions, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. , 2020, Vol. 734 (1), pp. 012147.
3. Rodzin S.I. Vychislitel'nyy intellekt: nemonotonnye logiki i graficheskoe predstavlenie znaniy [Computational intelligence: non-monotonic logics and graphical representation of knowledge], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2002, No. 1, pp. 2-25.
4. Lindell M.K., Prater C.S. A hurricane evacuation management decision support system (EMDSS), *Natural Hazards*, 2007, Vol. 40, pp. 627-634.
5. Kacprzyk J., Zadrozny S., Nurmi H., Bozhenyuk A. Towards Innovation Focused Fuzzy Decision Making. *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2021, pp. 256-268.
6. Rodzina O.N. Problemno-orientirovannyye algoritmy myagkikh vychisleniy [Problem-oriented algorithms of soft computing]. *Cheboksary: ID "Sreda"*, 2020, 96 p. DOI: 10.31483/a-200.
7. Sivanandam S., Sumathi S., Deepa S. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
8. Gerasimenko E.M. Nechetkaya model' nakhozhdeniya maksimal'nogo dinamicheskogo potoka dlya resheniya zadachi evakuatsii zdaniy [Fuzzy model of finding the maximum dynamic flow for solving the problem of evacuation of buildings], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 4, pp. 15-26.
9. Rodzin S.I., Skobtsov Yu.A., El-Khatib S.A. Bioevristiki: teoriya, algoritmy i prilozheniya [Bioheuristics: theory, algorithms and applications]. *Cheboksary: ID "Sreda"*, 2019, 224 p.
10. Gerasimenko E.M., Nuzhmov E.V. Reshenie zadachi nakhozhdeniya maksimal'nogo potoka v zadachakh evakuatsii na osnove nechetkikh koleblyushchikhsya operatorov agregirovaniya [Solving the problem of finding the maximum flow in evacuation problems based on fuzzy oscillating aggregation operators], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, no. 4, pp. 145-154.
11. Tiglioglu T.S. Modeling hurricane evacuation using transportation models, fuzzy set, and possibility theory: Ph.D. dissertation, Texas Tech University, 2001.
12. Raymond A.M. Modeling hurricane evacuation vulnerability: a case study of Pinellas County. Department of Geography, University of South Florida, 2005.
13. Rodzin S., Rodzina O. New computational models for big data and optimization, *Proc. 9th Int. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT'2015)*, 2015, pp. 3-7.
14. Gerasimenko E., Kureichik V.V. Minimum cost lexicographic evacuation flow finding in intuitionistic fuzzy networks, *Jour. of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2022, Vol. 42, No. 1, pp. 251-263.
15. Kureychik V.V., Kureychik V.V., Saak A.E. Evolyucionnyy algoritm dlya resheniya zadachi dispetcherizatsii [An evolutionary algorithm for solving the dispatching problem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2, pp. 50-59.
16. Kureychik V.V., Kureychik V.V., Saak A.E. Osnovnye strategii i printsipy pri reshenii zadach dispetchirovaniya v sbornike [Basic strategies and principles in solving dispatching tasks in the collection]. *Tr. mezhd. kongressa "Intellektual'nye sistemy i informacionnye tekhnologii"* [Proceedings of the International Congress "Intelligent Systems and Information Technologies"], 2020, pp. 235-241.
17. Rodzin S.I., Rodzina L.S. Bioinspirirovannyy poisk resheniy: teoriya i prilozheniya dlya obrabotki problemno-orientirovannykh znaniy v geoinformatike [Bioinspired search for solutions: theory and applications for processing problem-oriented knowledge in geoinformatics], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4, pp. 203-216.

18. Rodzin S.I. Bioevristiki mnogokriterial'noy optimizatsii: proektirovanie i gibridizatsiya [Bio heuristics of multicriteria optimization: design and hybridization], *Tr. mezhd. kongressa "Intellectual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii"* [Proceedings of the International Congress "IS&IT'18"]. Taganrog: Izd-vo Stupina S.A., 2018, Vol. 1. pp. 33-47.
19. Petrovsky A.B. Snizhenie razmernosti priznakovogo prostranstva: metod SOKRAT [Reducing the dimension of the feature space: the SOCRATES method], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making], 2020, No. 2, pp. 63-77.
20. Kailiponi P. Analyzing evacuation decision using Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), *Procedia Engineering*, 2010, Vol. 3, pp. 163-174.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; доцент.

Курейчик Владимир Викторович – e-mail: vkur@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; зав. кафедрой САПР; д.т.н.; профессор.

Родзин Сергей Иванович – e-mail: srodzin@sfedu.ru; тел.: 88634371673; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; профессор.

Кухаренко Анатолий Павлович – e-mail: apkuharenko@sfedu.ru; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; к.т.н.; доцент.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kureichik Vladimir Victorovich – e-mail: vkur@sfedu.ru; the department of computer aided design; head of CAD department; dr. of eng. sc.; professor.

Rodzin Sergey Ivanovich – e-mail: srodzin@sfedu.ru; phone: +78634371673; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; professor.

Kukharenko Anatoliy Pavlovich – e-mail: apkuharenko@sfedu.ru; the department of intelligent and multiprocessor systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-29-39

Э.В. Кулиев, А.В. Котельва, М.М. Семенова, С.В. Игнатьева, А.П. Кухаренко

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИИ ОТЖИГА *

Рассмотрен аналитический обзор алгоритма имитации отжига для задачи эффективного управления предприятием. Проведена оптимизация алгоритма имитации отжига для задачи эффективного управления предприятием. Для анализа случаев использовалась оптимизация графика работы рабочих в организации. Установлена модель планирования рабочих с сильными и слабыми ограничениями. Смоделированный алгоритм отжига используется для оптимизации стратегии решения модели планирования рабочего графика персонала. Алгоритм имитации отжига представляет собой алгоритм, пригодный для решения крупномасштабных задач комбинаторной оптимизации. Он также оценивает и получает оптимальную стратегию планирования. Алгоритм имитации отжига хорошо влияет на интеллектуальный анализ данных управления человеческими ресурсами. Интеллектуальный анализ больших данных может помочь компаниям проводить динамический

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–21–00316, <https://rscf.ru/project/22-21-00316/> в Южном федеральном университете.