

УДК 614.8: 556:551.3

## Модели оценки подверженности застроенных территорий воздействию опасных природных процессов с климатическим фактором на основе систем нечеткого логического вывода типа Мамдани и типа Сугено

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Технологии гражданской безопасности, 2022

**Е.И. Алексеева, Е.В. Арефьева**

### Аннотация

В статье рассматривается возможность использования системы нечеткого логического вывода типа Мамдани и типа Сугено для оценки комплексной (общей) подверженности застроенных территорий воздействию опасных природных процессов с климатическим фактором. Системы логического вывода построены для экзогенных опасных процессов, наиболее распространенных в Республике Татарстан: подтопление, оползни, карсты, переработка берегов, овражные эрозии. Результаты такой оценки могут быть использованы для дальнейшей разработки защитных и предупредительных мероприятий по снижению уровня опасности на застроенных территориях, в том числе в условиях климатических изменений.

**Ключевые слова:** опасные природные процессы; подтопление; карстовые процессы; оползневые процессы; оценка подверженности; нечеткие множества; нечеткая логика; системы нечеткого вывода.

## Models for Assessing the Exposure of Built-Up Areas to the Impact of Natural Hazards with a Climatic Factor Based on Fuzzy Inference Systems of the Mamdani and Sugeno Types

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Civil Security Technology, 2022

**E. Alekseeva, E. Arefieva**

### Abstract

The article considers the possibility of using fuzzy inference system of the Mamdani type and the Sugeno type to assess the complex (general) susceptibility of built-up areas to the effects of hazardous natural processes with a climate factor. Logical inference systems are built for exogenous hazardous processes mostly common in the Republic of Tatarstan – flooding, landslides, karsts, banks processing, ravine erosion. The results of such an assessment can be used for further development of protective and preventive measures to reduce the level of danger in the built-up areas, including in conditions of climate change.

**Key words:** hazardous natural processes; flooding; karst processes; landslide processes; exposure assessment; fuzzy sets; fuzzy logic; fuzzy inference systems.

12.08.2022

## Введение

В настоящее время как во всем мире, так и на территории Российской Федерации наблюдаются климатические изменения, которые проявляются в виде экстремальных метеорологических, гидрологических и иных опасных природных процессов [1]. Изучение воздействия климатических изменений на устойчивость территорий и объектов техносферы, а также на социально-экономическое развитие регионов имеет важное значение с точки зрения принятия мер адаптационного характера, смягчающих воздействие климатических рисков [2]. Для разработки национального плана адаптации в Минэкономразвитии России разработаны и утверждены Методические рекомендации по оценке климатических рисков, ранжированию адаптационных мероприятий по степени приоритетности и составлению отраслевого или регионального плана [3]. Поэтому проведение оценки подверженности территорий и отдельных объектов техносферы климатическим рискам представляется весьма актуальной задачей [4].

Наиболее опасным для застроенных территорий представляется процесс подтопления грунтовыми водами, который протекает незаметно, а проявляется внезапно в виде провалов грунта, внезапного обрушения зданий из-за снижения несущей способности грунтов-оснований сооружений, инициации оползневых и суффозионно-карстовых процессов [5–7]. Инициация новых и активизация имеющихся природных процессов на застроенных территориях, в том числе в результате изменения климата, приводят не только к возможному повреждению зданий и сооружений (в результате экстремальных ливней, подтопления, размыва грунтов оснований сооружений и др. процессов), но и к полному их разрушению [8]. Устойчивость объектов культурного наследия к угрозам природного характера рассмотрена, в частности, в работах [8–12].

Особенно неблагоприятно влияние опасных экзогенных природных процессов с климатическим фактором (ОППКФ) на основании фундаментов объектов с массовым пребыванием людей, фундаментов критически важных объектов, особенно на памятники истории, архитектуры и культуры, а также на заглубленные помещения зданий и сооружений, в т. ч. используемые в качестве убежищ и укрытий [5, 7, 8, 10]. Негативное воздействие ОППКФ на фундаменты зданий и сооружений может нанести значительный материальный и социальный ущерб. Поэтому задача оценки подверженности застроенных территорий с расположенными на них зданиями, сооружениями, объектами техносферы<sup>1</sup> ОППКФ является актуальной и требует совершенствования методов и моделей комплексной оценки [13, 14]. С интенсивным развитием вычислительной техники и накопления большого объема информации появляются новые подходы и методы обработки данных.

Применение теории нечетких множеств активно используется как при моделировании и прогнозировании проявлений опасных природных процессов,

так и в различных сферах промышленности, а также при поддержке принятия решений на основе анализа большого количества данных [15, 16].

В статье, с помощью систем на основе применения моделей логического вывода Мамдани и Сугено, частично представленных в работе [17], оценивается подверженность территории Республики Татарстан (далее — РТ) воздействию некоторых опасных природных процессов с климатическим фактором, относящихся к характерным экзогенным природным процессам. Авторами статьи предлагается применение систем нечеткого логического вывода типа Мамдани и типа Сугено для оценки комплексной подверженности застроенных территорий и объектов техносферы воздействию различных видов ОППКФ.

## 1. Разработка математической модели оценки подверженности объектов техносферы и территорий воздействию ОППКФ на основе системы нечеткого вывода типа Мамдани

### 1.1. Формирование правил логического вывода в системе типа Мамдани для оценки подверженности объектов техносферы и территорий воздействию ОППКФ

Для построения модели оценки подверженности объектов техносферы и территорий воздействию ОППКФ на основе системы нечеткого вывода типа Мамдани, необходимо с помощью экспертного опроса сформировать левые и правые части нечетких правил логического вывода вида:

$R_1$ : ЕСЛИ  $x_1$  это  $A_{1l}$  ... И ...  $x_n$  это  $A_{1n}$ , ТО  $y_1$  это  $B_1$ ;

$R_i$ : ЕСЛИ  $x_1$  это  $A_{il}$  ... И ...  $x_n$  это  $A_{in}$ , ТО  $y_2$  это  $B_i$ ; (1)

$R_m$ : ЕСЛИ  $x_m$  это  $A_{ml}$  ... И ...  $x_n$  это  $A_{mn}$ , ТО  $y_m$  это  $B_m$ ,

где:

$R_i$  — правила нечеткого вывода системы типа Мамдани,  $i = 1, \dots, m$ ;

$x_{ik}$  ( $k = 1 \dots n$ ) — входные переменные;

$y_j$  ( $j = 1 \dots m$ ) — выходные переменные;

$\bar{Y}_1 = (y_{1, \dots}, y_{j, \dots}, y_m)$  — вектор комплексной (общей оценки);

$A_{ik}$  — заданные нечеткие множества с функциями принадлежности;

$B_i$  — лингвистическое заключение выходной переменной.

Входными переменными являются характеристики различных ОППКФ, а выходными переменными — комплексные оценки подверженности объекта техносферы или территории воздействию ОППКФ по каждому правилу.

Для разработки математической модели на основе системы нечеткого вывода типа Мамдани

<sup>1</sup> Под «объектами техносферы» здесь будем понимать все построенные здания и сооружения на застроенной территории, включая производственные объекты, объекты экономики, объекты культуры, архитектуры, все здания и сооружения, расположенные на рассматриваемой территории.

Таблица 1

Градации подверженности территории воздействию ОППКФ с учетом Методических рекомендаций [3]

Наименование ОППКФ	Условное обозначение	Область значений	Уровень опасности			
			чрезвычайно опасный (катастрофический) (Кр)	весьма опасный (ВО)	опасный (Оп)	умеренно или незначительно опасный (УО)
Подверженность территории эрозии, %	Э	1–100	-	Более 50	30–50	0–30
Подверженность территории оползням, %	О	1–100	Более 30	11–30	1–10	0–1
Подверженность территории карсту, %	К	1–100	-	5–80	5–50	0–5
Подверженность территории подтоплению, %	П	1–100	-	75–100	50–75	0–50
Переработка берегов водохранилищ, озер (скорость линейного отступления берегов), м/год	С	1–6	-	Более 3	1–3	0–1

Примечание: Э — эрозия, О — оползневые процессы, К — карстовые процессы, П — подтопление, С — переработка берегов.

рассматривались ОППКФ экзогенного характера, характерные для территории Республики Татарстан, а анализ подверженности воздействию выполнялся с учетом градаций опасных уровней, представленных в Методических рекомендациях [3] (табл. 1).

Набор правил для формирования комплексной (общей) оценки подверженности ОППКФ территории Республики Татарстан определен на основе экспертного опроса и фондовых материалов [18], результаты сведены в табл. 2 (фрагмент).

При условии задания функций принадлежности для каждой качественной оценки входных и выходных параметров с учетом данных табл. 1 строится система типа Мамдани и рассчитываются компоненты  $y_1, \dots, y_j, \dots, y_m$  вектора  $Y_1$  по каждому из 324 правил. Вектор  $Y_1$  будем рассматривать как показатель подверженности территории ОППКФ.

### 1.2. Построение и редактирование системы типа Мамдани в графическом режиме с использованием пакета программ Fuzzy Logic

Для построения системы типа Мамдани и расчета комплексной (общей) оценки подверженности территории воздействию ОППКФ ( $Y_1$ ) использовался пакет нечеткого моделирования Fuzzy Logic Toolbox<sup>2</sup> с использованием

редактора систем нечеткого вывода FISEditor, который позволяет создавать или редактировать системы нечеткого вывода в графическом режиме, а также задавать и редактировать результаты экспертного опроса, свойства системы нечеткого вывода, такие как: число входных и выходных переменных; тип системы нечеткого вывода; используемый метод дефазификации. [20, 21]

Для комплексной (общей) оценки подверженности территорий воздействию ОППКФ ( $Y_1$ ) в качестве входных параметров систем нечеткого вывода использовано пять следующих нечетких лингвистических переменных:

1. Подверженность территории овражной эрозии (Erosion).
2. Подверженность территории оползневым процессам (Landslide).
3. Подверженность территории карстовым процессам (Karst).
4. Подверженность территории подтоплению (Flooding).
5. Подверженность территории переработке берегов рек, водохранилищ, озер (Retreat).

В качестве выходного параметра — нечеткая лингвистическая переменная «Общая оценка подверженности» (General\_Hazard\_Rating).

Таблица 2

Набор правил нечеткого вывода системы типа Мамдани для формирования комплексной (общей) оценки подверженности территории воздействию ОППКФ (фрагмент таблицы)

№ ПРАВИЛА	Эрозия (Э)	Оползни (О)	Карст (К)	Подтопление (П)	Переработка берегов водохранилищ (С)	Комплексная (общая) подверженность ОППКФ ( $Y_1$ )
1	УО	УО	УО	УО	УО	УО
2	УО	УО	УО	УО	Оп	Оп
3	УО	УО	УО	УО	ВО	ВО
4	УО	УО	УО	Оп	УО	УО
...	...	...	...	...	...	...
323	ВО	Кр	ВО	ВО	Оп	Кр
324	ВО	Кр	ВО	ВО	ВО	Кр

Примечание: УО — умеренно или незначительно опасный, Оп — опасный, ВО — весьма опасный, Кр — чрезвычайно опасный (катастрофический).

<sup>2</sup> FuzzyLogicToolbox — <https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>, дата обращения: 10.08.2022.

### 1.3. Разработка системы нечеткого логического вывода типа Мамдани для оценки подверженности территории воздействию ОППКФ

В систему нечеткого логического вывода FISEditor введено пять входных переменных: Erosion (эрозия), Landslide (оползни), Karst (карст), Flooding (подтопление), Retreat (переработка берегов), и одна выходная переменная: General\_Hazard\_Rating (общая оценка подверженности) (см. рис.) [19].

Функции принадлежности входных переменных графически определяются как треугольные (для значений «опасный», «весьма опасный») либо трапециевидные (для значений «умеренно опасный или незначительно опасный» и «чрезвычайно опасный (катастрофический)»). При этом функции нормированы, то есть для любого значения входного параметра сумма значений

функций принадлежности всех нечетких термов равна единице. Параметры функций принадлежности определяются, исходя из заданных средних и граничных значений соответствующих диапазонов, с учетом Методических рекомендаций по вопросам адаптации к климату [3]. В результате выходные переменные характеризуются четверкой функций принадлежности вида (табл. 3).

Однако система типа Мамдани обладает рядом недостатков, в первую очередь — невозможностью ее дообучения на имеющихся экспериментальных данных. Избежать этих недостатков позволяет система типа Сугено, отличающаяся от Мамдани способом задания правых частей правил. В системе Сугено правые части представляют собой линейные многочлены относительно входных параметров с заданными коэффициентами [20, 21].

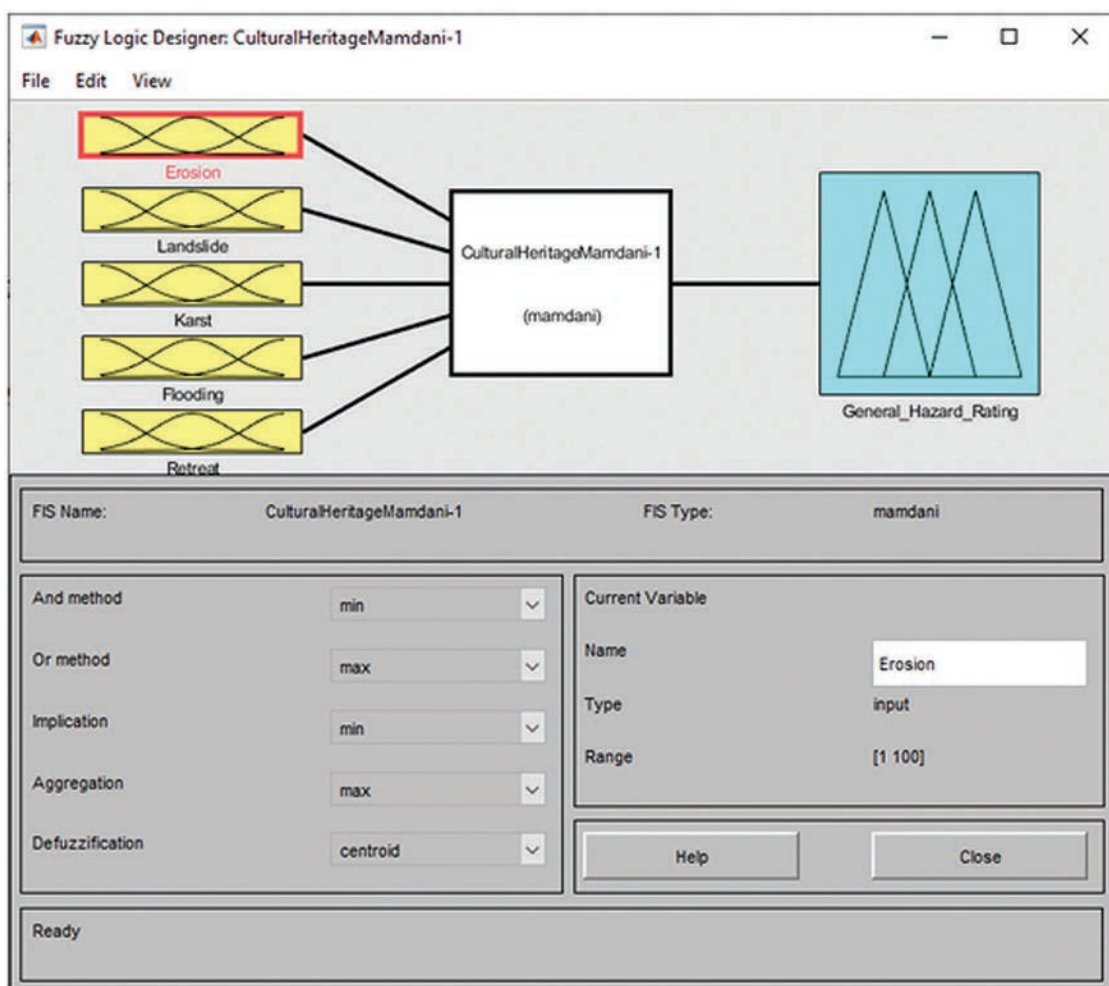


Рис. Вид окна редактора FISFuzzyLogicToolbox при задании значений переменных системы типа Мамдани для оценки комплексной (общей) подверженности территории воздействию ОППКФ

Таблица 3

#### Функции принадлежности выходного параметра системы типа Мамдани для оценки подверженности территории воздействию ОППКФ

Переменная	Терм	Вид функции принадлежности	Параметры функции принадлежности
General_Hazard_Rating	moderate_danger умеренно опасный	Трапециевидная	[-1 0 15 25]
	Dangerous опасный	Треугольная	[15 25 43]
	very_dangerous весьма опасный	Треугольная	[25 43 50]
	extremely_dangerous катастрофический	Трапециевидная	[40 50 100 101]



## 2. Разработка математической модели общей оценки подверженности объектов техносферы и территорий воздействию ОППКФ на основе нечеткого вывода системы типа Сугено

Для формирования системы типа Сугено записывается линейное выражение (функция): зависимость выходного параметра ( $Y_1$ ) от входных параметров: Erosion — эрозия (Э); Landslide — оползневые процессы (О); Karst — карстовые процессы (К); Flooding — подтопление (П); Retreat — овражная эрозия (С). Всего таких функций должно быть четыре — по числу возможных качественных оценок выходного параметра ( $Y_1$ ) (см. табл. 3). Функция имеет общий вид [12]:

$$Y_1 = a_1 \cdot \text{Э} + a_2 \cdot \text{О} + a_3 \cdot \text{К} + a_4 \cdot \text{П} + a_5 \cdot \text{С}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения функции (2) необходимо рассчитать пять неизвестных коэффициентов:  $a_1, a_2, a_3, a_4$  и  $a_5$ . В данном выражении опущен свободный член  $a_0$ , так как при его наличии линейная функция при расчетах коэффициентов вырождается в синглтон по принципу  $a_0 =$  «середина диапазона для заданного качественного значения выходного параметра», а все остальные коэффициенты становятся равны нулю [12].

Для дальнейшего формирования систем линейных уравнений необходимо иметь количественные соответствия качественным значениям входных и выходных параметров. Неизвестные коэффициенты линейной функции (2) для каждого качественного значения  $Y_1^*$  (для показателя  $Y_1^*$ , принимающего соответствующие значения «УО», «Оп», «ВО», «Кр») определяются в следующем порядке [12]:

Из табл. 2 набора правил нечеткого вывода системы Мамдани выделены пять правил таким образом, чтобы в правой части правила выходное значение было равно заданному качественному значению  $Y_1^*$ , а в левой части содержалось максимальное разнообразие сочетаний значений входных параметров.

Для каждого выделенного правила записывается выражение (2), заменяя входные параметры (Э, О, К, П, С) их средними значениями, соответствующими качественному описанию диапазонов из табл. 1. В результате получаем 5 линейных уравнений относительно пяти неизвестных коэффициентов  $a_i$ , где  $i=1 \dots 5$ .

Решив полученную замкнутую систему линейных уравнений, определяем коэффициенты линейных функций правых частей правил нечеткого вывода, соответствующих заданному качественному значению  $Y_1^*$ .

Соответствие данных качественного выражения для определения степени опасности  $Y_1$  и вида получаемой функции представлено в табл. 4.

Далее, аналогично системе типа Мамдани, в систему нечеткого логического вывода с помощью редактора FISEditor вводим пять входных переменных: Erosion, Landslide, Karst, Flooding, Retreat, и одну выходную

Таблица 4  
Линейные функции для формирования правых частей правил системы типа Сугено для оценки подверженности воздействию ОППКФ территории Республики Татарстан

Качественное выражение $Y_1$	Вид линейной функции
УО	$Y_1 = 0,34 \cdot \text{Э} + 6,98 \cdot \text{О} + 0,15 \cdot \text{К} + 0,03 \cdot \text{П} + 5,5 \cdot \text{С}$
Оп	$Y_1 = 0,07 \cdot \text{Э} + 0,49 \cdot \text{О} + 0,20 \cdot \text{К} + 0,19 \cdot \text{П} + 2,08 \cdot \text{С}$
ВО	$Y_1 = 0,03 \cdot \text{Э} + 0,36 \cdot \text{О} + 0,15 \cdot \text{К} + 0,32 \cdot \text{П} + 2,02 \cdot \text{С}$
Кр	$Y_1 = 0,01 \cdot \text{Э} + 0,46 \cdot \text{О} + 0,78 \cdot \text{К} + 0,49 \cdot \text{П} + 3,89 \cdot \text{С}$

переменную General\_Hazard\_Rating (вектор  $Y_1$ ). Результаты вычисления оценки комплексной (общей) подверженности «General\_Hazard\_Rating» при среднеарифметических значениях параметров входных переменных представлены в работе [12].

Сравнение результатов оценки подверженности «Общая оценка опасности» для одинаковых входных параметров, полученных по построенным математическим моделям нечеткого вывода системы типа Мамдани и системы типа Сугено, демонстрирует близкие количественные и качественные результаты (табл. 5).

Таблица 5  
Сравнение рассчитанных выходных значений комплексной (общей) оценки подверженности воздействию ОППКФ территории согласно системам типа Мамдани и типа Сугено

Вид системы	Система типа Мамдани		Система типа Сугено	
	Число-вое значение выхода	Линг-висти-ческая интер-прета-ция	Чис-ловое зна-чение выхо-да	Линг-висти-ческая интер-прета-ция
Набор значений входных параметров				
Средние значения	67,6	Чрезвы-чайно опас-ный	66,3	Чрезвы-чайно опас-ный

В целом система Мамдани настроена более «настороженно». В то время как преимуществом системы Сугено является возможность дообучения с помощью экспертного метода на подготовленном наборе числовых данных типа «вход-выход» и корректировки входных параметров.

## 3. Оценка подверженности территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ с использованием математической модели на основе нечеткого вывода системы типа Сугено

Для выявления подверженности территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ<sup>3</sup> необходимо определить территории их развития на основе ретроспективной оценки [4, 18, 22]. В табл. 6 и 7 указана подверженность территории Республики Татарстан

<sup>3</sup> Из ОППКФ рассматриваем экзогенные опасные природные процессы: переработку берегов, оползни, карсты, подтопление, овражную эрозию.

Таблица 6

## Подверженность территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ [12, 23]

По категориям риска (да/нет)	Чрезвычайно опасный	Весьма опасный	Опасный	Умеренно опасный
Оползни	да	нет	нет	нет
Переработка берегов водохранилищ, озер	нет	да	нет	нет
Карст	да	нет	нет	нет
Подтопление территории	нет	нет	да	-
Эрозия плоскостная и овражная	нет	да	нет	нет

Таблица 7

## Детализированная информация о подверженности воздействию ОППКФ территории Республики Татарстан

Показатели ОППКФ	Уровень опасности		
	Всего по территории	Максимум	Категория опасности
1. Оползни			
Подверженность территории, %	Более 50	-	Чрезвычайно опасный
2. Переработка берегов водохранилищ, озер			
Первая стадия	3–4	-	Опасный
3. Карст			
Подверженность территории, %	25	-	Чрезвычайно опасный
4. Подтопление территории			
Подверженность территории, %	Менее 20	-	Опасный
5. Эрозия плоскостная и овражная			
Подверженность территории, %	Не более 30		Весьма опасный

опасным экзогенным природным процессам с климатическим фактором в соответствии с Методическими рекомендациями [3] и на основе анализа данных из фондовых, архивных и опубликованных инженерно-геологических, гидрогеологических и гидрологических материалов по районам развития ОППКФ [18, 23].

Используя данные табл. 7, выполнена комплексная (общая) оценка подверженности территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ с использованием математической модели на основе нечеткого вывода системы типа Сугено (табл. 8).

Таблица 8

## Комплексная (общая) оценка подверженности территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ

Наименование входных и выходного параметров	Количественное значение входных и выходного параметров, %
Erosion (овражная эрозия)	30
Landslide (оползневые процессы)	50
Karst (карстовые процессы)	25
Flooding (подтопление)	20
Retreat (переработка берегов рек, водохранилищ, озер)	3
<b>General_Hazard_Rating (Комплексная (общая) оценка опасности)</b>	<b>44,5</b>

Согласно вычислениям с помощью математической модели нечеткого вывода системы типа Сугено (табл. 8) значение комплексной (общей) оценки подверженности территории Республики Татарстан воздействию ОППКФ относится к категории «весьма опасный». В результате дальнейших климатических изменений степень подверженности и категория опасности могут только возрастать, если не принимать превентивных адаптационных мероприятий.

## Заключение и выводы

Разработанные авторами модели оценки подверженности застроенных территорий Республики Татарстан воздействию опасных экзогенных природных процессов с климатическим фактором на основе нечеткого вывода системы Мамдани и системы Сугено могут стать инструментом для анализа и комплексной оценки различных видов ОППКФ на застроенных территориях и оценки подверженности отдельных объектов техносферы совокупности опасных природных процессов с климатическим фактором. Это позволит спрогнозировать наиболее опасные территории, районы и участки для объектов техносферы (как для существующих, так и запланированных к строительству) и тем самым своевременно осуществить необходимые предупредительные и защитные инженерные мероприятия, а также использовать при разработке региональных адаптационных планов, паспортов безопасности территорий.

## Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с.
2. Климатическая доктрина Российской Федерации (распоряжение Президента Российской Федерации от 14 декабря 2009 года № 861-рп).
3. Приказ Минэкономразвития России от 13 мая 2021 года № 267 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата».
4. Акимов В. А., Арефьева Е. В., Иванова Е. О., Суцев С. П. Предварительная оценка климатических рисков в области гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 2 (68). С. 4–9.
5. Arefyeva, E V; Muravyeva, E V; Maslennikova, N N. Environmental Risks Caused by Floods in Built-Up Areas/IOP Conference Series. Earth and Environmental Science; Bristol. Том 666, Изд. 5, (Mar 2021). DOI: 10.1088/1755-1315/666/5/052032.
6. Арефьева Е. В. Предупреждение чрезвычайных ситуаций при подтоплении: ситуационная геофильтрационная модель застроенной территории. Информация технология: Моногр. Химки: ФБГОУ ВПО АГЗ МЧС России, 2014. 181 с.
7. Арефьева Е. В. Подтопление как потенциальный источник ЧС / Е. В. Арефьева, В. И. Мухин, Э. Г. Мирмович // Технологии гражданской безопасности. 2007. Т. 4. № 4 (16). С. 69–73.
8. Арефьева Е. В., Муравьева Е. В. Прогноз воздействия опасных факторов чрезвычайных ситуаций на состояние объектов техносферы // Международный научно-исследовательский журнал «Евразийский Союз ученых». Июль 2019. ISSN: 2411-6467; DOI: 10.31618/esu.2411-6467.8.53.1.
9. Арефьева Е. В., Муравьева Е. В. Устойчивость объектов культурного наследия // Международный научный журнал «Кризисное управление и технология». Crisis management and technology. Ереван, 2020. № 1(16). С. 73–79.
10. Arefyeva E., Muravyeva E., Alekseeva E. Improving the sustainability of cultural heritage sites using the INFORM Method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 962, International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS2020) 6–12 September 2020, Sochi, Russia. E V Muravyeva et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 962042018.
11. Arefyeva E., Muravyeva E., Alekseeva E. The issues of sustainability of historical and cultural areas associated with their periodic underflooding and solutions. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 687 (2019) 066031 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/687/1/066031.
12. Алексеева Е. И., Арефьева Е. В., Новикова С. В. Оценка устойчивости объектов культурного наследия при воздействии опасных природных процессов на основе каскадной нейронечеткой модели Такаги-Сугено-Канга // Моделирование сложных процессов и систем: Сб. трудов секции № 10 XXXII Международной научно-практической конференции, Химки, 1 марта 2022 года. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2022. С. 25–30.
13. Олтян И. Ю., Арефьева Е. В., Артюхин В. В., Верескун А. В., Гутарев С. В., Котосонов А. С., Чяснавичюс Ю. К. Методический подход к расчету прогнозного значения обобщенного показателя, характеризующего состояние системы мероприятий по подготовке к защите и по защите населения, материальных и культурных ценностей на территориях субъектов Российской Федерации в чрезвычайных ситуациях // Технологии гражданской безопасности. 2020 Т. 17. № 2 (64). С. 4–14.
14. Oltyan I., Arefyeva E., Kotosonov A. Remote assessment of an integrated emergency risk index. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 962042018 <https://doi.org/10.1088/1755-899X/962/4/042018>.
15. Набиуллин Д. А., Кононова В. В., Новикова С. В. Метод автоматизированной разметки больших данных с использованием нейронных сетей // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24. № 6. С. 103–107.
16. Андейчук А. В. Сезонное районирование транспортного освоения земель лесного фонда с применением теории нечетких множеств // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1. С. 102–106.
17. Алексеева Е. И., Романовский Д. Ю., Моисеев В. А. Оценка уязвимости объектов культурного наследия к воздействию опасных факторов чрезвычайных ситуаций // Пятилетие реализации Сендайской рамочной программы на национальном и местном уровнях: итоги и перспективы: Сб. материалов Международной научно-практической конференции, Казань, 21–23 апреля 2021 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. С. 13–19.
18. Введение мониторинга опасных экзогенных геологических процессов на территории Республики Татарстан на территориальном уровне // Отчет к государственному контракту № 3.26/19 от 17.09.2019. В 3-х кн. № гос. рег. Татнедра 92-19-1736.
19. Алексеева Е. И., Муравьева Е. В. Моделирование устойчивости объектов культурного наследия Республики Татарстан к воздействию опасных природных процессов // Моделирование сложных процессов и систем: Сб. трудов секции № 12 XXXI Международной научно-практической конференции, Химки, 17 марта 2021 года. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2021. С. 56–61.
20. Хижняков Ю. Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого правления в системах реального времени: Учеб. пособ. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. 160 с.
21. Леоненков А. Нечеткое моделирование в средах MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 736 с.
22. Слепак Э. М. Геофизика для города: на примере территории г. Казани. М.: ЕАГО, 2007.
23. Алексеева Е. И. Влияние опасных природных процессов с климатическим фактором на устойчивость объектов культурного наследия Республики Татарстан // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Казань: Изд-во ИП Сагиева А. Р., 2021. С. 233–239.

## Сведения об авторах

**Алексеева Екатерина Ивановна:** ФБГОУ ВО «КНИТУ-КАИ», ст. препод. каф. промышленной и экологической безопасности. Казань, Россия. SPIN-код: 2870-8044.

**Арефьева Елена Валентиновна:** д. т. н., доц., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), г. н. с. науч.-исслед. центра. Москва, Россия. SPIN-код: 2738-6323.

## Information about authors

**Alekseeva Ekaterina I.:** Kazan National Research Technical University named after V.I. A.N. Tupolev, Senior Lecturer, Department of Industrial and Environmental Safety. Kazan, Russia. SPIN-scientific: 2870-8044.

**Arefyeva Elena V.:** ScD (Technical Sc.), Associate Professor, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Chief researcher, Research Center. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 2738-6323.