УДК 550.34

DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.126-138

В. А. Минаев¹, А. О. Фаддеев², Т. Р. Ахметшин³, Т. М. Невдах² (¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, ²Академия ФСИН России, ³Уфимский государственный нефтяной технический университет; e-mail: m1va@yandex.ru)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ НА БАЗЕ НЕЧЁТКИХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрена нечёткая модель оценки геодинамического риска в литосфере. Впервые обоснована и построена база эвристических правил для введения термов лингвистических переменных, связанных с температурой, вязкостью геологической среды, скоростью тектонических движений земной поверхности, а также состоянием геологической среды как выходной переменной. Подтверждением адекватности модели является хорошее согласование эпицентров произошедших землетрясений с участками территорий Земли со значениями геодинамического риска 0,85-0,95, что даёт возможность прогнозировать геодинамическую устойчивость территорий.

Ключевые слова: нечёткая модель, геодеформация, риск, литосфера, устойчивость.

Введение

Вопрос о нечёткой оценке возникает всякий раз, когда в различных задачах имеется значимая неопределённость, связанная с недостаточностью (или с полным отсутствием) информации о характере, особенностях или численных значениях характеристик исследуемых процессов. Указанная проблема весьма ярко проявляется в задачах, связанных с исследованиями в области геодинамики и численной оценки геодинамического риска [1-5].

Действительно, что именно происходит в недрах нашей планеты, какие процессы и с какой интенсивностью они протекают в разных по своему геологическому строению средах и на различных глубинах, доподлинно неизвестно. Даже околоземное космическое пространство сейчас изучено гораздо лучше, чем земная кора на глубинах более $10 \ \kappa M$.

А между тем, прогнозная информация о геодинамических опасностях весьма необходима для решения стратегических и оперативно-тактических задач, постоянно возникающих в деятельности служб МЧС России и других служб, действующих в экстремальных условиях.

Прибегнем в решении задач оценки опасных геодеформационных процессов в литосфере Земли к технологии нечёткого описания процессов или явлений, происходящих в её недрах, основываясь на методе прямого нечёткого вывода.

Эвристические правила оценки

Определимся для начала с описанием термов лингвистических переменных. При этом, как и в работах, посвящённых нечёткой оценке геодинамического риска [6, 7], будем полагать, что нотации термов соответствуют определённому состоянию литосферы в пределах элементарного объёма геологической среды. Определим следующие 10 состояний геологической среды (табл. 1).

Таблица 1

Состояния геологической среды

Nº	Определение состояния
1	Устойчивое состояние
2	Квазиустойчивое состояние
3	Слабо неустойчивое состояние
4	Неустойчивое состояние
5	Сильно неустойчивое состояние
6	Опасное состояние
7	Высоко опасное состояние
8	Экстремальное состояние
9	Высоко экстремальное состояние
10	Катастрофическое состояние

Далее, на основании известных из научной литературы [8-10] связях между определёнными состояниями геологической среды и её физическими характеристиками (температурой, вязкостью, скоростью тектонических движений), сформулируем в виде эвристических правил базу эмпирических знаний о предметной области нашего исследования — оценке геодинамического риска литосферного пространства в пределах отдельного элементарного объёма геологической среды.

Эта база знаний представляет собой следующую совокупность эвристических правил (табл. 2).

Таблица 2

Эвристические правила оценки

No	Формулировка правила
1	2
1	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды очень низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состоя-
	ние геологической среды является катастрофическим
2	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды очень низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние
	геологической среды является высоко экстремальным
3	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды очень низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то со-
	стояние геологической среды является экстремальным
4	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние
	геологической среды является высоко экстремальным
5	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологи-
	ческой среды является экстремальным
6	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
	геологической среды является высоко опасным
7	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды средняя, а скорости тектонических движений значительны, то состояние
	геологической среды является экстремальным

Продолжение табл. 2

4	
1	2
8	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды средняя, а скорости тектонических движений средние, то состояние геоло-
	гической среды является высоко опасным
9	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды средняя, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
	геологической среды является опасным
10	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние
	геологической среды является высоко опасным
11	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геоло-
	гической среды является опасным
12	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
	геологической среды является сильно неустойчивым
13	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
	ской среды очень высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состо-
	яние геологической среды является опасным
14	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
1 '	ской среды очень высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние
	геологической среды является сильно неустойчивым
15	Если температура геологической среды очень высокая, вязкость вещества геологиче-
13	ской среды очень высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то со-
	стояние геологической среды является неустойчивым
16	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
10	ды очень низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние гео-
	логической среды является высоко экстремальным
17	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
1 /	ды очень низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологиче-
	ской среды является экстремальным
18	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
10	ды очень низкая, и скорости тектонических движений незначительны, то состояние
19	геологической среды является высоко опасным
19	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической среды
	ды низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
20	ской среды является экстремальным
20	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре
	ды низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
0.1	среды является высоко опасным
21	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологи-
0.0	ческой среды является опасным
22	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды средняя, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
	ской среды является высоко опасным
23	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды средняя, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
	среды является опасным

Продолжение табл. 2

1	продолжение таол. 2
24	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
24	
	ды средняя, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологи-
25	ческой среды является сильно неустойчивым
25	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
2.5	ской среды является опасным
26	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
	среды является сильно неустойчивым
27	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геоло-
•	гической среды является неустойчивым
28	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние гео-
20	логической среды является сильно неустойчивым
29	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологи-
2.0	ческой среды является неустойчивым
30	Если температура геологической среды высокая, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
2.1	геологической среды является слабо неустойчивым
31	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние гео-
	логической среды является экстремальным
32	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологиче-
22	ской среды является высоко опасным
33	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
24	геологической среды является опасным
34	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
25	ской среды является высоко опасным
35	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
26	среды является опасным
36	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологи-
27	ческой среды является сильно неустойчивым
37	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды средняя, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
20	ской среды является опасным
38	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды средняя, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
20	среды является сильно неустойчивым
39	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды средняя, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологи-
	ческой среды является неустойчивым

Продолжение табл. 2

4	продолжение таол. 2
40	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
40	ды высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
	ской среды является сильно неустойчивым
41	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
41	ды высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
	среды является неустойчивым
42	- 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1
42	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологической среды является слабо неустойчивым
42	·
43	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние гео-
4.4	логической среды является неустойчивым
44	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологи-
4.5	ческой среды является слабо неустойчивым
45	Если температура геологической среды средняя, вязкость вещества геологической сре-
	ды очень высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние
4.5	геологической среды является квазиустойчивым
46	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологи-
	ческой среды является высоко опасным
47	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологиче-
40	ской среды является опасным
48	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геоло-
10	гической среды является сильно неустойчивым
49	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	низкая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологической
50	среды является опасным
50	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	низкая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической сре-
~ 1	ды является сильно неустойчивым.
51	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	низкая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологиче-
F 0	ской среды является неустойчивым
52	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	средняя, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологической
	среды является сильно неустойчивым
53	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	средняя, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической сре-
	ды является неустойчивым

Окончание табл. 2

1	2
54	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	средняя, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологиче-
	ской среды является слабо неустойчивым
55	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геологиче-
	ской среды является неустойчивым
56	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологической
	среды является слабо неустойчивым
57	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние геологиче-
	ской среды является квазиустойчивым
58	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень высокая, а скорости тектонических движений значительны, то состояние геоло-
	гической среды является слабо неустойчивым
59	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень высокая, а скорости тектонических движений средние, то состояние геологиче-
	ской среды является квазиустойчивым
60	Если температура геологической среды низкая, вязкость вещества геологической среды
	очень высокая, а скорости тектонических движений незначительны, то состояние гео-
	логической среды является устойчивым

Приведённые выше 60 условий используем для построения базы правил системы нечёткого вывода, позволяющей реализовать модель нечёткой оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов.

Определим входные и выходные лингвистические переменные (ЛП). В качестве первой входной лингвистической переменной (ЛП1) будем использовать β_1 — "температура геологической среды"; в качестве второй входной лингвистической переменной (ЛП2) β_2 — "вязкость вещества геологической среды"; в качестве третьей (ЛП3) β_3 — "скорости тектонических движений".

В качестве выходной лингвистической переменной будем использовать характеристику устойчивости геологической среды β_4 — "состояние геологической среды". Для сокращения записи правил используем следующие сокращения, англоязычная и русскоязычная нотации которых модифицированы авторами в приложении к решению задачи оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов (табл. 3).

В таком случае система нечётких продукций имеет следующий вид (табл. 4).

Таблица 3

Обозначения термов лингвистических переменных

N₂	Символическое	Англоязычная	Русскоязычная
745	обозначение	нотация	нотация
1	CS	Catastrophic State	Катастрофическое состояние
2	HEC	Highly Extreme Condition	Высоко экстремальное состояние
3	ES	Extreme State	Экстремальное состояние
4	HDC	Highly Dangerous Condition	Высоко опасное состояние
5	DC	Dangerous Condition	Опасное состояние
6	HUS	Highly Unstable State	Сильно неустойчивое состояние
7	US	Unstable State	Неустойчивое состояние
8	WUS	Weakly Unstable State	Слабо неустойчивое состояние
9	QSS	Quasi-Stable State	Квазиустойчивое состояние
10	SS	Steady State	Устойчивое состояние
11	VH	Very High	Очень высокое
12	Н	High	Высокое
13	MD	Middle	Среднее
14	L	Low	Низкое
15	VL	Very Low	Очень низкое
16	S	Significant	Значительны
17	A	Average	Средние
18	M	Minor	Незначительны

Таблица 4

Система нечётких продукций

Номер продукции	Формулировка продукции
1	2
1	ЕСЛИ "β ₁ есть VH" и "β ₂ есть VL" и "β ₃ есть S" TO "β ₄ есть CS"
2	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть НЕС"
3	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть ES"
4	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть L" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть НЕС"
5	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть L" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть ES"
6	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть L" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть HDC"
7	ЕСЛИ "β ₁ есть VH" и "β ₂ есть MD" и "β ₃ есть S" TO "β ₄ есть ES"
8	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть HDC"
9	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть DC"
10	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть H" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть HDC"
11	ЕСЛИ "β ₁ есть VH" и "β ₂ есть H" и "β ₃ есть A" TO "β ₄ есть DC"
12	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть H" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть HUS"
13	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть DC"
14	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть HUS"
15	ЕСЛИ " β_1 есть VH" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть US"
16	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть HEC"
17	ЕСЛИ "β ₁ есть H" и "β ₂ есть VL" и "β ₃ есть A" TO "β ₄ есть ES"
18	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть HDC"
19	ЕСЛИ "β ₁ есть H" и "β ₂ есть L" и "β ₃ есть S" ТО "β ₄ есть ES"
20	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть L" и "β ₃ есть А" ТО "β ₄ есть НDС"

Окончание табл. 4

1	Окончание таол. 4 2
21	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть L" и "β ₃ есть М" ТО "β ₄ есть DC"
22	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть HDC"
23	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть МD" и "β ₃ есть А" ТО "β ₄ есть DC"
24	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть HUS"
25	ЕСЛИ "β ₁ есть H" и "β ₂ есть H" и "β ₃ есть S" ТО "β ₄ есть DC"
26	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть H" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть HUS"
27	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть Н" и "β ₃ есть М" ТО "β ₄ есть US"
28	ЕСЛИ " β_1 есть H" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть HUS"
29	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть VH" и "β ₃ есть А" ТО "β ₄ есть US"
30	ЕСЛИ "β ₁ есть Н" и "β ₂ есть VH" и "β ₃ есть М" ТО "β ₄ есть WUS"
31	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть ES"
32	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть HDC"
33	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть DC"
34	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть L" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть HDC"
35	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть L" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть DC"
36	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть L" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть HUS"
37	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть DC"
38	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть HUS"
39	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть US"
40	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть H" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть HUS"
41	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть H" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть US"
42	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть H" и " β_3 есть M" TO " β_4 есть WUS"
43	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть US"
44	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть WUS"
45	ЕСЛИ " β_1 есть MD" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть M" ТО " β_4 есть QSS"
46	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть HDC"
47	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть DC"
48	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть VL" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть HUS"
49	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть L" и " β_3 есть S" ТО " β_4 есть DC"
50	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть L" и " β_3 есть A" ТО " β_4 есть HUS"
51	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть L" и "β ₃ есть М" ТО "β ₄ есть US"
52	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть S" TO " β_4 есть HUS"
53	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть MD" и " β_3 есть A" TO " β_4 есть US"
54	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть MD" и "β ₃ есть М" TO "β ₄ есть WUS"
55	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть H" и "β ₃ есть S" TO "β ₄ есть US"
56	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть H" и "β ₃ есть A" ТО "β ₄ есть WUS"
57	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть H" и "β ₃ есть M" ТО "β ₄ есть QSS"
58	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть VH" и "β ₃ есть S" ТО "β ₄ есть WUS"
59	ЕСЛИ "β ₁ есть L" и "β ₂ есть VH" и "β ₃ есть A" ТО "β ₄ есть QSS"
60	ЕСЛИ " β_1 есть L" и " β_2 есть VH" и " β_3 есть М" ТО " β_4 есть SS"

Математическая модель оценки на базе правил прямого нечёткого вывода

В качестве терм-множества входной ЛП1 β_1 ("температура геологической среды") будем использовать множество $G_1 = \{$ "очень высокая", "высокая", "средняя", "низкая"} или в символическом виде $T_1 = \{VH, H, MD, L\}$. В качестве терм-множества входной ЛП2 β_2 ("вязкость вещества геологической среды") воспользуемся множеством $G_2 = \{$ "очень низкая", "низкая", "средняя", "высокая", "очень высокая" или в символическом виде $T_2 = \{VL, L, MD, H, MD, H, MD, H\}$ VH $\}$. В качестве терм-множества входной ЛПЗ β_3 ("скорости тектонических движений") применим множество $G_3 = \{$ "значительны", "средние", "незначительны"} или в символическом виде $T_3 = \{S, A, M\}$. И, наконец, в качестве терм-множества выходной ЛП β_4 ("состояние геологической среды") будем использовать множество $G_4 = \{$ "катастрофическое состояние", "высоко экстремальное состояние", "экстремальное состояние", "высоко опасное состояние", "опасное состояние", "сильно неустойчивое состояние", "неустойчивое состояние", "слабо неустойчивое состояние", "квазиустойчивое состояние", "устойчи-US, WUS, QSS, SS}.

Для задания функций принадлежности для терм-множеств ЛП используем относительные шкалы значений. В такой шкале "0" соответствует минимальному значению соответствующей характеристики геологической среды, а "1" — её максимальному значению. Основываясь на этих соображениях, представлены функции принадлежности лингвистических переменных для множеств G_1 , G_2 , G_3 u G_4 .

В качестве величин температуры геологической среды литосферы приняты значения, рассчитанные по авторским математическим моделям термического режима континентальной и океанической литосферы [8, 9]. То же самое можно сказать о вязкости вещества геологической среды и скорости тектонических движений, величины которых также определяются в соответствии с моделями разработанными авторами [10].

Для количественной реализации модели нечёткой оценки риска проявления опасных эндогенных геологических процессов на платформенных территориях в качестве алгоритма вывода использовался алгоритм Мамдани [11].

Обсуждение результатов моделирования

Кратко проанализируем полученные результаты. На рис. 1 представлено эквипотенциальное распределение значений геодинамического риска, полученного по результатам нечёткого моделирования для глубинного уровня $10\ \kappa M$.

Из рис. 1 следует, что эпицентры уже произошедших землетрясений территориально располагаются на участках, оконтуренными изолиниями геодинамического риска со значениями 0,85-0,95. Величина геодинамического риска является количественным показателем динамики современных литосферных геодеформационных процессов.

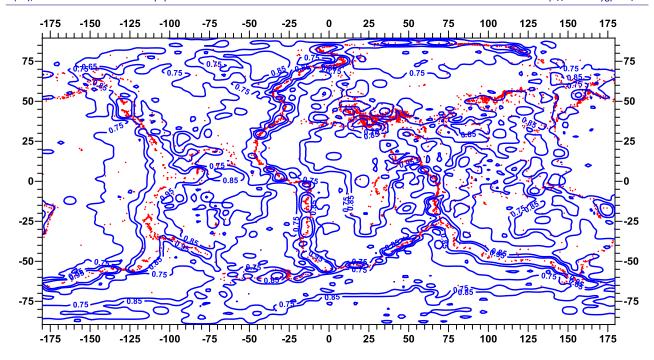


Рис. 1. Карта эквипотенциального распределения значений геодинамического риска на Земле, полученных по результатам нечёткой оценки современных литосферных геодеформационных процессов (красными точками на карте изображены эпицентры произошедших землетрясений)

Это характерно не только для акваторий Тихого, Атлантического, Индийского и Северного Ледовитого океанов, но и для Северной и Южной Америк, а также для Средиземноморья, Малой Азии, Средней Азии и Юго-Восточной Азии.

Отметим, что отсутствие эпицентров землетрясений в районе Антарктиды, при наличии в пределах этого континента и его окрестностях изолиний со значениями геодинамического риска 0,75-0,85 говорит о том, что существуют и неучтённые факторы в предлагаемой нечёткой модели. При этом следует подчеркнуть, что отсутствие землетрясений в Антарктиде обсуждается учеными геофизиками в весьма дискуссионном ключе.

Важным положительным результатом предложенного в работе подхода к оценке динамики современных литосферных геодеформационных процессов является то, что при его реализации авторы не прибегали к различным предположениям, допущениям, свойственным предложенным другими авторами детерминированных и вероятностных моделей [12-15].

Вся информация, необходимая для построения модели нечёткой оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов, получена на основе либо достоверных приборных исследований (например, скорости современных тектонических движений на поверхности земной коры), либо на основе количественных оценок, выполненных с помощью хорошо апробированных математических моделей и методов.

Таким образом, в статье предложена новая модель нечёткой оценки современных литосферных геодеформационных процессов, реализующаяся в условиях неопределенности о физических характеристиках геологической среды. Показано, что модель, базирующаяся на прямом нечётком выводе и алгоритме Мамдани, позволяет на основе совместного анализа термического режима литосферы и вязкостных свойств вещества геологической среды на различных глубинных уровнях, а также особенностей распределения величин современных тектонических движений на поверхности земной коры, выполнить количественные оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов в виде значений геодинамического риска, что, в свою очередь, даёт возможность производить прогнозную оценку геодинамической устойчивости конкретной территории, необходимую для целенаправленных предупредительных мероприятий по линии чрезвычайных служб.

Выводы

- 1. Впервые сформирована база правил прямого нечёткого вывода для построения математической модели оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов в условиях неопределённости информации о характеристиках геосреды.
- 2. Входные лингвистические переменные для глобальных оценок целесообразно определять на основе данных о температуре геологической среды литосферы, вязкости её вещества, а также информации о скоростях современных тектонических движений на поверхности земной коры. В качестве выходной лингвистической переменной необходимо использовать характеристику "состояние геологической среды".
- 3. Модель, базирующаяся на прямом нечётком выводе и алгоритме Мамдани, позволяет на основе совместного анализа термического режима литосферы и вязкостных свойств вещества геологической среды на различных глубинных уровнях, а также особенностей распределения величин современных тектонических движений на поверхности земной коры, выполнить количественные оценки динамики современных литосферных геодеформационных процессов в виде значений геодинамического риска, что даёт возможность произвести прогнозную оценку геодинамической устойчивости конкретной территории, в том числе в интересах решения задач по линии МЧС России.

Литература

- 1. Абрамова А. В., Бондарь К. М., Данилов Р. М., Минаев В. А., Павлова С. А., Попов А. Н., Фаддеев А. О. Моделирование геодинамических рисков в чрезвычайных ситуациях: монография. Хабаровск: ДВЮИ МВД России, 2014. 124 с.
- 2. *Минаев В. А.*, *Фаддеев А. О.*, *Абрамова А. В.*, *Павлова С. А.* Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
- $3.\,M$ инаев $B.\,A.,\,\Phi$ аддеев $A.\,O.\,$ Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
- 4. *Минаев В. А.*, *Фаддеев А. О.*, *Кузьменко Н. А.* Моделирование и оценка геодинамических рисков. М.: "РТСофт" "Космоскоп", 2017. 256 с.
- 5. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика: учеб. пос. для геофизических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: изд-во КамГу им. Витуса Беринга, 2008. 463 с.
- 6. Беллман P., $3ade\ \mathcal{J}$. Принятие решений в расплывчатых условиях // В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 172-215.
- 7. Демидова Л. А., Крачковский В. В., Пылькин А. Н. Принятие решений в условиях неопределённости. М.: Горячая линия Телеком, 2012. 288 с.
 - 8. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- 9. *Хаин В. Е.*, *Ломизе М. Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- 10. Уломов В. И., Шумилина Л. С. Долгосрочный прогноз сейсмической опасности на территории Северной Евразии // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду. Т. 2. Сейсмичность. М.: Региональная общественная организация учёных по проблемам прикладной геофизики, 2002. С. 319-380.
- 11. *Jang J. S.* ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 1993. Vol. 23. Pp. 665-685.
 - 12. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир, 1985. 730 с.
- 13. *Maslov I. A.*, *Faddeev A. O.* Physical and Mathematical Modeling of Geodynamics Processes // Physics of Viabration. 2002. Vol. 10. No 2. Pp. 100-115.
 - 14. CRUST 1.0. https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html.
- 15. Сеначин В. Н., Баранов А. А. Гравитационные аномалии коры и верхней мантии Центральной и Южной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Вып. 7 (4). С. 513-528. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0220.

Материал поступил в редакцию 23 августа 2018 г.

Для цитирования: *Минаев В. А., Фаддеев А. О., Ахметшин Т. Р., Невдах Т. М.* Методика оценки динамики опасных геодеформационных процессов в литосфере на базе нечётких моделей // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 1 (83). – 2019. – С. 126-138. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.126-138.

V. A. Minaev, A. O. Faddeev, T. R. Akhmetshin, T. M. Nevdakh METHOD OF ASSESSMENT DANGEROUS GEODEFORMATION PROCESSES DYNAMICS IN THE LITHOSPHERE ON THE BASIS OF FUZZY MODELS

The fuzzy model of geodynamic risk assessment in the lithosphere is considered. The database of fuzzy rules, which takes into account 10 states of the geological environment and 60 heuristic rules for the introduction of linguistic variables terms for temperature, viscosity of the geological environment, the speed of tectonic movements of the earth's surface as input variables, as well as the state of the geological environment as an output variable is justified and built. Fuzzy direct output products implemented in the Mamdani algorithm are constructed. Using the fuzzy model, the equipotential distribution of the geodynamic risk values for the depth level of 10 km is calculated. The adequacy of the model is confirmed by the good agreement of the epicenters of the earthquakes with the areas of the Earth's territories with the calculated values of the geodynamic risk of 0,85-0,95, which make it possible to predict the geodynamic stability of the territories, including in the interests of solving problems under the Ministry of emergency situations of Russia.

Key words: fuzzy model, geodeformation, risk, lithosphere, stability.

References

- 1. Abramova A. V., Bondar K. M., Danilov R. M., Minaev V. A., Pavlova S. A., Popov A. N., Faddeev A. O. *Modelirovanie geodinamicheskih riskov v chrezvychajnyh situaciyah: monografiya* [Simulation of geodynamic risks in emergency situations: monograph]. Khabarovsk, Far Eastern Legal Institute of the ministry of Internal Affairs of the Russian Federation Publ., 2014, 124 p.
- 2. Minaev V. A., Faddeev A. O., Abramova A. V., Pavlova S. A. *Matematicheskoe modeli-rovanie sejsmicheskih riskov* [Mathematical modeling of seismic risks]. *Spectekhnika i svyaz / Special equipment and communication*, 2013, no 5, pp. 58-63.
- 3. Minaev V. A., Faddeev A.O. *Ocenki geoehkologicheskih riskov. Modelirovanie bezopasnosti turistsko-rekreacionnyh territorij* [Estimates of geo-environmental risks. Security modeling of tourist and recreational areas]. Moscow, Finansy i statistika Publ., Izd. dom INFRA-M Publ., 2009, 370 p.
- 4. Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuzmenko N. A. *Modelirovanie i ocenka geodinamicheskih riskov* [Simulation and assessment of geodynamic risks], Moscow, "RTSoft" "Kosmoskop" Publ., 2017, 256 p.
- 5. Vikulin A. V. *Fizika Zemli i geodinamika: ucheb. pos. dlja geofizicheskih special'nostej vuzov* [Earth Physics and Geodynamics: study guide for geophysical specialties universities]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Vitus Bering Kamchatka State University Publ., 2008, 463 p.
- 6. Bellman R., Zade L. *Prinyatie reshenij v rasplyvchatyh usloviyah* [Decision making in vague terms]. *V kn.: Voprosy analiza i procedury prinyatiya reshenij* [In the book: Issues of analysis and decision-making procedures], Moscow, Mir Publ., 1976, pp. 172-215.
- 7. Demidova L. A., Kirakovskij V. V., Pylkin A. N. *Prinyatie reshenij v usloviyah neopredelennosti* [Decision making under uncertainty]. Moscow, Goryachaya liniya Telekom Publ., 2012, 288 p.
 - 8. Gzovskij M. V. Osnovy tektonofiziki [Basics of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 536 p.
- 9. Hain V. E., Lomize M. G. *Geotektonika s osnovami geodinamiki* [Geotectonics with geodynamics basics]. Moscow, Moskovskij Universitet Publ., 2005, 560 p.
- 10. Ulomov V. I., Shumilina L. S. *Dolgosrochnyj prognoz sejsmicheskoj opasnosti na territorii Severnoj Evrazii* [Long-term seismic hazard forecast in Northern Eurasia]. *Katastroficheskie processy i ih vliyanie na prirodnuyu sredu. Tom 2. Sejsmichnost* [Catastrophic processes and their impact on the environment. Vol. 2. Seismicity.], Moscow, Regional public organization of scientists on applied geophysics Publ., 2002, pp. 319-380.
- 11. Jang J. S. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, 1993, vol. 23, pp. 665-685.
 - 12. Terkot D., Shubert Dzh. Geodinamika [Geodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1985, 730 p.
- 13. Maslov I. A., Faddeev A. O. Physical and Mathematical Modeling of Geodynamics Processes. *Physics of Viabration*, 2002, vol. 10, no 2, pp. 100-115.
 - 14. CRUST 1.0. Available at: https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html.
- 15. Senachin V. N., Baranov A. A. Gravity Anomalies of the Crust and Upper Mantle for Central and South Asia. Geodinamika i tektonofizika / Geodynamics & Tectonophysics, 2016, vol. 7 (4), pp. 513-528. DOI: 10.5800/GT-2016-7-4-0220 (in Russian).

For citation: Minaev V. A., Faddeev A. O., Akhmetshin T. R., Nevdakh T. M. Method of assessment dangerous geodeformation processes dynamics in the lithosphere on the basis of fuzzy models. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 1 (83), 2019, pp. 126-138 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.126-138.