

УДК 550.341

© Коллектив авторов

Б.А. Дзедобоев, Р.И. Красноперов, И.О. Белов, Ю.В. Барыкина, Е.В. Вавилин

МОДИФИЦИРОВАННАЯ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА FCAZ_m И ЗОНЫ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭПИЦЕНТРОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАЛИФОРНИИ

Введение

Большая часть территории Соединенных Штатов Америки подвержена опасности возникновения землетрясений. Сейсмическая опасность в США сильно различается по всей стране. Наиболее сейсмически опасной является западная часть Соединенных Штатов, в особенности Калифорния. Согласно опубликованному 14 апреля 2008 г. докладу [26], вероятность возникновения в Калифорнии землетрясения с магнитудой $M \geq 6.7$ в последующие 30 лет равна 99% [19, 26, 29]. Поэтому проведение распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии является одной из наиболее актуальных научных задач для этого региона с большим количеством населения и развитой инфраструктурой.

В 1976 г. советско-американской группой ученых было выполнено распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных ($M \geq 6\frac{1}{2}$) землетрясений в Калифорнии классическим методом EPA [8, 14, 16]. В качестве объектов распознавания использовались пересечения морфоструктурных линеаментов [2, 18]. Расположение эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$, произошедших в течение прошедших с момента публикации работы [14] десятилетий, внутри распознанных EPA-зон дают серьезные аргументы в пользу достоверности результата работы [14].

В работах [6, 20] распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных ($M \geq 6\frac{1}{2}$) землетрясений в Калифорнии было проведено с помощью кластеризационного алгоритма DPS (Discrete Perfect Sets) [17]. Здесь в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из двух каталогов: каталога Центра данных о землетрясениях Северной Калифорнии (NCEDC) и каталога Центра данных по землетрясениям в Южной Калифорнии (SCEDC). Алгоритм объективной классификации DPS является частью созданного в Геофизическом центре РАН оригинального подхода

к анализу дискретных данных под общим названием «Дискретный математический анализ» (ДМА) [1, 3, 4, 5, 7, 13]. Позднее создание алгоритма E²XТ [11] позволило авторам говорить о разработке алгоритмической системы FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [9, 11], позволяющей проводить распознавание высокосейсмичных территорий методом, отличным от классического подхода EPA [8, 14, 16]. Описание системы FCAZ приведено в работе [11]. В работе [15] система FCAZ использовалась для распознавания мест возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из каталога ANSS [22]. В 2016 г. система FCAZ была модифицирована путем создания блоков искусственного интеллекта в структуре алгоритмов DPS и E²XТ. Модифицированная версия системы получила название FCAZ_m [10, 12].

Целью настоящей работы является проведение распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных ($M \geq 6\frac{1}{2}$) землетрясений в Калифорнии с помощью алгоритмической системы FCAZ_m, обоснование достоверности распознанных зон, в том числе путем их сравнения с зонами, ранее полученными системой FCAZ и методом EPA.

Сильные землетрясения и объекты распознавания в Калифорнии

В работе использовался каталог ANSS землетрясений в Калифорнии в пределах $31\div 42^\circ$ с.ш., $114\div 126^\circ$ з.д. в интервале времени 01.01.1960 – 31.12.2012 гг. [22].

Каталог сильных ($M \geq 6\frac{1}{2}$) землетрясений в Калифорнии был сформирован на основе каталога землетрясений, используемых для обучения алгоритма «Подклассы» при распознавании в Калифорнии методом EPA [14], и рассматриваемого каталога ANSS (табл. 1). Распознавание мест возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии, выполненное методом EPA, было

Таблица 1
Каталог сильных ($M \geq 6\frac{1}{2}$) землетрясений
в Калифорнии

Catalog of strong ($M \geq 6\frac{1}{2}$) earthquakes in California

№	Дата	Широта	Долгота	M
1.	1836	37.50	121.90	>7
2.	1836	37.70	122.10	>7
3.	1836	37.80	122.30	>7
4.	1857	34.70	118.80	>7
5.	18.04.1906	38.25	122.95	8.25
6.	01.07.1911	37.25	121.75	6.6
7.	21.04.1918	33.75	117.00	6.8
8.	10.03.1922	35.75	120.25	6.5
9.	22.01.1923	40.50	124.50	7.2
10.	30.12.1934	32.25	115.50	6.5
11.	31.12.1934	32.00	114.75	7.0
12.	19.05.1940	32.70	115.50	6.7
13.	21.10.1942	33.00	116.00	6.5
14.	04.12.1948	33.90	116.40	6.5
15.	09.04.1968	33.40	116.20	6.9
16.	09.02.1971	34.42	118.37	6.6
17.	26.11.1976	41.29	125.71	6.8
18.	08.11.1980	41.08	124.62	7.2
19.	02.05.1983	36.23	120.31	6.7
20.	10.09.1984	40.50	125.13	6.6
21.	24.11.1987	33.02	115.85	6.6
22.	18.10.1989	37.04	121.88	7.0
23.	25.04.1992	40.34	124.23	6.7
24.	26.04.1992	40.38	124.56	6.6
25.	28.06.1992	34.20	116.44	7.3
26.	17.01.1994	34.21	118.54	6.7
27.	01.09.1994	40.40	125.68	7.0
28.	19.02.1995	40.56	125.54	6.8
29.	16.10.1999	34.59	116.27	7.1
30.	22.12.2003	35.70	121.10	6.5
31.	15.06.2005	41.29	125.95	7.2
32.	10.01.2010	40.65	124.69	6.5
33.	04.04.2010	32.29	115.30	7.2

опубликовано в 1976 г. [14]. С момента публикации в Калифорнии произошел целый ряд новых сильных землетрясений. Их эпицентры хорошо согласуются с результатами распознавания в работе [14].

Сформированный каталог содержит 33 сильных землетрясения в Калифорнии (табл. 1). Первое из них произошло в 1836 г., а последнее 4 апреля 2010 г. Тем самым, сформированный каталог содержит все землетрясения с $M \geq 6\frac{1}{2}$ за 177 лет на рассматриваемой нами территории.

Для того чтобы выбрать нижний порог магнитуды землетрясений, начиная с которого эпицентры будут использоваться в качестве объектов распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) рассматриваемого каталога.

В ряде работ проведено картирование M_c в Калифорнии. Так, в работе [27] построена карта пространственного распределения M_c в Калифорнии по каталогу CNSS. Авторами использовались сейсмические события с января 1995 г. по май 1999 г. Карта строилась в узлах сетки, расположенных на расстоянии 10 км друг от друга, по 250 самым близким к ним землетрясениям. Для оценки M_c в узлах сетки использовался алгоритм GFT [23, 27]. Согласно результатам работы [27], M_c в рассматриваемый период составляет 1.2 ± 0.4 в большинстве районов Калифорнии. В прибрежной зоне $M_c \approx 2.0 \pm 0.2$. На большей части системы разломов Сан-Андреас (к западу от Великой Долины) $M_c < 1.6$. Увеличение M_c до ~ 2.0 наблюдается на границе между северной и южной сетями сейсмологических наблюдений Калифорнии.

В работе [21] показана карта пространственного распределения M_c в Калифорнии, а также ее сглаженный вариант. Для построения карты использовался каталог CNSS за период: январь 1981 г. – август 2010 г. Согласно сглаженному варианту карты в рассматриваемый авторами промежуток времени на территории Калифорнии и в прибрежной зоне $M_c = 2.0-2.5$. Незначительные по размерам участки с $M_c = 2.5-3.0$ наблюдаются у северной и южной границ Калифорнии, а также в прибрежной зоне к западу от Санта-Барбары.

Для оценки значения M_c рассматриваемого каталога [22] был использован программный продукт ZMAP и входящие в него функции [28]. Вначале каталог был декластеризован по методике Резенберга [24]. После чего для оценки значения M_c нами был использован входящий в ZMAP алгоритм MBS с критерием из [25]. Оказалось, что $M_c = 2.9$. Из работы [23] известно, что в большинстве случаев метод MBS дает верхнюю границу для M_c . Но учитывая результаты работы [21], где рассматривался каталог начиная с 1981 г., полученное значение $M_c = 2.9$ мы считаем удовлетворительным. Таким образом, было принято решение в Калифорнии использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$.

Места возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии

Модификация алгоритма DPS до DPSm заключается в разработке блока искусственного интеллекта, позволяющего автоматизировать выбор

свободного параметра β (уровень максимальности плотности распознаваемых кластеров эпицентров землетрясений) [10]. Было выполнено 3 итерации DPSm-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$ в Калифорнии. На рис. 1 показаны распознанные DPSm-кластеры. Вычисленные оптимальные значения параметра β на итерациях имели следующие значения: $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = -0.1$, $\beta_3 = -0.1$.

К распознанным DPSm-кластерам был применен модифицированный алгоритм E²X^Tm. Оптимальные значения входных параметров алгоритма подбирались автоматически с помощью блока искусственного интеллекта [10]. Полученные FCAZm-зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений в Калифорнии показаны на рис. 1. Так как внутрь распознанных зон попадает 28 из 33 землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ (табл. 1), то с достаточно большой степенью достоверности мы можем интерпретировать полученные FCAZm-зоны как зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии.

Как видно из рис. 1, в Калифорнии распознанные FCAZm-зоны достаточно хорошо согласуются с расположением эпицентров исторических и инструментальных землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ (табл. 1). Эпицентры практически всех сильных землетрясений региона попадают внутрь зон или находятся на достаточно близком расстоянии от них (по сути, располагаются на границе зон).

Из 33 рассматриваемых сильных землетрясений эпицентры только 5 (15%) не попали в распознанные зоны. При этом надо заметить, что три эпицентра (№ 17, 18 и 31 в табл. 1), расположенные на северо-западе региона (рис. 1), находятся в акватории Тихого Океана на достаточно большом (особенно № 17 и 31) расстоянии от берега. Так же во FCAZm-зоны не попали два эпицентра исторических землетрясений. Это землетрясение у Форт-Техона, произошедшее в 1857 г. (№ 4 в табл. 1) с $M > 7.0$, и землетрясение в Сан-Франциско 18 апреля 1906 г. (№ 5 в табл. 1) с $M = 8.25$. Эти землетрясения произошли задолго до начала инструментальных

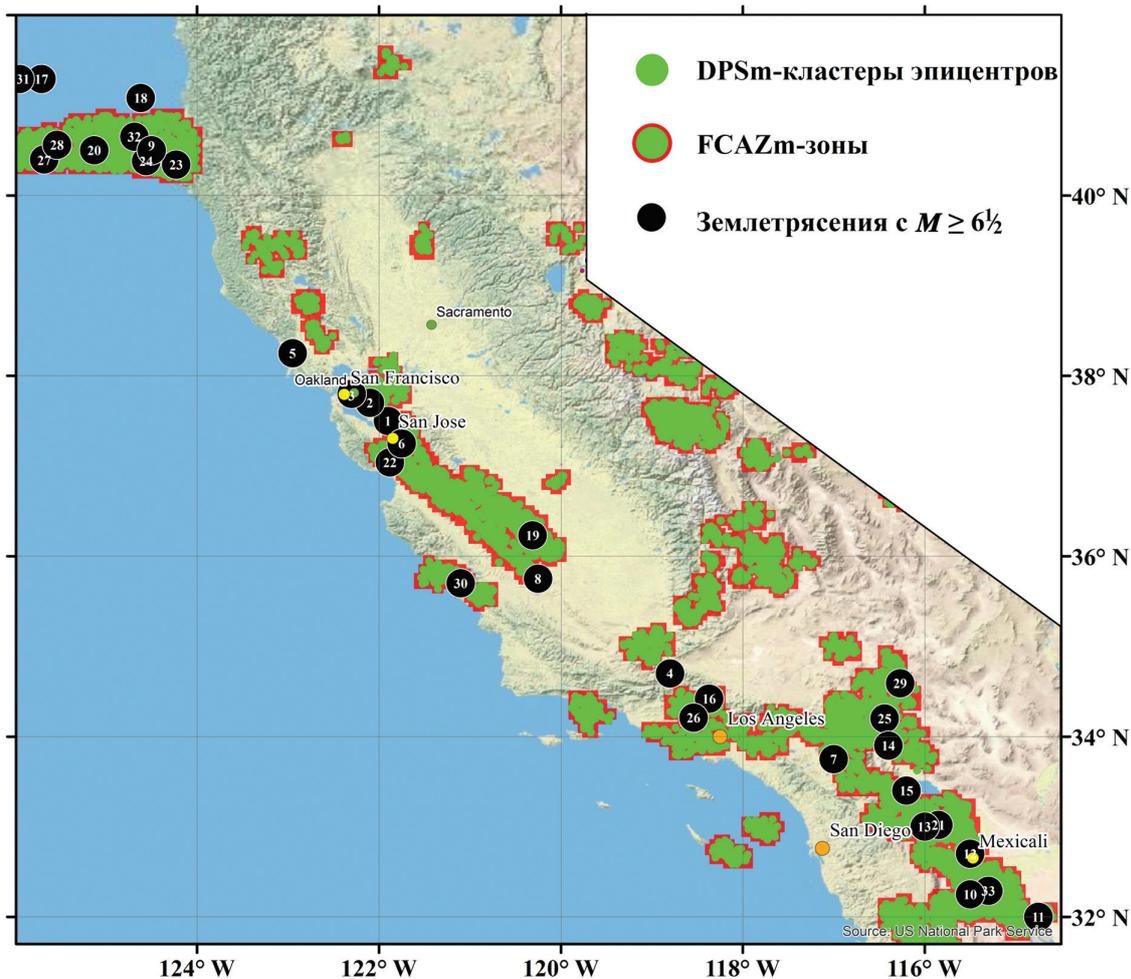


Рис. 1. Зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии, распознанные системой FCAZm, и эпицентры землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$

Fig. 1. Earthquake-prone areas with $M \geq 6\frac{1}{2}$ in California, recognized by FCAZm system, and earthquake epicenters with $M \geq 6\frac{1}{2}$

наблюдений за сейсмичностью Калифорнии. Поэтому мы не имеем достаточного числа объектов (эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$) для их распознавания. Таким образом, если исключить из рассмотрения перечисленные землетрясения, то мы приходим к тому, что, по сути, в выполненном для Калифорнии распознавании мест возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ отсутствуют ошибки типа «пропуск цели».

Обоснование достоверности FCAZm-распознавания

Аналогично предыдущим работам авторов [9, 10, 11, 15, 20], для обоснования достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии были проведены контрольные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Подробное описание экспериментов приведено в работе [10]. Здесь же мы остановимся только на описании результатов экспериментов.

Эксперименту «индивидуальная сейсмическая история» подверглись 9 землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ (№ 23(24) ÷ 30, 32, 33, табл. 1). При распознавании в эксперименте использовался единый для всех 9 случаев набор значений свободных параметров алгоритмов DPS и E²XТ. Были взяты те же значения свободных параметров, что и при обработке всего каталога. Результаты эксперимента показали, что в Калифорнии пространственное распределение распознанных в девяти экспериментах высокосейсмичных FCAZm-зон хотя и различно, но подобно. При этом подвергнутые эксперименту землетрясения с $M \geq 6\frac{1}{2}$ оказались внутри распознанных FCAZm-зон либо на их границах. Сравнение основных FCAZm-зон и результатов 9 контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» показало их достаточную близость. Это обстоятельство дает существенный аргумент в пользу достоверности FCAZm-распознавания как варианта распознавания мест возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии.

Было выполнено два эксперимента «полная сейсмическая история». Использовались объекты распознавания (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$) за следующие временные периоды: 1960 ÷ 1990 гг. и 1960 ÷ 2000 гг. Сравнение основного результата распознавания (рис. 1) и полученных в эксперименте зон показало, что их пространственное расположение хотя и различно, но достаточно подобно. В Калифорнии после 1990 г. и 2000 г. произошло 11 и 4 землетрясения с $M \geq 6\frac{1}{2}$ соответственно. За исключением расположенного в акватории Тихого

Океана на большом расстоянии от побережья Калифорнии эпицентра землетрясения 15 июня 2005 г. (№ 31 в табл. 1), все эпицентры, произошедшие после 1990 г. и 2000 г., находятся внутри соответствующих зон FCAZm, хотя информация о них никак не использовалась при распознавании. То есть, внутрь распознанных FCAZm-зон попали эпицентры землетрясений, произошедших спустя годы (в частности, спустя 10 ÷ 20 лет) после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения с $M \geq 3.0$). Эпицентры землетрясений, произошедших до 1990 г. и 2000 г., неплохо согласуются с пространственным расположением соответствующих FCAZm-зон.

Проведено сравнение FCAZm-зон с зонами, распознанными ранее методом EPA [14] и системой FCAZ [15].

Сравнение зон возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$ в Калифорнии, распознанных алгоритмической системой FCAZm и методом EPA, приведено на рис. 2а. Видно, что FCAZm-зоны, полученные кластеризацией эпицентров землетрясений и последующим их оконтуриванием, занимают меньшую площадь, чем зоны EPA.

На территории рассматриваемого нами региона Калифорнии площадь FCAZm-зон оказывается в 2 раза меньше площади EPA-зон, а площадь DPS-кластеров меньше площади зон EPA в 3.5 раза. При этом по большей части FCAZm-зоны находятся внутри зон EPA.

Внутри FCAZm-зон находится эпицентр землетрясения вблизи г. Сан-Симеон 22 декабря 2003 г. с магнитудой $M = 6\frac{1}{2}$ (№ 30 в табл. 1), не попавший в зоны, распознанные методом EPA в работе [14] (рис. 2а). В левом верхнем углу карты (рис. 2а) внутри FCAZm-зон находятся эпицентры трех морских землетрясений, тоже не вошедшие в зоны, распознанные как высокосейсмичные методом EPA [14].

Таким образом, мы можем утверждать, что на территории Калифорнии зоны, распознанные системой FCAZm, занимают меньшую площадь и лучше согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$, чем зоны, распознанные методом EPA [14]. Следовательно, можно предположить, что в карте работы [14] имеют место ложные тревоги.

Сравнение зон возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии, распознанных алгоритмическими системами FCAZm и FCAZ, приведено на рис. 2б.

На рассматриваемой территории площадь FCAZm-зон оказывается в 1.43 раза больше площади FCAZ-зон. Отношение площади пересечения зон FCAZm и FCAZ к площади их объединения равно 0.57. При этом по большей части FCAZ-зоны находятся внутри FCAZm-зон.

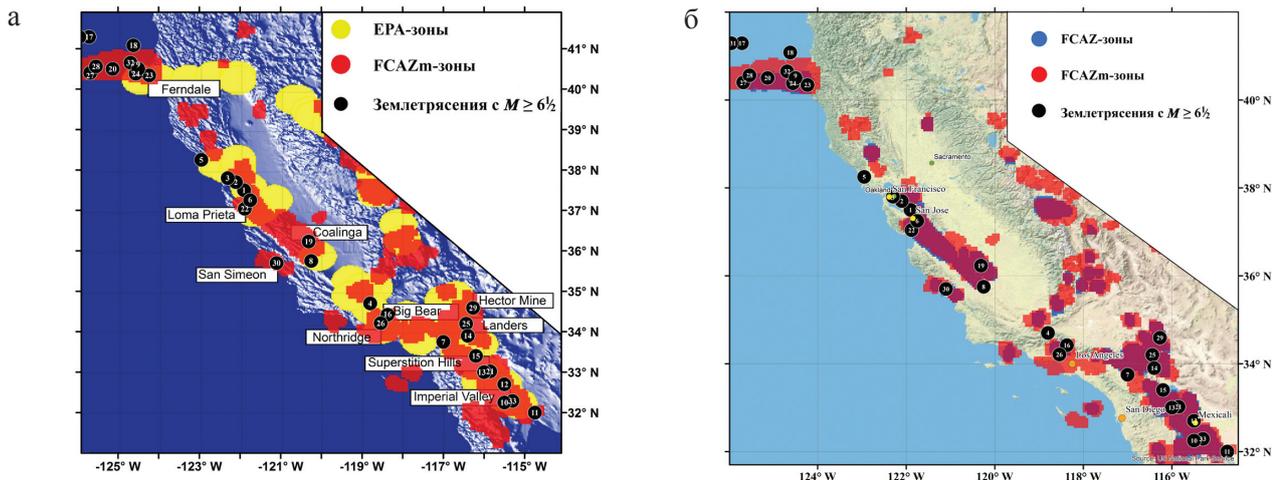


Рис. 2. Сравнение FCAZm-зон с зонами, распознанными (а) методом EPA и (б) системой FCAZ

Fig. 2. Comparison of FCAZm-zones with zones, recognized by the (a) EPA method and (b) the FCAZ system

Следует заметить, что в случае FCAZm-зон эпицентры (как минимум) землетрясений №7, 11, 27, 28 и 32 попадают внутрь зон. В то время как в распознавании системой FCAZ эпицентры этих землетрясений располагались на самой границе зон.

Из рис. 2б видно, что зоны FCAZm и FCAZ хорошо согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 6\frac{1}{2}$, дополняя друг друга.

Выводы

Приведенные в настоящей работе результаты говорят о высокой достоверности интерпретации FCAZm-зон как зон возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии. Они хорошо согласуются с классическими высокосейсмичными зонами EPA [14] и уточняют их, делая более информативными.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного ФАНО России (проект № 0145-2018-0001).

Авторы благодарны н.с. ГЦ РАН О.О. Самохиной за помощь в подготовке иллюстративного материала.

Ключевые слова: распознавание мест возможного возникновения эпицентров землетрясений, кластеризация, EPA (Earthquake-Prone Areas), дискретный математический анализ (ДМА), алгоритм DPS (Discrete Perfect Sets), алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning).

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаян С.М., Соловьев А.А. Выделение плотных областей в метрических пространствах на основе кристаллизации // System Research and Information Technologies. – 2004. – № 2. – С. 7-23.
2. Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Ранцман Е.Я. Морфоструктурное

районирование горных стран по формализованным признакам // Вычислительная сейсмология. – М., 1977. – Вып. 10: Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / под ред. В.И. Кейлис-Борока. – С. 33-49.

3. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. – 2008. – № 5. – С. 26-31.

4. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 2. – С. 104-122.

5. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 109-125.

6. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзобоев Б.А. Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. – 2013. – № 2. – С. 44-57.

7. Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринев В.Н., Богоутдинов Ш.Р. Геоинформационные технологии: методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. – 2008. – № 2. – С. 3-14.

8. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. – М.: Наука, 1988. – 176 с.

9. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А. Оценка сейсмической опасности при выборе мест захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал. – 2015. – № 10. – С. 39-43.

10. Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. – 2016. – № 4. – С. 3-23.
11. Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 3-19.
12. Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Сергеева Н.А., Рыбкина А.И. Формализованная кластеризация и зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений на Крымском полуострове и Северо-Западе Кавказа // Физика Земли. – 2017. – № 3. – С. 33-42.
13. Гвишиани А.Д., Диаман М., Михайлов В.О., Гальдеано А., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Граева Е.М. Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. – 2002. – № 7. – С. 13-28.
14. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф.С., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Вычислительная сейсмология. – М., 1976. – Вып 9 : Исследование сейсмичности и моделей Земли / под ред. В.И. Кейлис-Борока. – С. 3-91.
15. Дзедобоев Б.А. Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.10. – М., 2014. – 132 с.
16. Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. – 2014. – № 2. – С. 3-20.
17. Agayan S.M., Bogoutdinov S.R., Dobrovolsky M.N. Discrete perfect sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – V. 50, Is. 2. – P. 176-190.
18. Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E. Formal morphostructural zoning of mountain territories // Geophysics. – 1977. – № 42 (2). – P. 227-233.
19. Folger P. Earthquakes: Risk, Detection, Warning, and Research // CRS Report for Congress, 2013. – 22 p. – URL: <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL33861.pdf> (date of access: 16.05.2017).
20. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzedoboev B. Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. – 2013. – V. 12, No. 1. – P. 1-10.
21. <http://moho.ess.ucla.edu/~werner/FORECASTS/index.html> (date of access: 16.05.2017).
22. <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html> (date of access: 16.05.2017).
23. Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 2012. – 45 p. – DOI: 10.5078/corssa-00180805. – URL: <http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Mignan-Woessner-2012-CORSSA-Magnitude-of-completeness.pdf> (date of access: 16.05.2017).
24. Reasenber P. Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982 // Journal of Geophysical Research. – 1985. – V. 90, Is. B7. – P. 5479-5495.
25. Shi Y., Bolt B.A. The standard error of the magnitude-frequency b-value // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1982. – V. 72. – P. 1677-1687.
26. USGS Fact Sheet 2008-3027 : Forecasting California's Earthquakes – What Can We Expect in the Next 30 Years? – 2008. – URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3027/fs2008-3027.pdf> (date of access: 16.05.2017).
27. Wiemer S., Wyss M. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2000, August. – V. 90, Is. 4. – P. 859-869.
28. Wyss M., Wiemer S., Zuniga R. ZMAP. A tool for analyses of seismicity patterns. Typical applications and uses : a cookbook, 2001. – 57 p.
29. Zaliapin I., Keilis-Borok V.I., Axen G. Premonitory spreading of seismicity over the faults' network in southern California : Precursor Accord // Journal of Geophysical Research. – 2002. – V. 107, Is. B10, 2221. – 15 p.

REFERENCES

1. Agayan S.M., Soloviev A.A. Recognition of dense areas in metric spaces basing on crystallization // System Research and Information Technologies. 2004. No. 2. P. 7-23.
2. Alekseevskaya M.A., Gabrielov A.M., Gvishiani A.D., Gel'fand I.M., Rantsman E.Ya. Morphostructural zoning of mountain regions by formal criteria // Vychislitel'naya seismologiya. Vyp. 10: Raspoznavanie i spektral'nyi analiz v seismologii (Computational Seismology. V. 10: Pattern Recognition and Spectral Analysis in Seismology) / Ed. V.I. Keilis-Borok. Moscow, 1977. P. 33-49.
3. Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R. Discrete mathematical analysis and monitoring of volcanoes // Inzhenernaya Ekologia. 2008. No. 5. P. 26-31.
4. Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R. Mathematical Methods of Geoinformatics. I. A New Approach to Clusterization // Cybernetics and Systems Analysis. 2002. V. 38, Is. 2. P. 238-254.

5. Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Soloviev A.A. Discrete mathematical analysis and applications in geology and geophysics // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2010. № 2. P. 109-125.
6. Gvishiani A.D., Agayan S.M., Dobrovolsky M.N., Dzeboev B.A., Objective epicenter classification and recognition of the areas of possible occurrence of large earthquakes in California // Geoinformatika. 2013. No. 2. P. 44-57.
7. Gvishiani A.D., Belov S.V., Agayan S.M., Rodkin M.V., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Bogoutdinov Sh.R. Geo-information technologies: artificial intelligence methods in the assessment of tectonic stability of Nizhnekanskii Massif // Inzhenernaya Ekologiya. 2008. No. 2. P. 3-14.
8. Gvishiani A.D., Gorshkov A.I., Rantsman E.Ya., Cisternas A, Soloviev A.A. Prognozirovanie mest zemletryasenii v regionakh umerennoi seismichnosti (Recognition of Earthquake-Prone Areas in the Regions of Moderate Seismicity), Moscow : Nauka, 1988.
9. Gvishiani A.D., Dzeboev B.A. Assessment of seismic hazard in choosing of a radioactive waste disposal location // Gornyi Zhurnal (Mining Journal). 2015. No. 10. P. 39-43. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.07.
10. Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Agayan S.M. FCAZm intelligent recognition system for locating areas prone to strong earthquakes in the Andean and Caucasian mountain belts // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2016. V. 52. Is. 4. P. 461-491. DOI: 10.1134/S1069351316040017.
11. Gvishiani A., Dzeboev B., Agayan S. A new approach to recognition of the earthquake-prone areas in the Caucasus // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2013. V. 49, Is. 6. P. 747-766. DOI: 10.1134/S1069351313060049.
12. Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Sergeeva N.A., Rybkina A.I. Formalized Clustering and the Significant Earthquake-Prone Areas in the Crimean Peninsula and Northwest Caucasus // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. Is. 3. P. 353-365. DOI: 10.1134/S106935131703003X.
13. Gvishiani A.D., Diamant M., Mikhailov V.O., Galdeano A., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Graeva E.M., Artificial intelligence algorithms for magnetic anomaly clustering // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2002. V. 38. Is. 7. P. 545-559.
14. Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F.S., Rantsman E.Ya., Rotvain I.M., Sadovskii A.M. Criteria of the origin of strong earthquakes (California and some other regions), in Vychislitel'naya seismologiya. Vyp. 9. Issledovanie seismichnosti i modelei Zemli (Computational Seismology: Study of Seismicity and Models of the Earth) / Ed. V.I. Keilis-Borok, Moscow, 1976. P. 3-91.
15. Dzeboev B.A. Clustering in the recognition of strong earthquake-prone areas in California and Caucasus // Cand. Sci. (Phys-Math.) Dissertation. Moscow : Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 2014.
16. Soloviev A.A., Gvishiani A.D., Gorshkov A.I., Dobrovolsky M.N., Novikova O.V. Recognition of earthquake-prone areas: Methodology and analysis of the results // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2014. V. 50, Is. 2. P. 151-168. DOI: 10.1134/S1069351314020116.
17. Agayan S.M., Bogoutdinov S.R., Dobrovolsky M.N. Discrete perfect sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. V. 50, Is. 2. P. 176-190.
18. Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E. Formal morphostructural zoning of mountain territories // Geophysics. 1977. No. 42 (2). P. 227-233.
19. Folger P. Earthquakes: Risk, Detection, Warning, and Research // CRS Report for Congress, 2013. 22 p. URL: <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL33861.pdf> (date of access: 16.05.2017).
20. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B. Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. 2013. V. 12, No. 1. P. 1-10.
21. <http://moho.ess.ucla.edu/~werner/FORECASTS/index.html> (date of access: 16.05.2017).
22. <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html> (date of access: 16.05.2017).
23. Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 2012. 45 p. DOI: 10.5078/corssa-00180805. URL: http://www.corssa.org/export/sites/corssa/_galleries/articles-pdf/Mignan-Woessner-2012-CORSSA-Magnitude-of-completeness.pdf (date of access: 16.05.2017).
24. Reasenber P. Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982 // Journal of Geophysical Research. 1985. V. 90, Is. B7. P. 5479-5495.
25. Shi Y., Bolt B.A. The standard error of the magnitude-frequency b-value // Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. V. 72. P. 1677-1687.
26. USGS Fact Sheet 2008-3027 : Forecasting California's Earthquakes – What Can We Expect in the Next 30 Years? (2008). URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3027/fs2008-3027.pdf> (date of access: 16.05.2017).
27. Wiemer S., Wyss M. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. 2000, August. V. 90, Is. 4. P. 859-869.
28. Wyss M., Wiemer S., Zuniga R. ZMAP. A tool for analyses of seismicity patterns. Typical applications and uses : a cookbook, 2001. 57 p.
29. Zaliapin I., Keilis-Borok V.I., Axen G. Premonitory spreading of seismicity over the faults' network in southern California : Precursor Accord // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107, Is. B10, 2221. 15 p.