

## ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 19. Выпуск 4

УДК 51-7+550.34.06

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90

**Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности<sup>1</sup>**

**Кособоков Владимир Григорьевич** — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

*e-mail: volodya@mitp.ru*

**Соловьев Александр Анатольевич** — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

*e-mail: soloviev@mitp.ru*

**Аннотация**

Статья посвящена некоторым аспектам применения алгоритмов распознавания образов при решении задач определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, что может быть использовано для оценки сейсмической опасности. Приведены основные принципы имеющего многолетнюю историю подхода к распознаванию мест сильных землетрясений (РМСЗ) рассматриваемого региона на базе схемы его морфоструктурного районирования с применением алгоритмов «Кора-3» и «Хемминг». Дан обзор полученных в этом направлении результатов и работ по разработке новых алгоритмов, основанных, в частности, на дискретном математическом анализе. Отмечено использование подходов распознавания образов для создания алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений, с помощью которых может быть получена оперативная оценка сейсмической опасности. Рассмотрено применение Общего закона подобия для землетрясений для оценки сейсмической опасности и рисков с учетом результатов РМСЗ. Приведен обзор результатов РМСЗ и оценки сейсмической опасности и рисков для региона Кавказа.

*Ключевые слова:* Распознавание образов, дискретный математический анализ, места сильных землетрясений, прогноз землетрясений, сейсмическая опасность, Общий закон подобия для землетрясений.

*Библиография:* 129 названий.

**Для цитирования:**

В. Г. Кособоков, А. А. Соловьев. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник, 2018, т. 19, вып. 4, с. 55–90.

<sup>1</sup>Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-55-12033.

## CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 19. No. 4

---

UDC 51-7+550.34.06

DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90

**Pattern recognition in problems of seismic hazard assessment**

**Kossobokov Vladimir Grigorievich** — D. Sci., Chief scientist, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS.

*e-mail: volodya@mitp.ru*

**Soloviev Alexander Anatolievich** — D. Sci., Corresponding member of RAS, Chief scientist, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS.

*e-mail: soloviev@mitp.ru*

**Abstract**

The paper is devoted to some aspects of application of pattern recognition algorithms in solving problems of strong earthquake-prone area determination that can be used for seismic hazard assessment. The main principles of the having a long-term history approach to recognition of strong earthquake-prone areas (EPA) in a region under consideration on the basis of its morphostructural zoning scheme applying the algorithms “CORA-3” and “HAMMING” are described. A review of the results obtained in this direction and work on the development of new algorithms based, in particular, on discrete mathematical analysis is given. The use of pattern recognition approaches to develop algorithms for medium-term earthquake prediction that can help to obtain an operative seismic hazard assessment is shown. The application of the Unified Scaling Law for Earthquakes for the earthquake hazard and risk assessment taking into account the EPA results is considered. A review of the EPA and earthquake hazard and risk assessment results for the Caucasus region is presented.

*Keywords:* pattern recognition, discrete mathematical analysis, strong earthquake-prone areas, earthquake prediction, seismic hazard, Unified Scaling Law for Earthquakes.

*Bibliography:* 129 titles.

**For citation:**

V. G. Kossobokov, A. A. Soloviev, 2018, "Pattern recognition in problems of seismic hazard assessment", 2018, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 19, no. 4, pp. 55–90.

## 1. Введение

Создание научной базы для решения задачи уменьшения возможного ущерба от природных и природно-техногенных катастрофических событий является сложнейшей фундаментальной проблемой, имеющей большое научно-техническое, социальное и экономическое значение. Ее актуальность непрерывно возрастает в связи с быстрым ростом плотности населения, увеличением техногенной нагрузки на природный комплекс, развитием экологически опасных производств (ядерно-энергетический комплекс, химическая промышленность, военно-промышленный комплекс и т.д.), а также расширением горнорудного производства, добычи нефти и газа.

По данным ООН ущерб от катастроф, связанных с землетрясениями, составляет значительную часть от общего ущерба от природных бедствий. Землетрясения представляют собой экстремальные явления, происходящие в сложной системе разломов и блоков литосферы Земли. Они связаны с динамикой литосферных плит, накоплением тектонических напряжений и их концентрированным сбросом. Сильнейшие землетрясения происходят редко, но имеют серьезные экономические и финансовые последствия, сопровождающиеся человеческими жертвами. Традиционные методы оценки сейсмической опасности, хотя и достаточно развиты, не всегда способны достаточно адекватно охарактеризовать рассматриваемый регион на предмет реальной опасности от возможного сильного землетрясения. Получаемые методами сейсморайонирования результаты могут в конкретных местах давать заниженные оценки уровня сейсмического потенциала территории. Достаточно упомянуть [Кособоков и Некрасова, 2011; Wyss и др., 2012], что все 12 землетрясений, вызвавших гибель более 1000 человек, которые произошли в 2000-2011 гг. (общее число жертв, включая погибших от цунами, превосходит 700000), оказались неожиданными «сюрпризами» по отношению к картам Глобальной программы оценки сейсмической опасности [the Global Seismic Hazard Assessment Program GSHAP, Giardini et al., 1999], поддержанной в рамках Международной декады ООН по сокращению ущерба от стихийных бедствий. Систематическая проверка эффективности карт GSHAP (включая карты Общего сейсмического районирования РФ) показала научную несостоятельность вероятностных оценок и неоправданный риск от их использования для практических решений. Конкретнее, в период с 1990 по 2009 гг. утверждение о 10%-ной вероятности превышения пикового ускорения на скальном основании PGA в течение 50 лет было нарушено для более 40% сильных землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,0$ , приблизительно для 90% значительных землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,0$  и для всех землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,5$ .

Оценить опасность и риски от землетрясений для населения и объектов инфраструктуры отдельно взятых стран не просто, поскольку локально ощутимые землетрясения происходят крайне редко, способствуя возникновению мифов и научнонеобоснованных представлений об их возникновении. Сейсмическая реальность намного сложнее, чем классические модельные предположения о возникновении землетрясений [Кейлис-Борок и др. 1989; Utsu et al., 1995; Bak et al., 2002; Ромашкова и Кособоков 2001; Kossobokov and Romashkova 2005; Ben-Zion 2008; Kossobokov et al. 2008; Shearer 2012; Panza et al. 2014]. Оценка сейсмической опасности – непростая задача, которая подразумевает деликатное применение статистики к данным ограниченного размера и различной точности. Это обстоятельство, как правило, приводит к усложнению существующих гипотез, например, путем введения последовательностей основных толчков и ассоциированных с ними форшоков и афтершоков, подчиняющихся гипотетическим законам распределения их размера, времени и местоположения. Поэтому оценка ожидаемой максимальной магнитуды землетрясения в заданном месте остается основным источником ошибочной оценки сейсмической опасности [Panza et al. 2014; Nekrasova et al. 2014; Kossobokov et al. 2015], а также основной причиной неадекватных решений сейсмостойкого строительства [Davis et al., 2012]. Причем экономические потери, очевидно, включают не

только незапланированные расходы на восстановление инфраструктуры в пораженной землетрясением области, где сейсмическая опасность недооценена, но и расходы на избыточные меры безопасности в районах, где сейсмическая опасность переоценена. Поэтому актуальны совершенствование существующих и разработка новых подходов к оценке сейсмической опасности [Panza et al., 2011, 2014].

В ряде возможных подходов к оценке сейсмической опасности используются результаты решения задачи определения в рассматриваемом регионе мест возможного возникновения сильных (с магнитудой  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – некоторый порог) землетрясений. Поскольку период инструментальных сейсмологических наблюдений составляет немногим более 100 лет, то естественно предположить, что за это время не все потенциально опасные места «проявили» себя сильными землетрясениями и, соответственно, возникает задача определения таких мест. Учитывая многофакторность процессов, приводящих к землетрясениям, для решения этой задачи применяется методология распознавания образов. Эта методология используется также при разработке алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений, результаты применения которых позволяют поучить оперативную оценку сейсмической опасности в конкретных местах, и при решении других геофизических задач.

Другой важной компонентой для оценки сейсмической опасности является описание сейсмического процесса с помощью Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ). Сейсмическая опасность может быть оценена на основе аппроксимации коэффициентов ОЗПЗ, но надежность этих оценок повышается при привлечении результатами распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на рассматриваемой территории наряду с данными исторических и палео свидетельств о землетрясениях.

Применение подхода распознавания образов к определению мест возможного возникновения сильных землетрясений потребовало разработки новых алгоритмов распознавания, которые, в частности, предназначены для оценки достоверности получаемых результатов. Новые алгоритмы показали также свою эффективность при использовании для решения и других геофизических задач, например, прогноза времени землетрясений и анализа временных рядов геофизических данных.

## 2. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений

Задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (РМСЗ) была сформулирована в начале 70-х годов прошлого века в результате сотрудничества двух групп ученых: математиков во главе с И.М.Гельфандом, а также геофизиков и геоморфологов во главе с В.И.Кейлис-Бороком. В первой из работ, выполненных в этом направлении, был исследован сейсмоактивный регион Памира и Тянь-Шаня для пороговой магнитуды сильных землетрясений  $M_0 = 6,5$  [Гельфанд и др., 1972, 1973; Gelfand et al., 1972].

Для формулировки задачи на языке распознавания образов необходимо определить объекты распознавания. Для этой цели была использована методика морфоструктурного районирования (МСР), помощью которой строится модель современной блоковой структуры земной коры в рассматриваемом регионе. Геоморфологическое описание этой методики приведено в работах [Ранцман, 1979; Gorshkov et al., 2003; Горшков, 2010]. Выполнение МСР осуществляется путем целенаправленного анализа рельефа поверхности Земли с использованием топографических карт и космических снимков и с учетом информации, содержащейся на геологических и тектонических картах. В результате в регионе выделяются три элемента блоковых структур: иерархически упорядоченные *блоки*; *морфоструктурные линеаменты*, которые являются границами блоков; и *морфоструктурные узлы* – области, окружающие пересечения линеаментов. Важное значение при построении схемы МСР имеет достижение наибольшей

степени объективности, т.е. формализации, освобождения от субъективного элемента и обеспечение на этой основе воспроизводимости результатов. Достижению этой цели посвящены работы [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977, Гвишиани, 1983]. Разработанные методы формализации были опробованы при построении схемы МСР для Центрального и Северного Тянь-Шаня [Габриэлов и др., 1977] и в полном объеме применены, например, при построении схемы МСР горного пояса Анд [Габриэлов и др., 1982].

В работе [Ранцман, 1979] приведены геоморфологические аргументы в пользу того, что достаточно сильные землетрясения исследуемого региона, как правило, происходят в морфоструктурных узлах. Это подтверждается также анализом расположения известных эпицентров сильных землетрясений во всех рассмотренных регионах. Некоторые незначительные отклонения могут быть объяснены ошибками как в регистрации места и силы землетрясений, так и в определении границ узлов. Приуроченность сильных землетрясений к морфоструктурным узлам позволяет использовать их в качестве объектов распознавания и с помощью применения алгоритмов распознавания образов решать задачу разделения всего множества объектов  $W$  на два класса: класс  $D$ , состоящий из высокосейсмичных объектов (в дальнейшем – объекты  $D$ ), в которых возможны эпицентры землетрясений с  $M \geq M_0$ , и класс  $N$ , состоящий из низкосейсмичных объектов (в дальнейшем – объекты  $N$ ), в которых могут происходить только землетрясения с  $M < M_0$ .

Морфоструктурные узлы были использованы в качестве объектов распознавания в упомянутых выше первых работах по РМСЗ региона Памира и Тянь-Шаня [Гельфанд и др., 1972, 1973; Gelfand et al., 1972;], а также при исследовании регионов Малой Азии и Юго-Восточной Европы [Гельфанд и др., 1974а] и Большого Кавказа [Гвишиани и др., 1987в]. Но использование узлов во многих случаях затруднительно, поскольку определение их границ узлов является сложной задачей, для решения которой требуется крупномасштабное МСР окрестностей пересечений линеаментов [Ранцман, 1979; Гласко, Ранцман, 1992] и проведение полевых исследований. Эта трудность была преодолена путем использования в качестве объектов распознавания пересечений морфоструктурных линеаментов, что было впервые сделано в регионах Малой Азии и Юго-Восточной Европы [Гельфанд и др., 1974б]. Полученная классификация пересечений хорошо согласуется с классификацией узлов тех же регионов [Гельфанд и др., 1974а]. Для проверки статистической значимости гипотезы о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям был разработан специальный алгоритм [Гвишиани, Соловьев, 1981], применение которого во всех исследовавшихся регионах дало аргументы в пользу справедливости этой гипотезы.

Еще одной возможностью является использование сегментов линейных структур в качестве объектов распознавания. Такой подход представляется вполне естественным с точки зрения сейсмологов, поскольку землетрясения ассоциируются с сегментами разломов, на которых они происходят. В исследованиях [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976] наряду с пересечениями морфоструктурных линеаментов в качестве объектов распознавания были использованы сегменты разлома Сан-Андреас, которой является основной линейной структурой Калифорнии. В исследованиях [Гвишиани и др., 1978, 1980] объектами распознавания были сегменты Тихоокеанского сейсмического пояса, а в Западных Альпах в качестве одного из подходов распознавание было выполнено для отрезков разломов неотектонической схемы региона [Вебер и др., 1985; Cisternas et al., 1985].

Перед применением алгоритма распознавания объектам распознавания должны быть поставлены в соответствие векторы, компоненты которых являются значениями характеристик, описывающих свойства объектов, на основе которых может быть выполнена требуемая классификация. В задачах РМСЗ эти характеристики должны отражать те свойства объекта, которые прямо или косвенно связаны с различными факторами, обуславливающими возможность возникновения землетрясений. Среди этих факторов главную роль играет интенсив-

ность тектонических движений. В ходе многолетних работ по РМСЗ сформировался набор характеристик для описания объектов распознавания, который включает морфометрические показатели рельефа земной поверхности, особенности геометрии сети линейментов и гравиметрические показатели. Необходимым условием для включения в рассмотрение той или иной характеристики, отражающей особенности сейсмичных мест, является возможность определить ее значение с одинаковой точностью для всех объектов распознавания в пределах рассматриваемого региона. После измерения значений характеристик все объекты, входящие в множество  $W$  конвертируются в векторы  $\mathbf{w}^i = (w_1^i, w_2^i, \dots, w_m^i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $m$  – общее число характеристик;  $n$  – число объектов в  $W$ ;  $w_k^i$  – значение  $k$ -той характеристики, измеренное для  $i$ -го объекта.

Для решения рассматриваемой задачи использовались алгоритмы распознавания с обучением, что требует предварительного формирования обучающей выборки  $W_0$ , состоящей из двух непересекающихся подмножеств:  $D_0$  – объекты, априори принадлежащие классу  $D$ , и  $N_0$  – объекты, априори принадлежащие классу  $N$ . Обучающая выборка  $W_0 = D_0 \cup N_0$  формируется на основе информации об известных землетрясениях рассматриваемого региона. В случае использования узлов в качестве объектов распознавания в подмножество  $D_0$  включаются узлы, которые содержат эпицентры сильных землетрясений. Подмножество  $N_0$  формируется либо из оставшихся объектов  $W$ ,  $N_0 = W \setminus D_0$ , либо из объектов, в которых отсутствуют эпицентры землетрясений с  $M \geq M_0 - \delta$ , где  $\delta > 0$  и обычно имеет значение около 0.5. В случае пересечений линейментов в качестве объектов распознавания подмножество  $D_0$  формируется из объектов, расположенных на расстоянии, которое не превышает определенного порога  $r$ , от эпицентров сильных землетрясений. Значение  $r$  должно удовлетворять условию, что расстояние от всех достаточно надежно определенных эпицентров сильных землетрясений до ближайших к ним пересечений не должно превышать  $r$ . Подмножество  $N_0$  состоит из тех оставшихся пересечений, которые расположены на расстоянии не менее  $r_1$  ( $r_1 \geq r$ ) от эпицентров землетрясений с  $M \geq M_0 - \delta$  ( $\delta \geq 0$ ). В случае, когда объектами распознавания являются сегменты линейных структур, подмножество  $D_0$  формируется из сегментов, на которые попадают проекции эпицентров сильных землетрясений. Подмножество  $N_0$  состоит из тех оставшихся сегментов, на которые не попадают проекции эпицентров землетрясений с  $M \geq M_0 - \delta$  ( $\delta \geq 0$ ). Следует отметить, что во всех случаях невозможно получить подмножество  $N_0$ , являющееся «чистым» материалом обучения класса  $N$ . Некоторые из этих объектов могут быть связаны с сильными землетрясениями, которые не известны в силу малой продолжительности периода наблюдений. Задача распознавания и состоит в нахождении таких объектов, как среди объектов, не вошедших в  $W_0$ , так и среди объектов из  $N_0$ .

В большинстве исследований по РМСЗ использовался алгоритм распознавания образов «Кора-3» [Бонгард, 1967]. Этот алгоритм применяется к объектам распознавания в виде векторов с бинарными компонентами. Соответственно, векторы значений характеристик, описывающие объекты распознавания, должны быть преобразованы в векторы с бинарными компонентами. Это выполняется с помощью процедур дискретизации и кодировки, описание которых содержится, например, в работах [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976; Гвишиани и др., 1988a; Gorshkov et al., 2003; Горшков, 2010]. После дискретизации и кодировки объектам распознавания из множества  $W$  ставятся в соответствие векторы с бинарными компонентами  $\boldsymbol{\omega}^i = (\omega_1^i, \omega_2^i, \dots, \omega_L^i)$ , где  $L$  – длина бинарных векторов,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – число объектов в  $W$ . Алгоритм «Кора-3», подробное описание которого приведено, например, в работах [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976; Гвишиани и др., 1988a; Gorshkov et al., 2003; Горшков, 2010], на основе обучающей выборки на основе обучающей выборки  $W_0$  находит характерные признаки классов  $D$  и  $N$ . Признак  $A$  определяется с помощью 6-ти чисел: три целых числа  $j, k, l$  ( $1 \leq j \leq k \leq l \leq L$ ), и три бинарных числа  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , принимающих значения 0 или 1. По определению, объект номер  $i$  обладает признаком  $A$ , если значение булевой функции

$f(A, \omega^i) = (\delta_1 \equiv \omega_j^i) \& (\delta_2 \equiv \omega_k^i) \& (\delta_3 \equiv \omega_l^i)$  равно 1. Для определения характерных признаков задаются четыре порога  $S_1, C_1, S_2$  и  $C_2$ , которые являются параметрами алгоритма. Признак называется характерным признаком класса  $D$ , если число объектов из обучающей выборки  $D_0$ , которыми он обладает, не меньше чем порог  $S_1$ , а число объектов из обучающей выборки  $N_0$ , которыми он обладает, не больше чем порог  $C_1$ . Соответственно, признак называется характерным признаком класса  $N$ , если число объектов из обучающей выборки  $N_0$ , которыми он обладает, не меньше чем порог  $S_2$ , а число объектов из обучающей выборки  $D_0$ , которыми он обладает, не больше чем порог  $C_2$ . Для характерных признаков вводятся отношения подчиненности и эквивалентности. Характерный признак  $A$  является подчиненным по отношению к другому характерному признаку  $B$  того же класса, если все объекты из множества обучения этого класса, которые обладают признаком  $A$ , обладают также признаком  $B$  и есть хотя бы один объект из множества обучения, который обладает признаком  $B$ , но не обладает признаком  $A$ . Два характерных признака эквивалентны, если ими обладают одни и те же объекты соответствующего множества обучения. При формировании окончательных наборов характерных признаков классов  $D$  и  $N$ , ( $D$ -признаков и  $N$ -признаков) алгоритм исключает подчиненные признаки, а из группы эквивалентных оставляет только один признак. Классификация всех объектов из множества  $W$  выполняется на основе  $D$ - и  $N$ -признаков с помощью еще одного параметра алгоритма – порога голосования  $\Delta \geq 0$ . Объект распознавания относится к классу  $D$ , если разность между числами  $D$ -признаков и  $N$ -признаков, которыми он обладает, не меньше порога  $\Delta$ . В результате множество  $W$  разделяется на два класса  $D$  и  $N$ . При выборе значения порога  $\Delta$  следует выполнить условие  $|D| \leq \beta |W|$ , которое позволяет избежать тривиального решения, когда все объекты изучаемого региона попадают в класс  $D$ . Здесь  $|D|$  и  $|W|$  означают число объектов в множествах  $D$  и  $W$ , соответственно, а  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) – действительное число, которое априорно задает верхнее ограничение на долю объектов  $D$  в множестве  $W$ . Значение параметра  $\beta$  определяется путем экспертной оценки сейсмического потенциала изучаемой территории на основе доступной сейсмологической, геологической и другой информации.

Наряду с алгоритмом «Кора-3» при решении геофизических задач успешно применяется алгоритм «Хемминг» [Гвишиани и Кособоков, 1981]. Этот алгоритм менее избирателен по сравнению с алгоритмом «Кора-3», но его преимуществом является простота и меньшее число параметров. В случае задачи РМСЗ этот алгоритм вначале строит «ядро класса  $D$ », представляющее собой бинарный вектор, значения компонент которого чаще встречаются у объектов множества  $D_0$ , чем множества  $N_0$ . Рассмотрим компоненту  $\omega_k$  ( $k = 1, 2, \dots, L$ ) бинарных векторов, описывающих объекты распознавания, и обозначим  $q_D(k|\delta)$  число объектов множества  $D_0$ , у которых  $\omega_k = \delta$ , и  $q_N(k|\delta)$  число таких объектов множества  $N_0$ . Для множеств  $D_0$  и  $N_0$  относительные числа объектов, у которых  $\omega_k = 1$ , вычисляются из формул:

$$\alpha_D(k|1) = \frac{q_D(k|1)}{q_D(k|0) + q_D(k|1)}, \alpha_N(k|1) = \frac{q_N(k|1)}{q_N(k|0) + q_N(k|1)}.$$

Компоненты ядра класса  $D$   $\mathbf{K} = (K_1, K_2, \dots, K_L)$  определяются следующим образом:

$$\kappa_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \alpha_D(k|1) \geq \alpha_N(k|1), \\ 0, & \text{if } \alpha_D(k|1) < \alpha_N(k|1). \end{cases}$$

После определения ядра класса  $D$  классификация всех объектов из множества  $W$  выполняется на основе значения расстояния по Хеммингу  $\rho_i$  от бинарного вектора, соответствующего объекту номер  $i$ , до ядра класса  $D$ . Расстояние по Хеммингу между двумя бинарными векторами – это число их несовпадающих компонент. Объект номер  $i$  относится к классу  $D$ , если  $\rho_i \leq R$ , где  $R$  – параметр алгоритма.

После первых пионерских работ развитие исследований по РМСЗ шло в двух направлениях: решение задач РМСЗ в новых сейсмоактивных регионах и развитие алгоритмической базы

с упором на разработку алгоритмов оценки достоверности получаемых результатов. До начала 90-х годов прошлого века исследования, в основном, были сосредоточены в лаборатории Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта АН СССР, которую возглавлял А.Д.Гвишиани (в настоящее время – академик РАН). В дальнейшем эти работы были продолжены его учениками. В таблице 1 перечислены регионы, в которых РМСЗ выполнено к настоящему времени. За прошедшее время в рассмотренных регионах произошло достаточно большое число сильных землетрясений, что позволило выполнить оценки достоверности полученных результатов распознавания. Последняя такая оценка приведена в статье [Соловьев и др., 2014]. В рассмотренных регионах анализировалось положение эпицентров сильных землетрясений, произошедших в регионе после опубликования соответствующего результата. Всего оказалось 91 такое землетрясение. Эпицентры 79 из них (87%) расположены в распознанных местах их возможного возникновения, включая 27 эпицентров, расположенных в местах, где на момент публикации результата распознавания не были известны сильные землетрясения. Выполненная проверка дает аргументы в пользу достоверности результатов РМСЗ и целесообразности их применения в задачах оценки сейсмического риска.

Исследуемый регион	Пороговая магнитуда $M_0$	Объекты распознавания	Примененный алгоритм	Ссылки на публикации
Тянь-Шань и Памир, 1972	6,5	узлы, пересечения	«Кора-3», «Хемминг»	Гельфанд и др., 1972, 1973; Gelfand et al., 1972; Жидков, Кособоков, 1978; Кособоков, 1982
Балканы, Малая Азия, Закавказье, 1974	6,5; 7,0	узлы, пересечения	«Кора-3», «Хемминг»	Гельфанд и др., 1974а, 1974б; Кособоков, Ротвайн, 1977; Кособоков, 1982
Калифорния и Невада, 1976	6,5; 7,0	пересечения, сегменты линейных структур	«Кора-3»	Гельфанд и др., 1976, Gelfand et al., 1976; Кособоков, Ротвайн, 1977
Аппенинский полуостров и Сицилия, 1979	6,0; 6,5	пересечения	«Кора-3»	Горшков и др., 1979; Caputo et al., 1980; Гвишиани и др., 1989; Gorshkov et al., 2002
Тихоокеанский сейсмический пояс	8,0; 8,2	сегменты линейных структур	«Кора-3», «Хемминг»	Гвишиани и др., 1978, 1980; Гвишиани, Кособоков, 1983; Гурвич, Кособоков, 1984

Анды Южной Америки, 1982	7,75; 7,0	пересечения	«Кора-3»	Гвишиани и др., 1982; Гвишиани, Соловьев, 1982; Gvishiani, 1982a; Gvishiani, Soloviev, 1984; Жидков и др., 1990
Камчатка, 1984	7,75	пересечения	«Кора-3»	Гвишиани и др., 1984
Западные Альпы, 1985	5,0	пересечения, сегменты линейных структур	«Кора-3»	Гвишиани и др., 1984, 1985б, 1989; Вебер и др., 1985, 1986; Cisternas et al., 1985
Пиренеи, 1987	5,0	пересечения	«Кора-3»	Gvishiani et al., 1987; Гвишиани и др., 1987а, 1987б, 1989
Кавказ, 1988	5,0; 5,5; 6,0	узлы, пересечения	«Кора-3», «Барьер»	Гвишиани и др., 1986, 1987в, 1988а, 1989, 2017в; Горшков и др., 1991; Соловьев и др., 2013, 2016
Гималаи, 1992	6,5	пересечения	«Кора-3»	Бхатия и др., 1992; Bhatia et al., 1992
Альпы и Динариды	6,0; 6,5	узлы, пересечения	«Кора-3»	Gorshkov et al., 2004, 2009
Иберия	5,0	пересечения	«Кора-3»	Gorshkov et al., 2010
Крым	6,0	пересечения	«Кора-3»	Горшков и др., 2017
Алтай-Саяны-Прибайкалье	6,0	пересечения	«Кора-3»	Горшков и др., 2018

Таблица 1: Регионы, для которых решалась задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

Оценка достоверности результатов РМСЗ – один из важнейших этапов решения задачи. С этой целью был разработан ряд методов и алгоритмов, которые приведены в статьях [Гвишиани, Кособоков, 1981; Гвишиани, 1982; Гвишиани, Гурвич, 1982; Gvishiani, 1982b; Гвишиани А.Д., Гурвич, 1984а, 1984б; Гвишиани и др., 1985].

Как было отмечено выше, множество объектов обучения  $N_0$  не является достаточно «чистым», т.е. может содержать объекты из класса  $D$ . С учетом этого был разработан алгоритм «Барьер» [Гвишиани и др., 2017], который позволяет выполнить разделение объектов распознавания на классы  $D$  и  $N$ , используя только одно множество объектов обучения  $D_0$ . Алгоритм был применен для РМСЗ на Кавказе [Гвишиани и др., 2017] при том же пороге  $M_0 = 6,0$  и с теми же значениями характеристик объектов распознавания, что и в работах [Соловьев и др., 2016], где был использован алгоритм «Кора-3». Результаты применения двух алгоритмов хорошо согласуются, т.е. алгоритм «Барьер» не уступает алгоритму «Кора-3». Преимуществами алгоритма «Барьер» являются меньшее число свободных параметров и возможность приме-

нения его непосредственно к векторам со значениями характеристик, описывающих объекты распознавания, что устраняет необходимость выполнения процедур дискретизации и кодировки.

### 3. Применение распознавания образов при решении других геофизических задач и разработанные с этой целью алгоритмы

Наряду с решением задач РМСЗ алгоритмы «Кора-3» и «Хемминг» были использованы в разработке методов прогноза времени землетрясений. В этих задачах объектами распознавания являются дискретные моменты времени  $t_i$ , и необходимо выделить из них объекты класса  $D$  – моменты, после которых в течение периода  $\tau$  в рассматриваемом регионе ожидается сильное землетрясение. Остальные объекты образуют класс  $N$ . Объектам распознавания ставятся в соответствие векторы, компонентами которых являются значения характеристик фоновой сейсмичности, измеренные в течение некоторого периода, предшествующего соответствующему моменту  $t_i$ . На основе характерных признаков классов  $D$  и  $N$ , отобранных с помощью алгоритма «Кора-3» с использованием данных о сейсмичности Южной Калифорнии за период 1938-1984 гг., было построено решающее правило для классификации моментов времени на  $D$  и  $N$ . При этом пороговое значение сильных землетрясений  $M_0 = 6,4$ , а  $\tau = 1$  год. Полученный алгоритм прогноза был опробован на объединении регионов Калифорния и Невада и назван CN [Keilis-Borok, Rotwain, 1990]. Обзор применения алгоритма CN в ряде сейсмоактивных регионов приведен в статье [Rotwain, Novikova, 1999]. На основе алгоритма «Хемминг» разработан алгоритм прогноза сильнейших землетрясений мира ( $M_0 = 8,0$ ), получивший название M8 [Keilis-Borok, Kossobokov, 1990]. С 1992 года выполняется Глобальный эксперимент по применению алгоритма M8 с целью прогноза сильнейших землетрясений мира в режиме реального времени. Этот эксперимент позволяет получить оценку достоверности результата прогноза  $1 - p > 0,99$  [Kossobokov, 2013; Кособоков, Соловьев, 2015], где  $p$  – оценка вероятности получения такого же или лучшего результата случайным образом.

Алгоритмы распознавания образов были использованы также для решения других геофизических задач, в частности, распознавания интенсивности по динамическим параметрам акселерограмм [Гвишиани и др., 1988б; Gvishiani et al., 1988]. Эти задачи потребовали применения алгоритмов распознавания, отличных от рассмотренных выше («Кора-3», «Хемминг»). Например, для решения задач классификации записей сильных движений [Гвишиани и др., 1990; Gvishiani et al., 1991] были разработаны синтаксические алгоритмы, которые могут быть отнесены к структурным методам распознавания образов [Фу, 1977]. Эти же алгоритмы были использованы для решения задачи определения по сейсмограмме землетрясения региона, где оно произошло [Gvishiani et al., 1994, 1995], а также при определении аномалий магнитного поля на магнитограммах [Gvishiani et al., 1997].

Разработанные алгоритмы распознавания образов и полученные с их помощью результаты решения геофизических задач нашли отражение в ряде монографий [Гвишиани и др., 1988; Гвишиани, Гурвич, 1992; Dubois, Gvishiani, 1998; Gvishiani, Dubois, 2002].

Новый подход к созданию алгоритмов распознавания образов основан на разработанном в Геофизическом центре РАН дискретном математическом анализе (ДМА) [Гвишиани и др., 2002а, 2008, 2010; Агаян, Соловьев, 2004]. Созданные на основе ДМА алгоритмы искусственного интеллекта, в частности, кластеризационные системы (системы объективной классификации) нашли применения в области анализа временных рядов с целью выделения аномалий, что используется, например, при обработке геомагнитных данных [Гвишиани и др., 2002б; Gvishiani et al., 2004].

Эти алгоритмы не используют обучающие выборки, а выделяют сгущения (кластеры) в пространстве, которому принадлежат объекты распознавания. Задача определения высокосей-

смичных областей (областей, где возможны эпицентры землетрясений с  $M \geq M_0$ ) решается с помощью такого алгоритма DPS (Discrete Perfect Sets) [Агаян и др., 2011], который анализирует множество эпицентров сравнительно слабых землетрясений региона с магнитудами  $M \geq M_b$ , где порог  $M_b$  значительно меньше, чем  $M_0$ , и выделяет кластеры эпицентров, объединение которых и может быть рассмотрено в качестве высокосейсмичной области. Впервые такой подход был применен к анализу сейсмичности Калифорнии [Гвишиани и др., 2013а; Gvishiani et al., 2013]. Сравнение полученных кластеров эпицентров землетрясений с магнитудой  $M \geq M_b = 3,0$ , произошедших в Калифорнии в 1980-2011 гг. с результатом РМСЗ из работ [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976] показало их хорошую согласованность [Соловьев и др., 2014], что является дополнительным аргументом в пользу достоверности результатов, полученных двумя различными методами. Отметим, что использование алгоритма DPS не требует предварительного построения схемы МСР региона, определения на ее основе объектов распознавания и измерения значений описывающих их характеристик. На основе алгоритма DPS создана алгоритмическая система определения высокосейсмичных зон, получившая название FCAZ (Fuzzy Clustering And Zoning), описание которой приведено в работе [Гвишиани и др., 2013б]. Система была успешно применена для определения высокосейсмичных областей на Кавказе для пороговой магнитуды сильных землетрясений  $M_0 = 5,0$ .

В дальнейшем были сформулированы принципы единообразного подхода к определению высокосейсмичных областей, т.е. системного анализа этой проблемы, инвариантного относительно выбора пороговых магнитуд землетрясений, и созданы новые блоки во входящих во FCAZ алгоритмах, которые позволяют автоматизировать выбор оптимальных значений их свободных параметров. Это можно интерпретировать как включение во FCAZ элементов искусственного интеллекта. Апробация новой версии системы [Гвишиани и др., 2016] выполнена путем анализа сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки для  $M_0 = 7,75$  и ее нового, независимого от работы [Гвишиани и др., 2013б], применения на Кавказе для  $M_0 = 5,0$ . С помощью системы FCAZ определены высокосейсмичные области в объединенном регионе, включающем Крым и западную часть Северного Кавказа, для двух значений  $M_0$  (4,5 и 5,0) [Гвишиани и др., 2017а], а также путем итерационного сужения множества объектов распознавания в регионе Прибайкалье-Забайкалье для трех магнитудных порогов  $M_0$  (5,5; 5,75 и 6,0) [Гвишиани и др., 2017б]. Итерационное сужение означает, что высокосейсмичные области для рассматриваемого магнитудного порога распознаются внутри областей, уже распознанных как опасные для меньшей пороговой магнитуды. Следующим применением системы было распознавание высокосейсмичных зон в объединенном регионе Алтай-Саяны для пороговой магнитуды  $M_0 = 5,5$  [Гвишиани и др., 2018].

#### 4. Оценка сейсмической опасности и рисков для населения и инфраструктуры на примере Кавказа

Процесс возникновения землетрясений в пространстве и времени имеет фрактальный характер и подчиняется общим законам иерархической самоорганизации, что было отмечено в работах [Садовский и др., 1982, 1984; Okubo and Aki, 1987]. Понимание этого продолжает улубляться, что, в частности, нашло выражение в формулировке Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ), который уточняет эмпирическое соотношение Гутенберга-Рихтера, учитывая естественное фрактальное распределение сейсмичности. Конкретнее, результаты глобального и регионального анализа [Кейлис-Борок и др., 1989; Кособоков, Мажкенов, 1992; Vak et al. 2002; Кособоков, Некрасова, 2004] показали, что среднегодовое число землетрясений,  $N(M, L)$ , с магнитудой  $M$  в сейсмоактивной области линейного размера  $L$ , для широкого диапазона магнитуд  $M$  из интервала  $(M_-, M_+)$  и размеров  $L$  из интервала  $(L_-, L_+)$ , довольно хорошо согласуется со следующей формулой ОЗПЗ:  $\lg N(M, L) = A + B \times (5 - M) + C \times \lg L$ ,

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – константы, локально характеризующие соответственно логарифм среднегодовой частоты землетрясений магнитуды 5.0 и выше в области линейного размера в 1 градус Земного меридиана, баланс числа землетрясений разных магнитуд и фрактальную размерность носителя эпицентров землетрясений, а  $\lg X$  – десятичный логарифм  $X$ .

Вопрос о том, как изменяются характеристики распределения землетрясений при изменении масштабов рассмотрения, фундаментален, а ответ на него *a priori* не ясен и требует локального оценивания. При этом широко используемое в практике сейсморайонирования классическое нормирование на площадь в км<sup>2</sup>, игнорирующее характеристики распределения, может приводить к многократному недооцениванию сейсмической опасности. Так, например, оценивая повторяемость землетрясений в Петропавловске-Камчатском с площадью  $S_{PK} = 400$  км<sup>2</sup>, где в соответствии с работой [Кособоков и Некрасова 2004]  $A = 0,12$ ,  $B = 0,86$ ,  $C = 1,26$ , по данным сейсмичности на всей Камчатке с площадью  $S_{Kam} = 270000$  км<sup>2</sup>, получим, что недооценка повторяемости землетрясений в черте города при нормировании на площадь может составить  $(S_{Kam}/S_{PK}) / (S_{Kam}/S_{PK})^{0.5 \times 1.26} = 675^{0.37} > 11$  раз.

Оценки коэффициентов ОЗПЗ могут быть использованы для расчетов характеристик сейсмической опасности в терминах достоверно определенной максимальной магнитуды землетрясения, которое возможно в данном месте системы разломов, а также ассоциированных с ним сотрясений на территории и рисков для населения и инфраструктуры (см., например, [Nekrasova et al. 2015]). Последовательность этих расчетов выглядит следующим образом.

Для ячеек  $\{s_i \mid i = 0, 1, 2, \dots, n\}$  с центрами в узлах регулярной сетки  $l \times l$  и размерами  $L_0 \times L_0$ , где  $l \leq L_0 \in (L_-, L_+)$  – фиксированные константы, рассчитываются коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  по многочисленным наборам случайно ориентированных областей  $\{2^k L_0 \times 2^k L_0\}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, K$ . При этом набор ячеек определяется наличием в каждой из них эпицентров надежно определенных землетрясений, что обеспечивает покрытие носителя сейсмичности на территории исследования.

Для каждой из рассматриваемых ячеек  $s_i$  с использованием ОЗПЗ и значений магнитуды  $M \in (M_-, M_+)$  определяется ожидаемое число событий в заданный интервал времени  $T$  лет,  $N_{i,T}(M, L_0) = T \times N_i(M, L_0)$ .

По заданному порогу вероятности  $p$  выбирается максимальное значение  $M_{i,T}$ , для которого ожидаемое за время  $T$  число землетрясений  $N_{i,T}(M_{i,T}, L_0) > p$ . В результате, можно ожидать, что с достоверностью  $(1 - p)$  определенная таким образом магнитуда  $M_{i,T}$  для конкретной ячейки  $s_i$  будет соответствовать максимальной магнитуде землетрясения  $M_{max}$ , ожидаемого в ней за интервал времени  $T$ . Следует заметить, что для обеспечения более надежной оценки сейсмической опасности карта  $\{M_{i,T} \mid i = 0, 1, 2, \dots, n\}$  может быть пополнена результатами распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на рассматриваемой территории, а также данными исторических и палео свидетельств о землетрясениях.

На основе пополненной карты значений  $M_{max} \{M_{i,T}\}$  с использованием неопределенных методов расчета параметров сотрясаемости по результатам исчерпывающего моделирования возможных сценариев ожидаемых землетрясений максимальной силы [Panza et al., 2001] создается карта сейсмической опасности в терминах, необходимых для расчета конкретных рисков для населения и инфраструктуры рассматриваемой территории, или определяются параметры сотрясаемости конкретных сооружений [Paskaleva et al. 2007; Vaccari et al. 2009; Panza et al. 2013].

Выполняется оценка рисков для конкретных объектов.

В случае осуществления на рассматриваемой территории мониторинга периодов повышенной вероятности сильных землетрясений с помощью алгоритмов прогноза землетрясений возможен оперативный расчет сейсмической опасности и рисков [Peresan et al. 2011].

Оценка сейсмической опасности и рисков выполнена для региона Большого Кавказа [Kossobokov, Nekrasova, 2018] в пределах  $40^\circ$ – $46^\circ$  с.ш. и  $36^\circ$ – $51.5^\circ$  в.д.

В качестве данных о сейсмичности Северного Кавказа использовался тщательно выверенный региональный каталог, составленный с использованием ежегодных выпусков «Землетрясения Северной Евразии» в 1998-2008 гг. и «Землетрясения России» в 2004-2014 гг. Каталог покрывает период 1998-2014 гг. и обеспечивает достаточно полную выборку из 4941 землетрясения энергетического класса  $K \geq 10,5$ , что соответствует магнитуде  $M \geq 3,6$ , с глубиной гипоцентра менее 70 км. Данные о распределении населения в регионе взяты по оценке GPWv3 на 2015 год [Gridded Population of the World, 2005], а для городов с населением более 100 тыс. жителей по данным переписи [ФССС, 2016].

Расчет параметров ОЗПЗ на территории Северного Кавказа проводился в узлах регулярной сетки ( $l = 1/4^\circ$ ) с использованием иерархии квадратных ячеек со стороной от  $1/4^\circ$  до  $2^\circ$  земного меридиана ( $K = 3$ ), а также в пересечениях морфоструктурных линейментов. Схема МСР для Большого Кавказа была построена в работе [Гвишиани и др. 1986], для всего кавказского региона – в работах [Соловьев и др., 2013]. Задача РМСЗ для этого региона неоднократно решалась для различных пороговых магнитуд с помощью различных алгоритмов (см. Таблицу 1). Отметим исследование [Соловьев и др., 2016], в котором по предложению академика А.Д.Гвишиани впервые в описание объектов распознавания были включены отражающие аномалии магнитного поля Земли характеристики, показавшие высокую эффективность при решении задачи РМСЗ (рис. 1), а так же работу [Гвишиани и др., 2017в], в которой впервые для решения задачи РМСЗ был применен новый алгоритм «Барьер», использующий обучающую выборку только для одного класса. Для региона Кавказа было также выполнено численное моделирование динамики системы блоков и разломов, а также возникающей при этом сейсмичности [Соловьев, Горшков, 2017]. При этом обнаружено наличие модельных землетрясений с магнитудой  $M \geq 6$  в тех частях высокосейсмичных областей, показанных на рис. 1, где не были зарегистрированы реальные события с  $M \geq 6$ .

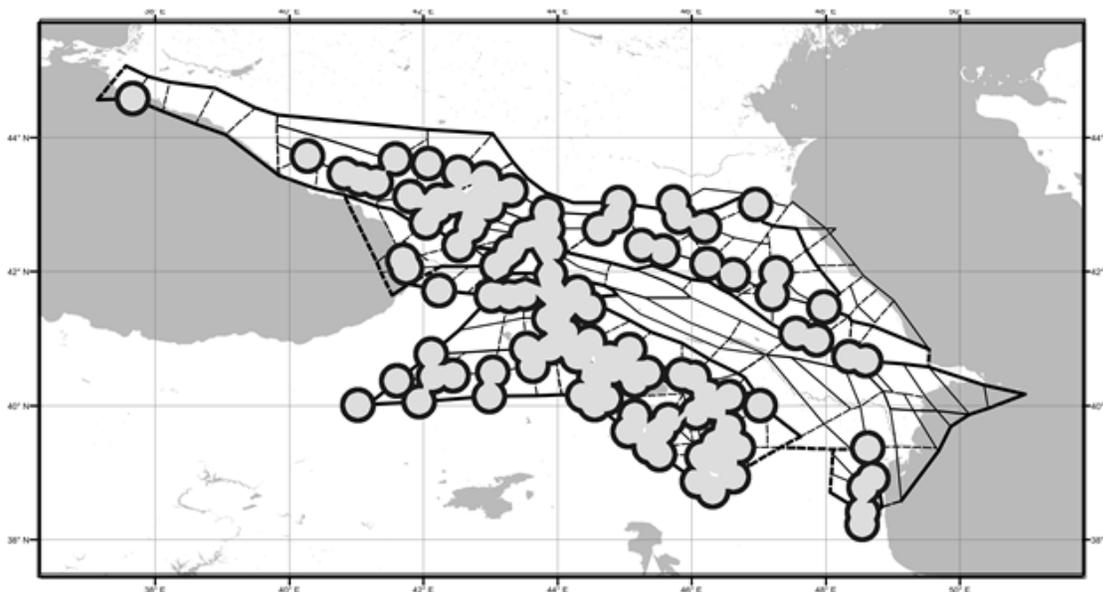


Рис. 1: Области возможного возникновения землетрясений с магнитудой  $M \geq 6$  (ограничены жирными черными кривыми), полученные с помощью алгоритма распознавания «Кора-3» с использованием характеристик, отражающих аномалии магнитного поля Земли [Соловьев и др., 2016].

Содержательные оценки коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  получены для 102 из 107 пересечений Северного Кавказа из работы [Гвишиани и др. 1986]. В пяти случаях данных о землетрясе-

ниях в 1998-2014 гг. оказалось недостаточно для надежного определения параметров ОЗПЗ. На рис. 2 приведены карты коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а также суммы квадратов ошибки их определения по статистике стократного случайного поворота областей  $2^\circ \times 2^\circ$ . Пересечения, где параметр  $A$  превышает 0, что соответствует ожиданию одного события с  $M=5,0$  в год, в основном расположены в Дагестане. Средние значения сейсмической активности, где повторяемость землетрясений втрое меньше, распространены в центральных и восточных районах Северного Кавказа. Остальные сейсмически активные области на рассматриваемой территории характеризуются еще более низкой повторяемостью землетрясений умеренной силы. Основная часть полученных значений параметра  $B$ , характеризующего наклон графика повторяемости, находится в пределах от 0,8 до 1,3, а его значения около 0,4 в пересечениях на юго-востоке региона могут быть связаны с отсутствием в этих районах сильных землетрясений в 1998-2014 гг. Фрактальная размерность распределения эпицентров (параметр  $C$ ) в основном принимает значения от 0,6 до 1,5 с очевидным пиком около 1,1, что соответствует в целом линейному простираию морфоструктур. Области высокой раздробленности, где значение коэффициента  $C > 1,2$ , четко выделяют сейсмоактивные районы Дагестана, Чеченской и Карачаево-Черкесской Республик.

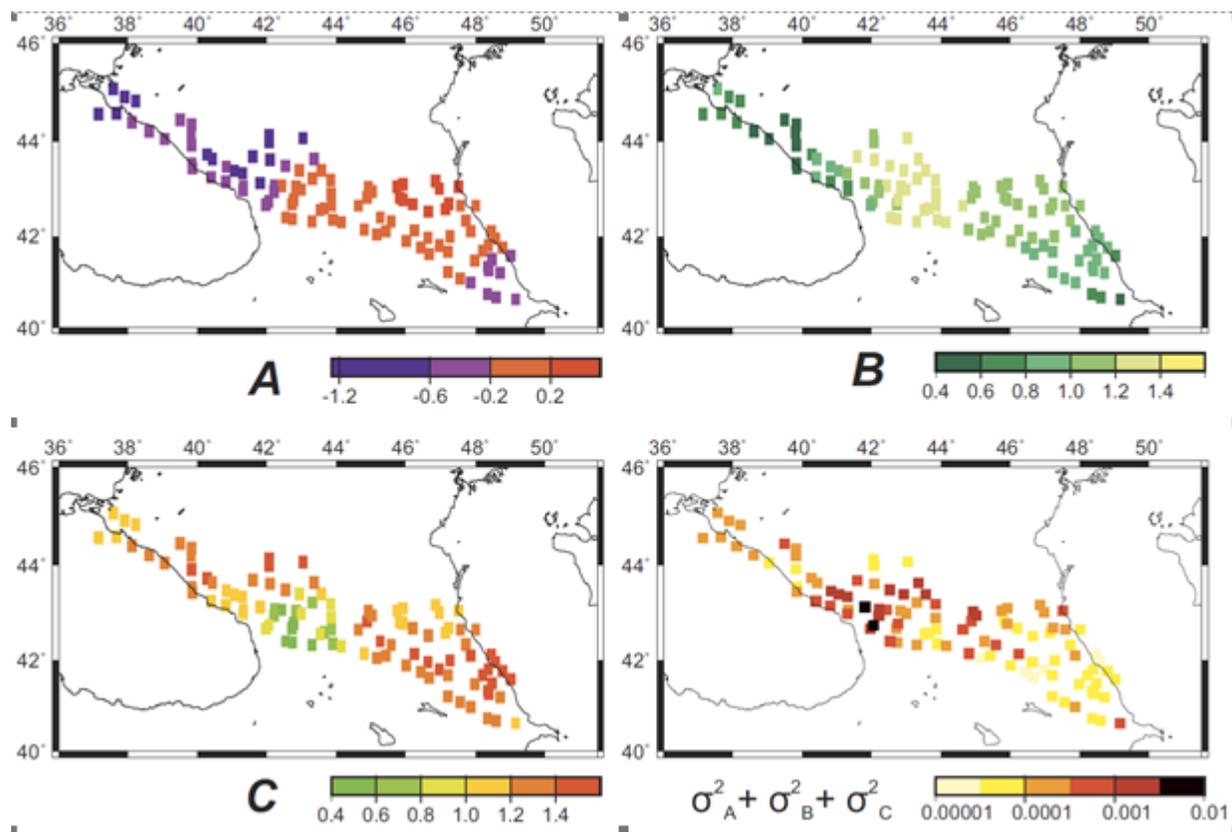


Рис. 2: Карты параметров ОЗПЗ  $A, B, C$  и суммы квадратов ошибки их определения ( $\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2$ ) для 102 пересечений морфоструктурных линейментов Северного Кавказа.

На рис. 3 представлены результаты расчета  $M_{max}$  и сейсмической опасности в терминах пикового ускорения на скальном основании PGA при  $T = 50$  лет и  $p = 0,1$  (что соответствует ставшему традиционным утверждению о «вероятности превышения 10% в период 50 лет», надежное обоснование для которого согласно [Beauval et al. 2008] может быть получено лишь по наблюдениям за десятки тысяч лет). Следует заметить, что расчеты ожидаемых сотрясений на скальном основании в терминах максимального пикового ускорения (PGA) проводились по

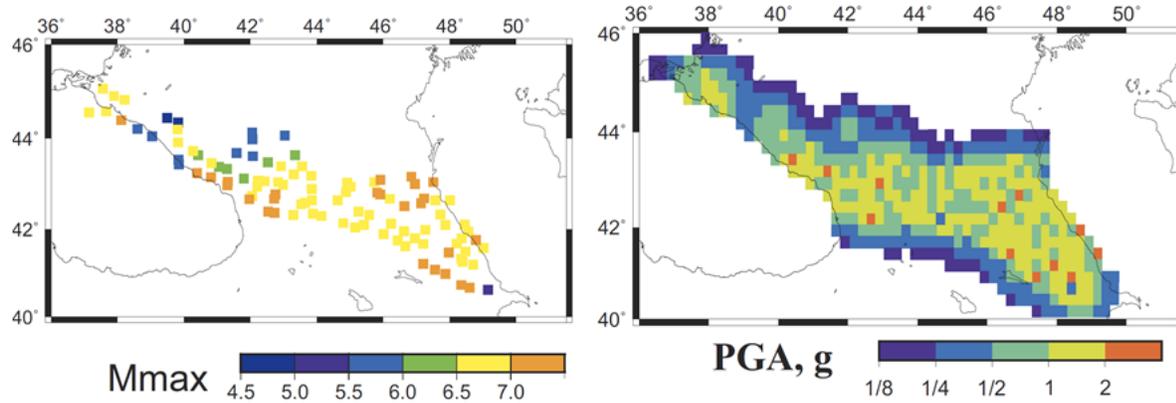


Рис. 3: Карты расчетных оценок  $M_{max}$  и PGA.

упрощенной схеме с использованием эмпирической формулы затухания ускорения вызванного землетрясением магнитуды  $M_{max}$ , полученной по результатам нео-детерминистского моделирования [Parvez et al. 2003],  $\text{Acc}(M_{max}, D) = \text{const} \times g \times D^{-1,5} \times \exp(M_{max} - 5)$ , где  $D$  - расстояние от источника до приемника на регулярной сетке  $0,25 \times 0,25^\circ$ ,  $\text{const} = 6 \times 4,8$ ,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - постоянная силы тяжести, а  $\exp(X)$  - основание натуральных логарифмов  $e$  в степени  $X$ . Следует заметить, что лишь в местах возникновения 5 из 344 землетрясений с магнитудой от 5 и выше в период с 550 до н.э. на территории Северного Кавказа [Kondorskaya et al., 1982] сейсмическая опасность, возможно, недооценена на картах, приведенных на рис. 3. Причем, недооценка  $M_{max}$  лишь в случае Шемахинского землетрясения 1668 г. ( $M = 7,8 \pm 0,5$ ,  $M_{max} = 7,1$ ) превышает точность определения магнитуды.

Карты модельных рисков для населения на территории Северного Кавказа опубликованы в работе [Kosobokov and Nekrasova 2018]. При этом рассмотрены риски  $R_{ii}(s) = H(s) \times \int_s P \times P$  и  $R_{iv}(s) = H(s) \times \int_s P \times P^3$ , где  $P$  - плотность населения,  $\int_s P$  - интеграл от плотности населения в ячейке  $s$ , т. е. число лиц, находящихся на площади ячейки  $s$ . Оценка риска  $R_{ii}(s)$  различает персональную уязвимость, линейно-пропорционально возрастающую с плотностью населения в данном месте, а  $R_{iv}(s)$  - нелинейно возрастающую. Предположения об уязвимости представляются довольно естественными в силу специфики инфраструктуры, определяемой численностью и плотностью населения в районах его высокой концентрации (в качестве примера может служить этажность и категории типичных построек).

В Таблице 2 приведены оценки сейсмической опасности и рисков для населения крупнейших городов Северного Кавказа и прилегающих областей. Как и следовало ожидать значения рисков коррелированы с населением города и анти-коррелированы с его площадью.

Чтобы избежать вводящие в заблуждение контрпродуктивные интерпретации, необходимо подчеркнуть, что оценки риска на рассматриваемой территории приведены здесь исключительно в научных-методологических целях. Эти оценки не используют более сложные, комплексные процедуры, которые могут быть более адекватными свертками опасности объектов риска и их уязвимости. Оценки риска используются здесь лишь для иллюстрации общего проблемно-ориентированного подхода. В практических, а значит, реалистичных оценках сейсмических рисков, очевидно, должны участвовать эксперты в области распределения сейсмической опасности и объектов риска разной уязвимости, т.е. специалисты по сейсмозонированию, инженерной сейсмологии, социальным и экономическим наукам.

Максимальная магнитуда ожидаемого землетрясения для сейсмоопасных мест может быть реалистично оценена с высокой достоверностью. Подготовка к максимально возможным опасным событиям позволяет снизить масштаб или даже избежать возможные бедствия. Человеческие жертвы не связаны напрямую с сейсмическим событием, они связаны с его послед-

Город	Население	S, км <sup>2</sup>	PGA, g	R <sub>ii</sub> , au	R <sub>iv</sub> , au
Краснодар	853,848	339	0.41	746	436
Махачкала	587,876	468	1.19	739	108
Ставрополь	429,571	172	0.08	73	42
Сочи	401,291	177	0.81	618	293
Владикавказ	307,478	291	1.34	368	38
Грозный	287,410	324	1.93	415	30
Новороссийск	266,977	81	1.35	1000	1000
Нальчик	239,040	67	0.81	585	687
Пятигорск	145,448	97	0.43	78	16
Майкоп	144,055	59	0.54	161	90
Хасавюрт	138,420	40	1.22	492	544
Кисловодск	129,993	72	0.70	138	42
Черкесск	123,128	70	0.62	113	32
Дербент	122,354	70	1.61	292	83
Невинномысск	117,891	100	0.32	37	5
Назрань	113,288	80	1.15	155	29
Каспийск	110,080	33	1.14	353	364
Ессентуки	105,881	50	0.33	63	26

Таблица 2: Сейсмическая опасность и риски для городов Северного Кавказа и прилегающих областей с населением более 100 тыс. человек. Примечание: Значения рисков даны в условных единицах (au), нормированных пропорционально максимальному значению 1000.

ствиями, например, с цунами, оползнями, обрушением зданий, мостов и других сооружений. Сценарии последствий катастрофического события, основанные на результатах недетерминистских расчетов, служат основанием для принятия необходимых упреждающих мер безопасности, начиная с планирования землепользования и регулирования строительных норм и заканчивая управлением в условиях чрезвычайных ситуаций. Есть много рисков, связанных с землетрясениями. Они не должны игнорироваться при любой реалистичной и ответственной оценке сейсмической опасности и при осознанно-оптимальном выборе мер по предотвращению стихийных бедствий.

## 5. Заключение

Методология решения задачи РМСЗ вместе с оценкой сейсмической опасности и рисков на основе применения ОЗПЗ позволяет создать научную основу для выработки мероприятий по сокращению ущерба от природных катастроф, связанных с землетрясениями.

Оценки сейсмической опасности конкретных мест могут быть оперативно уточнены с помощью результатов, получаемых от алгоритмов прогноза времени землетрясений, созданных на основе подходов распознавания образов.

Алгоритмы распознавания образов оказываются эффективными при решении различных геофизических задач, связанных с анализом временных рядов, возникающих, в частности, при обработке сейсмограмм и записей сильных движений, а также геомагнитных данных.

Отметим, что алгоритмическая система определения высокосейсмичных зон FCAZ и ее модификации относятся к методологии перспективного системного анализа, поскольку в ре-

зультате их применения высокосейсмичные зоны определяются четко и однозначно как части объемлющего их целого и отделяются от нечеткого дополнения однозначно определенной и воспроизводимой границей. Система FCAZ обладает другим характерным свойством системного анализа – инвариантностью по отношению к масштабам изучаемых подобных явлений. Иными словами метод адаптируется, «настраивается» под данную «степень подобия» исследуемой системы.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н. Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях // Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция, г. Петрозаводск, 11-17 сентября metricconverterProductID2011 г2011 г.: Сборник докладов. М.: 2011. С. 543-546.
3. Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Ранцман Е.Я. Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1977. С. 33-49 (Вычисл. сейсмология; Вып. 10).
4. Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука. 1967. 320 с.
5. Бхатия С.С., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Рао М.Н., Филимонов М.Б., Четти Т.Р.К. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVIII. Гималаи, ( $M \geq 6,5$ ) // Проблемы прогноза землетрясений и интерпретация сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1992. С. 71-83 (Вычисл. сейсмология; Вып. 25).
6. Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ламбер С., Ранцман Е.Я., Саллантен Ж., Сальдано А., Систернас А., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мест возможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // Теория и анализ сейсмологической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1985. С. 139-154. (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).
7. Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Ламбер Ж., Соловьев А.А., Трусов А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIII. Неотектоническая схема Западных Альп.  $M \geq 5,0$  // Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1986. С. 82-94. (Вычисл. сейсмология; Вып. 19).
8. Габриэлов А.М., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. Опыт морфоструктурного районирования по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1977. С. 50-58 (Вычисл. сейсмология; Вып. 10).
9. Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Жидков М.П. Формализованное морфоструктурное районирование горного пояса Анд // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1982. С. 38-56. (Вычисл. сейсмология; Вып. 14).

10. Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Исследование мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса с помощью алгоритмов распознавания // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. №9. С. 31-42.
11. Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Распознавание мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса ( $M > 8,2$ ) // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1980. С. 30-44. (Вычисл. сейсмология; Вып. 13).
12. Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. К обоснованию результатов прогноза мест сильных землетрясений, полученных методами распознавания // Известия АН СССР. Физика Земли. 1981. №2. С. 21-36.
13. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1981. С. 46-50 (Вычисл. сейсмология; Вып. 13).
14. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. X. Места землетрясений магнитуды  $M \geq 7,75$  на Тихоокеанском побережье Южной Америки. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1982. С. 56-67 (Вычисл. сейсмология; Вып. 14).
15. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. К решению задачи прогноза мест возникновения сильных землетрясений на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №1. С. 86-87.
16. Гвишиани А.Д. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. I. Юго-Восточная Европа и Малая Азия // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №8. С. 13-19.
17. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. II. Восток Средней Азии // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №9. С. 30-38
18. Гвишиани А.Д. Формализованный анализ линеаментов в связи с задачей прогноза землетрясений // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука. 1983. С. 181-190.
19. Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. О выборе порога магнитуды для классификации мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1983. С. 74-80 (Вычисл. сейсмология; Вып. 15).
20. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Известия АН СССР. Физика Земли. 1984. №1. С. 20-33.
21. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. I. Условия стабильности для прогноза мест сильных землетрясений // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1984а. С. 70-78 (Вычисл. сейсмология; Вып. 16).

22. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. II. Стабилизирующие множества и локальная стабильность прогноза мест сильных землетрясений // Логические и вычислительные методы в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1984б. С. 29-36 (Вычисл. сейсмология; Вып. 17).
23. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Саллантен Ж., Сальдано А., Систернас А. Результаты советско-французских исследований по распознаванию высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. №6. С.1353-1358.
24. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А., Расцветаев А.Л. Динамические задачи распознавания образцов. III. Исследование стабильности прогноза мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского подвижного пояса // Теория и анализ сейсмологической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1985а. С. 117-127 (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).
25. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ранцман Е.Я., Соловьев А.А. Места возможных землетрясений с  $M \geq 5,0$  в Западных Альпах // Основные проблемы сейсмо тектоники. М. 1985б. С. 83-91.
26. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ранцман Е.Я. Морфоструктуры и места землетрясений Большого Кавказа // Известия АН СССР. Физика Земли. 1986. №9. С. 45-55.
27. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г. Распознавание высокосейсмичных зон в Пиренеях // Докл. АН СССР. 1987а. Т. 292. №1. С. 56-59.
28. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Систернас А., Филип Э. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIV. Пиренеи и Альпы // Численное моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1987б. С. 123-135 (Вычисл. сейсмология; Вып. 20).
29. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Жидков М.П., Ранцман Е.Я., Трусов А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XV. Морфоструктурные узлы Большого Кавказа,  $M \geq 5,5$  // Численное моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1987в. С. 136-148 (Вычисл. сейсмология; Вып. 20).
30. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М: Наука. 1988а. 176 с.
31. Гвишиани А.Д., Жижин М.Н., Тумаркин А.Г. Распознавание интенсивности по динамическим параметрам акселерограмм // Вопросы инженерной сейсмологии. 1988б. Т. 29. С. 73-80.
32. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVI. Общие критерии умеренной сейсмичности четырех регионов Средиземноморской области ( $M \geq 5,0$ ) // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1989. С. 211-221 (Вычисл. сейсмология; Вып. 22).
33. Гвишиани А.Д., Жижин М.Н., Иваненко Т.И. Синтаксический анализ записей сильных движений // Компьютерный анализ геофизических полей / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1990. С. 235-253 (Вычисл. сейсмология; Вып. 23).

34. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А.. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука. 1992. 360 с.
35. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002а. №2. С. 104-122.
36. Гвишиани А.Д., Диамант М., Михайлов В.О., Гальдеано А., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Граева Е.М. Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. 2002б. №7. С. 13-28.
37. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. 2008. №5. С. 26-31.
38. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. №2. С. 109-125.
39. 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. 2013а. №2. С. 44-57.
40. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013б. №6. С. 3–19.
41. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FSAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016, №4. С. 3–23. doi: 10.7868/S0002333716040013.
42. Гвишиани А.Д., Дзобоев 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. 2017а. №3. С. 33–42. doi: 10.7868/S0002333717030036.
43. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Вавилин Е.В. Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье-Забайкалье // ДАН. 2017б. Т. 477. №6. С. 704–710. doi: 10.7868/S0869565217360178.
44. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзобоев Б.А., Белов И.О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // ДАН. 2017в. Т. 474. №1. С. 86–92. doi: 10.7868/S0869565217130175.
45. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Сергеева Н.А., Белов И.О., Рыбкина А.И. Зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны // Физика Земли. 2018. №3. С. 18–28. doi: 10.7868/S000233371803002X.
46. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. №6. С. 1317-1320.
47. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1973. С. 107-133 (Вычисл. сейсмология. Вып. 6).

48. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы // Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1974а. С. 3-40 (Вычисл. сейсмология; Вып. 7).
49. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. III. Случай, когда границы дизъюнктивных узлов неизвестны // Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1974б. С. 41-64 (Вычисл. сейсмология; Вып. 7).
50. 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) // Исследование сейсмичности и моделей Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1976. С. 3-91 (Вычисл. сейсмология. Вып. 9).
51. Гласко М.П., Ранцман Е.Я. О морфоструктурных узлах – местах активизации современных рельефообразующих процессов // Геоморфология. 1992. №4. С. 53-61.
52. Горшков А.И., Капуто М., Кейлис-Борок В.И., Офицерова Е.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IX. Италия ( $M \geq 6,0$ ) // Теория и анализ сейсмологических наблюдений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1979. С. 3-17 (Вычисл. сейсмология; Вып. 12).
53. Горшков А.И., Жидков М.П., Ранцман Е.Я., Тумаркин А.Г. Морфоструктура Малого Кавказа и места землетрясений,  $M \geq 5,5$  // Известия АН СССР. Физика Земли. 1991. №6. С. 30-38.
54. Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД. 2010. 472 с. (Вычисл. сейсмология; Вып. 40).
55. Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. №6. С. 21-27, doi:10.7868/S0203030617060025.
56. Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье // ДАН. 2018. Т. 479. №3. С. 333-335, doi:10.7868/S0869565218090219.
57. Гурвич В.А., Кособоков В.Г. О связи вулканизма и перепада высот с эпицентрами сильнейших землетрясений. Математическое моделирование и интерпретация сейсмических данных. / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1984. С. 88-93 (Вычисл. сейсмология; Вып. 16).
58. Жидков М.П., Кособоков В.Г. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIII. Пересечения линейментов востока Средней Азии. Интерпретация данных сейсмологии и геотектоники / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1978. С. 48-71 (Вычисл. сейсмология; Вып. 11).
59. Жидков М.П., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVII. Общие критерии высокой сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки ( $M \geq 7,0$ ) // Компьютерный анализ геофизических полей

- / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука, 1990. С. 274-284 (Вычисл. сейсмология; Вып. 23).
60. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. О подобии в пространственном распределении сейсмичности. Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1989. С. 28-40 (Вычисл. сейсмология; Вып. 22).
61. Кособоков В. Г., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VI. Магнитуда  $M \geq 7,0$  // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: Наука. 1977. С. 3-18 (Вычисл. сейсмология; Вып. 10).
62. Кособоков В. Г. Распознавание мест сильных землетрясений востока Средней Азии и Анатолии методом Хемминга // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А.Л. М.: Наука. 1982. С. 76-81 (Вычисл. сейсмология; Вып. 14).
63. Кособоков В.Г., Мажкенов С.А. Интенсивность потока землетрясений в очаговой области // Доклады Академии наук Республики Казахстан, 1992, №1. С. 53-57.
64. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров // Анализ геодинамических и сейсмических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Молчана Г.М. М.: ГЕОС, 2004. С. 160-175 (Вычисл. сейсмология; Вып. 35).
65. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. №1. С. 65-76.
66. Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // ДАН. 2015. Т. 460. №6. С. 710-712, doi:10.7868/S0869565215060213.
67. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука. 1979. 170 с.
68. Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г. Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985-2000. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности / Под ред. Молчана Г.М., Наймарка Б.М. и Левшина А.Л. М.: ГЕОС, 2001. С. 162-189 (Вычисл. сейсмология; Вып. 32).
69. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф., О свойстве дискретности горных пород. Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №12. С. 3-18.
70. Садовский, М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности. Известия АН СССР. Физика Земли. 1984. №2. С. 3-15.
71. Соловьев А.А., Новикова О.В., Горшков А.И., Пиотровская Е.П. Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // ДАН. 2013. Т. 450. №5. С. 599-601, doi:10.7868/S0869565213170222.

72. 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, doi:10.7868/S0002333714020112.
73. Соловьев Ал.А., Горшков А.И., Соловьев Ан.А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // *Физика Земли*. 2016. №6. С. 21-27, doi:10.7868/S0002333716050148.
74. Соловьев А.А., Горшков А.И. Моделирование динамики блоковой структуры и сейсмичности Кавказа // *Физика Земли*. 2017. №3. С. 3-13, doi:10.7868/S0002333717030127.
75. Федеральная служба государственной статистики, 2016. Население Российской Федерации для муниципалитетов на 1 января 2016 года. ФССС: Москва, Российская Федерация, [http://www.gks.ru/free\\_doc/doc\\_2016/bul\\_dr/mun\\_obr2016.rar](http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/bul_dr/mun_obr2016.rar).
76. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир. 1977. 319 с.
77. Alekseevskaya M. A., Gabriellov A. M., Gvishiani A. D., Gelfand I. M., Ranzman E. Ya. Formal morphostructural zoning of mountain territories // *J. Geophys.* 1977. Vol. 43. P. 227-233.
78. Bak P., Christensen K., Danon L., Scanlon T. Unified scaling law for earthquakes // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 88. P. 178501-178504.
79. Beauval C., Bard P.-Y., Hainzl S., Gue ´guen P. Can strong-motion observations be used to constrain probabilistic seismic-hazard estimates? // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2008. Vol. 98, №2. P. 509-520, doi:10.1785/0120070006.
80. Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes // *Reviews of Geophysics*. 2008. Vol. 46, № 4. P. RG4006, doi:10.1029/2008RG000260.
81. Bhatia S. C., Chetty T. R. K., Filimonov M., Gorshkov A., Rantsman E., Rao M. N. Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan arc region // *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*. 1992. Vol. 101, №4. P. 369-385.
82. Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzman E., Rotwain I., Solovjeff A. Pattern recognition of earthquake-prone areas in Italy // *Phys. Earth Planet Int.* 1980. Vol. 21. P. 305-320.
83. Cisternas, A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A.I., Kossobokov V., Lambert M., Ranzman E., Sallantin J., Soldano H., Soloviev A., Weber C. A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the western Alps // *Annales Geophysicae*. 1985. Vol. 3, №2. P. 249-270.
84. Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A. Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness // *Int. J. Disaster Risk Reduction*. 2012. Vol. 1. P. 17-32, doi:10.1016/j.ijdr.2012.03.001.
85. Dubois J., Gvishiani A. *Dynamic Systems and Dynamic Classification Problems in Geophysical Applications*. Paris: Springer-Verlag. 1998. 256 p.
86. Gelfand I. M., Guberman Sh., Izvekova M. L., Keilis-Borok V. I., Ranzman E. Ia. Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // *Tectonophysics*. 1972. Vol. 13, №1-4. P. 415-422.

87. Gelfand I. M., Guberman Sh. A., Keilis-Borok V. I., Knopoff L., Press F., Ranzman I. Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1976. Vol. 11. P. 227-283.
88. Giardini, D. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) – 1992/1999 // *Ann. Geophys.* 1999. Vol. 42. P. 957-974.
89. Gorshkov A. I., Panza G. F., Soloviev A. A., Aoudia A. Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // *J. Seismol. Earthquake Engineering*, 2002. Vol. 4, №1. P. 1-24.
90. Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A. Recognition of Earthquake-Prone Areas // *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction* / Keilis-Borok V. I., Soloviev A. A. (eds). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2003. P. 239-310.
91. Gorshkov A. I., Panza G. F., Soloviev A. A., Aoudia A. Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // *Bolletino della Societa Geologica Italiana*. 2004. Vol. 123, №1. P. 3-18.
92. Gorshkov A. I., Panza G. F., Soloviev A. A., Aoudia A., Peresan A. Delineation of the geometry of nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes ( $M \geq 6$ ) // *Terra Nova*. 2009. Vol. 21. P. 257-264.
93. Gorshkov A. I., Soloviev A. A., Jiménez M. J., García-Fernández M., Panza G. F. Recognition of earthquake-prone areas ( $M \geq 5.0$ ) in the Iberian Peninsula // *Rendiconti Lincei*. 2010. Vol. 21, №2. P. 131-162.
94. Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3), 2005. CityPalisades, StateNY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), [placePlaceNameColumbiaPlaceTypeUniversity, http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw](http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw).
95. Gvishiani A. D. Earthquake-prone areas in the Andes // *Revista Geofisica Instituto Panamericano de Geografia e Historia*. 1982a. №17. P. 105-111.
96. Gvishiani A. D. Prevision des tremblements de terre et stabilite de la classification. Presentee par Jean Coulomb. // *Compte-rendus a l'Academi Sciences*. [placeCityParis](http://placeCityParis). 1982b. Vol. 294, serie 11. P.749-752.
97. Gvishiani A. D., Soloviev A. A. Recognition of places on the Pacific coast of the South America where strong earthquakes may occur // *Earthquake. Predict. Res.* 1984. Vol. 2. P. 237-243.
98. Gvishiani A., Gorshkov A., Kossobokov V., Cisternas A., Philip H., Weber C. Identification of seismically dangerous zones in the Pyrenees // *Annales Geophysicae*. 1987. Vol. 5B, №6. P. 681-690.
99. Gvishiani A., Tumarkin A. G., Zhizhin M. N., Schenk V. Pattern recognition of the macroseismic significance of the parameters of strong earth tremors // *Seismic Risk Assessment and Design of Building Structures*. Omega Scientific. 1988.
100. Gvishiani A., Bonnin J., Zhizhin M., Mohammadioun B. Strong motion data classification using syntactic pattern recognition // *Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation*. Stanford, California. 1991. Vol. 2. P. 549-555.

101. Gvishiani A., Zhizhin M., Rouland D., Mohammadioun B., Bonnin J. Identification of a geological region for earthquakes using syntactic pattern recognition of seismograms // *Natural Hazards*. 1994. Vol. 10. P. 139-147.
102. Gvishiani A., Zhizhin M., Rouland D., Mohammadioun B., Bonnin J., Madariaga R. Syntactic pattern recognition scheme (SPARS) applied to seismological waveforms analysis // *Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*. 1995. Vol. 9. P. 17-26.
103. Gvishiani A., Zhizhin M., Dubois J., Battaglia J. Syntactic recognition of magnetic anomalies along the Mid-Atlantic Ridge // *C.R. Acad. Sci. Paris. Sciences de la terre et des planets / Earth & Planetary Sciences*. 1997. P. 983-990.
104. Gvishiani A., Dubois J. *Artificial Intelligence and Dynamic Systems for Geophysical Applications*. Springer-Verlag, CityplaceParis. 2002. 350 p.
105. Gvishiani A. D., Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Tikhotsky S. A., Hinderer J., Bonnin J., Diamant M. Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies // *System Research & Information Technologies*. 2004. №3. P. 7-16.
106. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B. Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013. Vol. 12. №1. P. 1-10.
107. Keilis-Borok V. I., Kossobokov V. G. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol. 61, №1-2. P. 73-83.
108. Keilis-Borok V. I., Rotwain I. M. Diagnosis of Time of Increased Probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990, Vol. 61, №1-2. P. 57-72.
109. Kondorskaya N. V., Shebalin N. V., Khrometskaya Ya. A., Gvishiani A. D. New catalog of strong earthquakes in the U.S.S.R. from ancient times through 1977. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-31, 1982. 609 p.
110. Kossobokov V. G., Romashkova L. L. Seismicity dynamics prior to and after the largest earthquakes worldwide, 1985-2000. In D.K.Chowdhury (ed.), *Computational Seismology and Geodynamics*. Volume 7. Am. Geophys. CityplaceUn., StateWashington, D.C., 2005. P. 138-160, doi:10.1029/CS007p0138.
111. Kossobokov V. G., Lepreti F., Carbone V. Complexity in sequences of Solar flares and earthquakes // *Pure Appl. Geophys.* 2008, Vol. 165, №3-4. P. 761-775, doi:10.1007/s00024-008-0330-z
112. Kossobokov V. G. Earthquake prediction: 20 years of global experiment // *Natural Hazards*. 2013. Vol. 69. P. 1155-1177, doi:10.1007/s11069-012-0198-1.
113. Kossobokov V., Peresan A., Panza G. F. Reality check: Seismic hazard models you can trust // *EOS. Earth & Space Sci. News*, July 2015. Vol. 96, №13. P. 9-11, doi:10.1029/2015EO031919.
114. Kossobokov V. G., Nekrasova A. K. Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea // *J. Seismology*. 2018. Vol. 22. P. 1157-1169, doi:10.1007/s10950-018-9759-4.

115. Nekrasova A., Kossobokov V., Peresan A., Magrin A. The comparison of the NDSHA, PSHA seismic hazard maps and real seismicity for the Italian territory // *Natural Hazards*. 2014. Vol. 70, №1. P. 629-641, doi:10.1007/s11069-013-0832-6.
116. Nekrasova A., Kossobokov V., Parvez I. A., Tao X. Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes // *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2015. Vol. 50, №1. P. 21-37, doi:10.1007/s40328-014-0082-4.
117. Okubo P. G., Aki K. Fractal geometry in the San Andreas Fault system // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92, №B1. P. 345-356.
118. Panza G. F., Romanelli F., Vaccari F. Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation // *Adv. Geophys.* 2001. Vol. 43. P. 1-95.
119. Panza G., Irikura K., Kouteva-Guentcheva M., Peresan A., Wang Z., Saragoni R. (Eds.), *Advanced Seismic Hazard Assessment* // *Pure Appl. Geophys.* 2011. Vol. 168, №1-4. P. 1-752.
120. Panza G. F., Peresan A., La Mura C. Seismic hazard and strong ground motion: an operational neo-deterministic approach from national to local scale // UNESCO-EOLSS Joint Committee (Ed.), *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Geophysics and Geochemistry*. Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, CityOxford, UK. 2013. P. 1-49.
121. Panza G. F., Kossobokov V., Peresan A., Nekrasova A. Chapter 12. Why are the standard probabilistic methods of estimating seismic hazard and risks too often wrong? // *Earthquake Hazard, Risk, and Disasters* / Wyss M., Shroder J. (eds). Elsevier, London. 2014. P. 309-357.
122. Parvez I. A., Vaccari F., Panza G. F. A deterministic seismic hazard map of India and adjacent areas // *Geophys. J. Int.* 2003. Vol. 155. P. 489-508.
123. Paskaleva I., Dimova S., Panza G. F., Vaccari F. An earthquake scenario for the microzonation of Sofia and the vulnerability of structures designed by use of the Eurocodes // *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 2007. Vol. 27. P. 1028-1041.
124. Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F., Gorshkov A., Panza G.F. Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy // *Pure Appl. Geophys.* 2011. Vol. 168, №3-4. P. 583-607, doi:10.1007/s00024-010-0166-1.
125. Rotwain I., Novikova O. Performance of the earthquake prediction algorithm CN in 22 regions of the world // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol. 111, №3-4. P. 207-213.
126. Shearer P.M. Self-similar earthquake triggering, Bath's law, and foreshock/aftershock magnitudes: Simulations, theory, and results for southern California // *J. Geophys. Res. – Solid Earth*. 2012. Vol. 117, №B6, doi:10.1029/2011jb008957.
127. Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R. S. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // *J. Phys. Earth*. 1995. Vol. 43, №1. P. 1-33.
128. Vaccari F., Peresan A., Zuccolo E., Romanelli F., Marson C., Fiorotto V., Panza G. F. Neo-deterministic seismic hazard scenarios: application to the engineering analysis of historical buildings // *Proceedings of PROHITECH 2009-Protection of Historical Buildings Mazzolani*. Taylor & Francis Group, London. 2009. P. 1559-1564.

129. Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 62, №3. P. 927-935, doi:10.1007/s11069-012-0125-5.

## REFERENCES

1. Agayan, S. M. & Soloviev, A. A. 2004, "Separation of dense areas in metric spaces on the basis of crystallization", *System Res. Inform. Technol.*, no. 2, pp. 7-23.
2. Agayan, S. M., Bogoutdinov, Sh. R. & Dobrovolsky, M. N. 2011, "On an algorithm for finding dense areas and its geophysical applications", *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov: 15 Vserossiiskaya Konferentsiya, Petrozavodsk, 11-17 sentyabrya 2011, Sbornik dokladov* (Mathematical Methods of Pattern Recognition. The 15<sup>th</sup> All-Russian Conference, Petrozavodsk, 11-17 Sept. 2011, Collection of reports). Moscow, 2011, pp. 543-546.
3. Alekseevskaya, M. A., Gabriellov, A. M., Gvishiani, A. D., Gelfand, I. M. & Ranzman, E. Ya. 1977, "Morphostructural zoning of mountain territories according to formalized criterions", *Raspoznavanie i spektralnyui analiz v seismologii* (Recognition and Spectral Analysis in Seismology), Nauka, Moscow, pp. 33-49 (Comput. Seismol., 10).
4. Bongard, M. M. 1967, *Problema uznvaniya* (Classification Problem), Nauka, Moscow.
5. Bhatia, S. G., Gorshkov, A. I., Rantsman, E. Ya., Rao, M. N., Filimonov, M. B. & Chetty, T. R. K. 1992, "Recognition of earthquake-prone areas. XVIII. The Himalaya ( $M \geq 6.5$ )", *Problemy prognoza zemletryaseni i interpretatsiya seismologicheskikh dannyykh* (Problems in Earthquake Prediction and Interpretation of Seismological Data), Nauka, Moscow, pp. 71-83 (Comput. Seismol.; 25).
6. Weber, C., Gvishiani, A. D., Godefroy, P., Gorshkov, A. I., Kossobokov, V. G., Lambert, M., Ranzman, E. Ya., Sallantin, J., Soldano, H., Cisternas, A. & Soloviev, A. A. 1985, "Recognition of earthquake-prone areas. XII. Two approaches to identification of strong earthquake prone areas in the Western Alps", *Teoriya i analiz seismologicheskoi informatsii* (Theory and Analysis of Seismological Information), Nauka, Moscow, pp. 139-154 (Comput. Seismol.; 18).
7. Weber, C., Gvishiani, A. D., Godefroy, P., Lambert, M., Soloviev, A. A. & Trusov, A. V. 1986, "Recognition of earthquake-prone areas. XIII. Neotectonic scheme of the western Alps", *Matematicheskie metody v seismologii i geodinamike* (Mathematical Methods in Seismology and geodynamics), Nauka, Moscow, pp. 82-94 (Comput. Seismol.; 19).
8. Gabriellov, A. M., Gorshkov, A. I., & Ranzman, E. Ya. 1977, "The experience of morphostructural zoning according to formalized features", *Raspoznavanie i spektralnyui analiz v seismologii* (Recognition and Spectral Analysis in Seismology), Nauka, Moscow, pp. 50-58 (Comput. Seismol., 10).
9. Gabriellov, A. M., Gvishiani, A. D. & Zhidkov, M. P. 1982 "Formalized morphostructural zoning of the Andes mountain belt", *Matematicheskie modeli stroeniya Zemli i prognoza zemletryaseni* (Mathematical Models of Earth Structure and Earthquake Prediction), Nauka, Moscow, pp. 38-56 (Comput. Seismol., 14).
10. Gvishiani, A. D., Zelevinsky, A. V., Keilis-Borok, V. I. & Keilis-Borok, V. I., Kossobokov, V. G. 1978, "Study of the violent earthquake occurrence in the Pacific Ocean Belt with the help of recognition algorithms", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 9, pp. 31-42.

11. Gvishiani, A. D., Zelevinsky, A. V., Keilis-Borok, V. I. & Keilis-Borok, V. I., Kossobokov, V. G. 1980, "Recognition of strongest earthquake prone areas of the Pacific Ocean Belt", *Metody i algoritmy interpretatsii seismologicheskikh dannyukh* (Methods and Algorithms of Seismological Data Interpretation), Nauka, Moscow, pp. 30-44 (Comput. Seismol., 13).
12. Gvishiani, A. D. & Kossobokov, V. G. 1981, "On foundations of the pattern recognition results applied to earthquake-prone areas", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 2, pp. 21-36.
13. Gvishiani, A. D. & Soloviev, A. A. 1981, "Association of the epicenters of strong earthquakes with the intersections of morphostructural lineaments in South America", *Metody i algoritmy interpretatsii seismologicheskikh dannyukh* (Methods and Algorithms of Seismological Data Interpretation), Nauka, Moscow, pp. 46-50 (Comput. Seismol., 13).
14. Gvishiani, A. D., Zhidkov, M. P. & Soloviev, A. A. 1982, "Recognition of earthquake-prone areas. X. Places of earthquakes of magnitude  $M \geq 7,75$  on the Pacific coast of South America", *Matematicheskie modeli stroeniya Zemli i prognoza zemletryaseniï* (Mathematical Models of Earth Structure and Earthquake Prediction), Nauka, Moscow, pp. 56-67 (Comput. Seismol., 14).
15. Gvishiani, A. D. & Soloviev, A. A. 1982, "To the solution of the problem of predicting places of occurrence of strong earthquakes on the Pacific coast of South America", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 1, pp. 86-87.
16. Gvishiani, A. D. 1982, "Stability in time of the identification of places of strong earthquakes. I. South-Eastern Europe and Asia Minor", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 8, pp. 13-19.
17. Gvishiani, A. D. & Gurvich, V. A. 1982, "Stability in time of the identification of places of strong earthquakes.II. East of Central Asia", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 9, pp. 30-38.
18. Gvishiani, A. D. 1983, Formalized analysis of lineaments in connection with the problem of earthquake prediction", *Eksperimentalnaya seismologiya* (Experimental Seismology), Nauka, Moscow, pp. 181-190.
19. Gvishiani, A. D. & Kossobokov, V. G. 1983, "On the selection of the magnitude threshold for the classification of places of the strongest earthquakes in the Pacific Ocean Seismic Belt", *Prognoz zemletryaseniï i izuchenie stroeniya Zemli* (Earthquake Prediction and Earth Structure Study), Nauka, Moscow, pp. 74-80 (Comput. Seismol., 15).
20. Gvishiani, A. D., Zhidkov, M. P. & Soloviev, A. A. 1984, "To the transfer of criteria for high seismicity of the Andes mountain belt to Kamchatka", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 9, pp. 20-33.
21. Gvishiani, A. D. & Gurvich, V. A. 1984a, "Dynamic pattern recognition problems. I. Stability conditions for the forecast of places of strong earthquakes", *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsiya geofizicheskikh dannyukh* (Mathematical Modeling and Interpretation of Geophysical Data), Nauka, Moscow, pp. 70-78 (Comput. Seismol., 16).
22. Gvishiani, A. D. & Gurvich, V. A. 1984b, "Dynamic pattern recognition problems. II. Stabilizing sets and local stability of the identification of places of strong earthquakes", *Logicheskie i vyuchislitelnyue metody v sesmologii* (Logical and Computational Methods in Seismology), Nauka, Moscow, pp. 29-36 (Comput. Seismol., 17).

23. Gvishiani, A. D., Soloviev, A. A., Sallantin, J., Soldano, H. & Cisternas, A. 1984, "Results of Soviet-French studies on the recognition of high seismic zones in the Western Alps", *Doklady Acad. Sci. SSSR*, vol. 275, no. 6, pp. 1353-1358.
24. Gvishiani, A. D., Gurvich, V. A. & Rastsvetaev, A. L. 1985a, "Dynamic pattern recognition problems. III. Study of the stability of the identification of the strongest earthquake places of the Pacific Ocean Mobile Belt", *Teoriya i analiz seismologicheskoi informatsii* (Theory and Analysis of Seismological Information), Nauka, Moscow, pp. 117-127 (Comput. Seismol., 18).
25. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Kossobokov, V. G., Ranzman, E. Ya. & Soloviev, A. A. 1985b, "Places of possible earthquakes with  $M \geq 5.0$  in the Western Alps", *Osnovnyue problemy seismotektoniki* (The Main Problems of Seismotectonics), Moscow, pp. 83-91.
26. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Kossobokov, V. G. & Ranzman, E. Ya. 1986, "Morphostructures and places of earthquakes of the Greater Caucasus", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 9, pp. 45-55.
27. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I. & Kossobokov, V. G. 1987a, "Recognition of high seismic zones in the Pyrenees", *Doklady Acad. Sci. SSSR*, vol. 292, no. 1, pp. 56-59.
28. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Kossobokov, Cisternas, A. & Philip, H. 1987b, "Recognition of earthquake-prone areas. XIV. The Pyrenees and the Alps", *Chislennoe modelirovanie i analiz geofizicheskikh protsessov* (Numerical Modeling and Analysis of Geophysical Processes), Nauka, Moscow, pp. 123-135 (Comput. Seismol.; 20).
29. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Zhidkov, M. P., Ranzman, E. Ya. & Trusov, A. V. 1987b, "Recognition of earthquake-prone areas. XV. Morphostructure nodes of the Greater Caucasus,  $M \geq 5.5$ ", *Chislennoe modelirovanie i analiz geofizicheskikh protsessov* (Numerical Modeling and Analysis of Geophysical Processes), Nauka, Moscow, pp. 136-148 (Comput. Seismol.; 20).
30. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Ranzman, E. Ya., Cisternas, A. & Soloviev, A. A. 1988a, *Prognozirovanie mest zemletryasenii v regionakh umerennoi seismichnosti* (Identification of Earthquake-prone Areas in the Regions of Moderate Seismicity), Nauka, Moscow.
31. Gvishiani, A. D., Zhizhin, M. N. & Tumarkin, A. G. 1988b, "Intensity recognition by dynamic parameters of accelerograms", *Voprosy inzhenernoi seismologii*, vol. 29, pp. 73-80.
32. Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Tumarkin, A. G. & Filimonov, M. B. 1989, "Recognition of earthquake-prone areas. XVI. The general criteria for the moderate seismicity of the four regions of the Mediterranean region ( $M \geq 5.0$ )", *Teoriya i algoritmy interpretatsii geofizicheskikh dannyykh* (Theory and Algorithms for Geophysical Data Interpretation), Nauka, Moscow, pp. 211-221 (Comput. Seismol.; 22).
33. Gvishiani, A. D., Zhizhin, M. N. & Ivanenko, T. I. 1990, "Syntactic pattern recognition of strong motion waveforms", *Comp'yuternyyi analiz geofizicheskikh polei* (Computer Analysis of Geophysical Fields), Nauka, Moscow, pp. 235-253 (Comput. Seismol.; 23).
34. Gvishiani, A. D. & Gurvich, V. A. 1992, *Dinamicheskie zadachi klassifikatsii i vyupukloe programmirovaniye v prilozheniyakh* (Dynamic Classification Problems and Convex Programming in Applications), Nauka, Moscow.
35. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M. & Bogoutdinov, Sh. R. 2002a, "On a New Approach to Clustering", *Cibernetika i sistemnyui analiz* (Cybernetics and Systems Analysis), no. 2, pp. 104-122.

36. Gvishiani, A. D., Diament, M., Mikhailov, V. O., Galdeano, A., Agayan, S. M., Bogoutdinov, Sh. R. & Graeva, E.M. 2002b, "Artificial intelligence algorithms for magnetic anomaly clustering", *Izvestiya. Phys. Solid Earth*, vol. 38, no. 7, pp. 545-559.
37. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M. & Bogoutdinov, Sh. R. 2008, "Discrete mathematical analysis and monitoring of volcanoes", *Inzhenernaya ekologiya*, no. 5, pp. 26-31.
38. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Bogoutdinov, Sh. R. & Soloviev, A.A. 2010, "Discrete mathematical analysis and geological and geophysical applications", *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, no. 2, pp. 109-125.
39. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Dobrovolsky, M. N. & Dzeboev, B. A. 2013a, "Objective classification of epicenters and recognition of places of possible occurrence of strong earthquakes in California", *Geoinformatika*, no. 2, pp. 44-57.
40. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A. & Agayan, S. M. 2013b, "A New approach to recognition of the strong earthquake-prone areas in the Caucasus", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 49, no. 6, pp. 747-766. doi: 10.1134/S1069351313060049
41. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A. & Agayan, S. M. 2016, "FCaZm intelligent recognition system for locating areas prone to strong earthquakes in the Andean and Caucasian mountain belts", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 52, no. 4, pp. 461-491. doi: 10.1134/S1069351316040017
42. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Sergeyeva, N. A. & Rybkina, A. I. 2017a, "Formalized clustering and significant earthquake-prone areas in the Crimean Peninsula and Northwest Caucasus", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 53, no. 3, pp. 353-365. doi: 10.1134/S106935131703003X
43. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Belov, I. O., Sergeeva, N. A. & Vavilin, E. V. 2017b, "Successive recognition of significant and strong earthquake-prone areas: The Baikal–Transbaikal region", *Doklady Earth Sciences*, vol. 477, no. 2, pp. 1488-1493. doi: 10.1134/S1028334X1712025X
44. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Dzeboev, B. A. & Belov, I. O. 2017c, "Recognition of strong earthquake-prone areas with a single learning class", *Doklady Earth Sciences*, vol. 474, no. 1, pp. 546-551. doi: 10.1134/S1028334X17050038
45. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Sergeeva, N. A., Belov, I. O. & Rybkina, A. I. 2018, "Significant earthquake-prone areas in the Altai–Sayan region", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 54, no. 3, pp. 406-414. doi: 10.1134/S1069351318030035
46. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Izvekova, M. L., Keilis-Borok, V. I. & Ranzman, E. Ya. 1972, "On criteria of high seismicity", *Doklady Acad. Sci. SSSR*, vol. 202, no. 6, pp. 1317-1320.
47. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Izvekova, M. L., Keilis-Borok, V. I. & Ranzman, E. Ya. 1973, "Recognition of earthquake-prone areas. I. Pamir and Tien Shan", *Vyuchislitelnye I statisticheskie metody interpretatsii seismicheskikh dannykh* (Computational and Statistical Methods of Seismic Data Interpretation), Nauka, Moscow, pp. 107-133 (Comput. Seismol.; 6).
48. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Zhidkov, M. P., Keilis-Borok, V. I. & Ranzman, E. Ya. 1974a, "Recognition of earthquake-prone areas. II. Four regions of Asia Minor and South-Eastern Europe", *Mashinnyi analiz tsyufrovyykh seismicheskikh dannykh* (Computer Analysis of Digital Seismic Data), Nauka, Moscow, pp. 3-40 (Comput. Seismol.; 7).

49. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Zhidkov, M. P., Keilis-Borok, V. I., Ranzman, E. Ya. & Rotwain, I. M. 1974b, "Recognition of earthquake-prone areas. III. The case when the boundaries of disjunctive nodes are unknown", *Mashinnyi analiz tsyufrovyyukh seismicheskikh dannyukh* (Computer Analysis of Digital Seismic Data), Nauka, Moscow, pp. 41-64 (Comput. Seismol.; 7).
50. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Keilis-Borok, V. I., Knopoff, L., Press, F., Ranzman, I. Ya., Rotwain, I. M. & Sadovsky, A.M. 1976, "Conditions for the occurrence of strong earthquakes (California and some other regions)", *Issledovanie seismichnosti i modelei Zemli* (Investigation of seismicity and Earth models), Nauka, Moscow, pp. 3-91 (Comput. Seismol.; 9).
51. Glasko, M. P. & Ranzman, E. Ya. 1992, "On morphostructural nodes - sites of activation of modern relief-forming processes", *Geomorfologiya* (Geomorphology), no. 4, pp. 53-61.
52. Gorshkov, A. I., Caputo, M., Keilis-Borok, V. I., Oficerova, E. I., Ranzman, E. Ya. & Rotwain, I. M. 1979, "Recognition of earthquake-prone areas. IX. Italy ( $M \geq 6.0$ )", *Teoriya i analiz seismologicheskikh nabljudenii* (Theory and Analysis of Seismological Observations), Nauka, Moscow, pp. 3-17 (Comput. Seismol.; 12).
53. Gorshkov, A. I., Zhidkov, M. P., Ranzman, E. Ya., & Tumarkin, A. G. 1991, "Morphostructure of the Lesser Caucasus and the location of earthquakes,  $M \geq 5.5$ ", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 6, pp. 30-38.
54. Gorshkov, A. I. 2010, *Raspoznavanie mest silnyukh zemletryasenii v Alpiisko-Gimalaiskom poyase* (Recognition of Places of Strong Earthquakes in the Alpine-Himalayan Belt), KRASAND, Moscow (Comput. Seismol.; 40).
55. Gorshkov, A. I., Soloviev, A. A. & Zharkikh, Yu. I. 2017, "A Morphostructural Zoning of the Mountainous Crimea and the Possible Locations of Future Earthquakes", *Journal of Volcanology Seismology*, vol. 11, no. 6, pp. 407-412. doi: 10.1134/S0742046317060021
56. Gorshkov, A. I., Soloviev, A. A. & Zharkikh, Yu. I., 2018, "Recognition of strong earthquake prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region. *Doklady Earth Sciences*, vol. 479, no. 1, pp. 412-414. doi: 10.1134/S1028334X1803025X
57. Gurvich, V. A. & Kossobokov, V. G. 1984, "On the connection between volcanism and the difference in heights with the epicenters of the strongest earthquakes", *Matematicheskoe modelirovanie i interpretatsiya geofizicheskikh dannyukh* (Mathematical Modeling and Interpretation of Geophysical Data), Nauka, Moscow, pp. 88-93 (Comput. Seismol., 16).
58. Zhidkov, M. P. & Kossobokov, V. G. 1978, "Recognition of earthquake-prone areas. XIII. Intersections of lineaments of the east of Central Asia", *Intepretatsiya dannyukh seismologii i geotectoni* (Interpretation of Seismology and Geotectonics Data), Nauka, Moscow, pp. 48-71 (Comput. Seismol., 11).
59. Zhidkov, M. P., Tumarkin, A. G. & Filimonov, M. B. 1990, "Recognition of earthquake-prone areas. XVII. General criteria for the high seismicity of the mountain belt of the Andes of South America ( $M \geq 7.0$ )", *Comp'juternyyi analiz geofizicheskikh polei* (Computer Analysis of Geophysical Fields), Nauka, Moscow, pp. 274-284 (Comput. Seismol.; 23).
60. Keilis-Borok, V. I., Kossobokov, V. G. & Mazhkenov, S. A. 1989, "C.A. On the similarity in the spatial distribution of seismicity", *Teoriya i algoritmy interpretatsii geofizicheskikh dannyukh* (Theory and Algorithms for Geophysical Data Interpretation), Nauka, Moscow, pp. 28-40 (Comput. Seismol.; 22).

61. Kossobokov, V. G. & Rotwain, I. M. 1977, "Recognition of earthquake-prone areas. VI. Magnitude  $M \geq 7,0$ ", *Raspoznavanie i spektralnyui analiz v seismologii* (Recognition and Spectral Analysis in Seismology), Nauka, Moscow, pp. 3-18 (Comput. Seismol., 10).
62. Kossobokov, V. G. 1982, "Recognition of places of strong earthquakes in the east of Central Asia and Anatolia by the Hamming method", *Matematicheskie modeli stroeniya Zemli i prognoza zemletryasenii* (Mathematical Models of Earth Structure and Earthquake Prediction), Nauka, Moscow, pp. 76-81 (Comput. Seismol., 14).
63. Kossobokov, V. G., & Mazhkenov, S. A. 1992, "Intensity of the earthquake flow in the focal area", *Doklady Akademii nauk Respubliki Kazakhstan*, no.1. pp. 53-57.
64. Kossobokov, V. G. & Nekrasova, A. K. 2004, "Unified scaling law for earthquakes: global map of parameters", *Analiz geodinamicheskikh i seismicheskikh protsessov* (The Analysis of Geodynamic and Seismic Processes), GEOS, Moscow, pp. 160-175 (Comput. Seismol., 35).
65. Kossobokov, V. G. & Nekrasova, A. K. 2012, "Global Seismic Hazard Assessment Program maps are misleading", *Seismic Instruments*, vol. 48, no. 2, pp. 162-170.
66. Kossobokov, V. G. & Soloviev, A. A. 2015, "Evaluating the results of testing algorithms for prediction of earthquakes", *Doklady Earth Sciences*, vol. 460, no. 2, pp. 192-194. doi: 10.1134/S1028334X15020208
67. Ranzman, E. Ya. 1979, *Mesta zemletryasenii i morfostruktura gornyykh stran* (Places of Earthquakes and Morphostructure of Mountain Countries), Nauka, Moscow.
68. Romashkova, L. L. & Kossobokov, V. G. 2001, "Dynamics of seismic activity before and after the strongest earthquakes of the World, 1985-2000", *Problemy dinamiki litosfery i seismichnosti* (Problems in the Lithosphere Dynamics and Seismicity), GEOS, Moscow, pp. 162-189 (Comput. Seismol., 32).
69. Sadovsky, M. A., Bolkhovitinov, L. G. & Pisarenko V. F. 1982, "On the property of discreteness of rocks", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 12, pp. 3-18.
70. Sadovsky, M. A., Golubeva, T. V., Pisarenko V. F. & Shnirman, M. G. 1984, "The characteristic dimensions of the rock and the hierarchical properties of seismicity", *Izv. Acad. Sci. SSSR. Fizika Zemli*, no. 2, pp. 3-15.
71. Soloviev, A. A., Novikova, O. V., Gorshkov, A. I. & Piotrovskaya, E. P. 2013, "Recognition of potential sources of strong earthquakes in the Caucasus region using GIS technologies", *Doklady Earth Sciences*, vol. 450, no. 2, pp. 658-660. doi: 10.1134/S1028334X13060159
72. Soloviev, A. A., Gvishiani, A. D., Gorshkov, A. I., Dobrovolsky, M. N. & Novikova, O. V. 2014, "Recognition of earthquake-prone areas: Methodology and analysis of the results", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 50, no. 2, pp. 151-168. doi: 10.1134/S1069351314020116
73. Soloviev, A. A., Gorshkov, A. I. & Soloviev, A. A. 2016, "Application of the data on the lithospheric magnetic anomalies in the problem of recognizing the earthquake prone areas", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 52, no. 6, pp. 803-809. doi: 10.1134/S1069351316050141
74. Soloviev, A. A. & Gorshkov, A. I. 2017, "Modeling the dynamics of the block structure and seismicity of the Caucasus", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, vol. 53, no. 3, pp. 321-331. doi: 10.1134/S1069351317030120

75. Federal State Statistics Service 2016, "Population of the Russian Federation for municipalities on January 1, 2016", FSSS, Moscow, Russian Federation, Available at: [http://www.gks.ru/free\\_doc/doc\\_2016/bul\\_dr/mun\\_obr2016.rar](http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/bul_dr/mun_obr2016.rar).
76. Fu, K. 1977, *Strukturnyue metody v raspoznavanii obrazov* (Syntactic Methods in Pattern Recognition), Mir, Moscow.
77. Alekseevskaya, M. A., Gabrielov, A. M., Gvishiani, A. D., Gelfand, I. M. & Ranzman, E. Ya. 1977, "Formal morphostructural zoning of mountain territories", *J. Geophys.*, vol. 43, pp. 227-233.
78. Bak, P., Christensen, K., Danon, L. & Scanlon, T. 2002, "Unified scaling law for earthquakes", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, pp. 178501–178504.
79. Beauval, C., Bard, P.-Y., Hainzl, S. & Gue ´guen P. 2008, "Can strong-motion observations be used to constrain probabilistic seismic-hazard estimates?", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 98, no. 2, pp. 509-520. doi:10.1785/0120070006
80. Ben-Zion, Y. 2008, "Collective behavior of earthquakes and faults: continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes", *Reviews Geophys.*, vol. 46, no. 4, pp. RG4006. doi:10.1029/2008RG000260
81. Bhatia, S. C., Chetty, T. R. K., Filimonov, M., Gorshkov, A., Rantsman, E. & Rao, M. N. 1992, "Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan arc region", *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, vol. 101, no. 4, pp. 369-385.
82. Caputo, M., Keilis-Borok, V., Oficerova, E., Ranzman, E., Rotwain, I. & Solovjeff, A. 1980, "Pattern recognition of earthquake-prone areas in Italy", *Phys. Earth Planet. Int.*, vol. 21, pp. 305-320.
83. Cisternas, A., Godefroy, P., Gvishiani, A., Gorshkov, A. I., Kossobokov, V., Lambert, M., Ranzman, E., Sallantin, J., Soldano, H., Soloviev, A. & Weber C. 1985, "A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the Western Alps", *Annales Geophysicae*, vol. 3, no.2, pp. 249-270.
84. Davis, C., Keilis-Borok, V., Kossobokov, V. & Soloviev, A. 2012, "Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness", *Int. J. Disaster Risk Reduction*, vol. 1, pp. 17-32. doi: 10.1016/j.ijdr.2012.03.001
85. Dubois, J. & Gvishiani, A. 1998, *Dynamic Systems and Dynamic Classification Problems in Geophysical Applications*, Springer-Verlag, Paris.
86. Gelfand, I. M., Guberman, Sh., Izvekova, M. L., Keilis-Borok, V. I. & Ranzman, E. Ia. 1972, "Criteria of high seismicity determined by pattern recognition", *Tectonophysics*, vol. 13, no. 1-4, pp. 415-422.
87. Gelfand, I. M., Guberman, Sh. A., Keilis-Borok, V. I., Knopoff, L., Press, F., Ranzman, I. Ya., Rotwain, I. M. & Sadovsky, A. M. 1976, "Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California", *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 11, pp. 227-283.
88. Giardini, D. 1999, "The global seismic hazard assessment program (GSHAP) – 1992/1999", *Ann. Geophys.*, vol. 42, pp. 957-974.

89. Gorshkov, A. I., Panza, G. F., Soloviev, A. A. & Aoudia A. 2002, "Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily", *J. Seismol. Earthquake Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1-24.
90. Gorshkov, A., Kossobokov & V., Soloviev, A. 2003, "Recognition of Earthquake-Prone Areas", *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 239-310.
91. Gorshkov, A. I., Panza, G. F., Soloviev, A. A. & Aoudia, A. 2004, "Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides", *Bolletino della Societa Geologica Italiana*, vol. 123, no.1, pp. 3-18.
92. Gorshkov, A. I., Panza, G. F., Soloviev, A. A., Aoudia, A. & Peresan, A. 2009, "Delineation of the geometry of nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes ( $M \geq 6$ )", *Terra Nova*, vol. 21, pp. 257-264.
93. Gorshkov, A. I., Soloviev, A. A., Jiménez, M. J., García-Fernández, M. & Panza, G. F. 2010, "Recognition of earthquake-prone areas ( $M \geq 5.0$ ) in the Iberian Peninsula", *Rendiconti Lincei*, vol. 21, no.2, pp. 131-162.
94. Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3) 2005, *Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)*, Columbia University, Palisades, NY, Available at: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>.
95. Gvishiani, A. D. 1982a, "Earthquake-prone areas in the Andes", *Revista Geofisica Instituto Panamericano de Geografia e Historia*, no.17, pp. 105-111.
96. Gvishiani, A. D. 1982b, "Prevision des tremblements de terre et stabilite de la classification", *Presentee par Jean Coulomb., Compte-rendus a l'Academi Sciences., Paris.*, vol. 294, serie 11, pp. 749-752.
97. Gvishiani, A. D. & Soloviev, A. A. 1984, "Recognition of places on the Pacific coast of the South America where strong earthquakes may occur", *Earthquake. Predict. Res.*, vol. 2, pp. 237-243.
98. Gvishiani, A., Gorshkov, A., Kossobokov, V., Cisternas, A., Philip, H. & Weber, C. 1987, "Identification of seismically dangerous zones in the Pyrenees", *Annales Geophysicae*, vol. 5B, no. 6, pp. 681-690.
99. Gvishiani, A., Tumarkin, A. G., Zhizhin, M. N. & Schenk, V. 1988, "Pattern recognition of the macroseismic significance of the parameters of strong earth tremors", *Seismic Risk Assessment and Design of Building Structures*, Omega Scientific.
100. Gvishiani, A., Bonnin, J., Zhizhin, M. & Mohammadioun, B. 1991, "Strong motion data classification using syntactic pattern recognition", *Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation. Stanford, California*, vol. 2, pp. 549-555.
101. Gvishiani, A., Zhizhin, M., Rouland, D., Mohammadioun, B. & Bonnin, J. 1994, "Identification of a geological region for earthquakes using syntactic pattern recognition of seismograms", *Natural Hazards*, vol. 10, pp. 139-147.
102. Gvishiani, A., Zhizhin, M., Rouland, D., Mohammadioun, B., Bonnin, J. & Madariaga, R. 1995, "Syntactic pattern recognition scheme (SPARS) applied to seismological waveforms analysis", *Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, vol. 9, pp. 17-26.

103. Gvishiani, A., Zhizhin, M., Dubois, J. & Battaglia, J. 1997, "Syntactic recognition of magnetic anomalies along the Mid-Atlantic Ridge", *C.R. Acad. Sci. Paris. Sciences de la terre et des planets / Earth & Planetary Sciences*, pp. 983-990.
104. Gvishiani, A. & Dubois, J. 2002, *Artificial Intelligence and Dynamic Systems for Geophysical Applications*, Springer-Verlag, Paris.
105. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Bogoutdinov, Sh. R., Tikhotsky, S. A., Hinderer, J., Bonnin, J. & Diament, M. 2004, "Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies", *System Research & Information Technologies*, no. 3, pp. 7-16.
106. Gvishiani, A., Dobrovolsky, M., Agayan, S. & Dzeboev, B. 2013, "Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas", *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 12. no. 1, pp. 1-10.
107. Keilis-Borok, V. I. & Kossobokov, V. G. 1990, "Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8", *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 61, no. 1-2, pp. 73-83.
108. Keilis-Borok, V. I. & Rotwain, I. M. 1990, "Diagnosis of Time of Increased Probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN", *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 61, no.1-2, pp. 57-72.
109. Kondorskaya, N. V., Shebalin, N. V., Khrometskaya, Ya. A. & Gvishiani, A. D. 1982, *New catalog of strong earthquakes in the U.S.S.R. from ancient times through 1977*, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-31.
110. Kossobokov, V. G. & Romashkova, L. L. 2005, "Seismicity dynamics prior to and after the largest earthquakes worldwide, 1985-2000", *Computational Seismology and Geodynamics*, vol. 7, Am. Geophys. CityUn., Washington, D.C., pp. 138-160. doi: 10.1029/CS007p0138
111. Kossobokov, V. G., Lepreti, F. & Carbone, V. 2008, "Complexity in sequences of Solar flares and earthquakes", *Pure Appl. Geophys.*, vol. 165, no. 3-4, pp. 761-775. doi: 10.1007/s00024-008-0330-z
112. Kossobokov, V. G. 2013, "Earthquake prediction: 20 years of global experiment", *Natural Hazards*, vol. 69, pp. 1155-1177. doi: 10.1007/s11069-012-0198-1
113. Kossobokov, V., Peresan A. & Panza, G. F. 2015, "Reality check: Seismic hazard models you can trust", *EOS. Earth & Space Sci. News, July 2015*, vol. 96, no. 13, pp. 9-11. doi: 10.1029/2015EO031919
114. Kossobokov, V. G. & Nekrasova, A. K. 2018, "Earthquake hazard and risk assessment based on Unified Scaling Law for Earthquakes: Greater Caucasus and Crimea", *J. Seismology*, vol. 22, pp. 1157-1169. doi: 10.1007/s10950-018-9759-4
115. Nekrasova, A., Kossobokov, V., Peresan, A. & Magrin, A. 2014, "The comparison of the NDSHA, PSHA seismic hazard maps and real seismicity for the Italian territory", *Natural Hazards*, vol. 70, no. 1, pp. 629-641. doi: 10.1007/s11069-013-0832-6
116. Nekrasova, A., Kossobokov, V., Parvez, I. A. & Tao, X. 2015, "Seismic hazard and risk assessment based on the unified scaling law for earthquakes", *Acta Geodaetica et Geophysica*, vol. 50, no. 1, pp. 21-37. doi: 10.1007/s40328-014-0082-4
117. Okubo, P. G. & Aki, K. 1987, "Fractal geometry in the San Andreas Fault system", *J. Geophys. Res.*, vol. 92, no. B1, pp. 345-356.

118. Panza, G. F., Romanelli, F. & Vaccari, F. 2001, "Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation", *Adv. Geophys.*, vol., 43, pp. 1-95.
119. Panza, G., Irikura, K., Kouteva-Guentcheva, M., Peresan, A., Wang, Z. & Saragoni, R. (Eds.) 2011, "Advanced Seismic Hazard Assessment", *Pure Appl. Geophys.*, vol. 168, no. 1-4, pp. 1-752.
120. Panza, G. F., Peresan, A. & La Mura, C. 2013, "Seismic hazard and strong ground motion: an operational neo-deterministic approach from national to local scale", *UNESCO-EOLSS Joint Committee (Ed.), Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Geophysics and Geochemistry. Developed under the Auspices of the UNESCO*, Eolss Publishers, CityOxford, UK., pp. 1-49.
121. Panza, G. F., Kossobokov, V., Peresan, A. & Nekrasova, A. 2014, "Chapter 12. Why are the standard probabilistic methods of estimating seismic hazard and risks too often wrong?", *Earthquake Hazard, Risk, and Disasters*, Elsevier, London. pp. 309-357.
122. Parvez, I. A., Vaccari, F. & Panza, G. F. 2003, "A deterministic seismic hazard map of India and adjacent areas", *Geophys. J. Int.*, vol. 155, pp. 489-508.
123. Paskaleva, I., Dimova, S., Panza, G. F. & Vaccari, F. 2007, "An earthquake scenario for the microzonation of Sofia and the vulnerability of structures designed by use of the Eurocodes", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, vol. 27, pp. 1028-1041.
124. Peresan, A., Zuccolo, E., Vaccari, F., Gorshkov, A. & Panza G.F. 2011, "Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy", *Pure Appl. Geophys.*, vol. 168, no. 3-4, pp. 583-607, doi:10.1007/s00024-010-0166-1.
125. Rotwain, I. & Novikova O. 1999, "Performance of the earthquake prediction algorithm CN in 22 regions of the world", *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 111, no. 3-4, pp. 207-213.
126. Shearer, P.M. 2012, "Self-similar earthquake triggering, Bath's law, and foreshock/aftershock magnitudes: Simulations, theory, and results for southern California", *J. Geophys. Res. – Solid Earth*, vol. 117, no. B6, pp. B06310. doi: 10.1029/2011jb008957
127. Utsu, T., Ogata, Y. & Matsu'ura, R. S. 1995, "The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity", *J. Phys. Earth*, vol. 43, no. 1, pp. 1-33.
128. Vaccari, F., Peresan, A., Zuccolo, E., Romanelli, F., Marson, C., Fiorotto, V. & Panza, G. F. 2009, "Neo-deterministic seismic hazard scenarios: application to the engineering analysis of historical buildings", *Proceedings of PROHITECH 2009-Protection of Historical Buildings Mazzolani*, Taylor & Francis Group, London, pp. 1559-1564.
129. Wyss, M., Nekrasova, A. & Kossobokov, V. 2012, "Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates", *Natural Hazards*, vol. 62, no. 3, pp. 927-935. doi: 10.1007/s11069-012-0125-5

Получено 27.07.2018

Принято в печать 22.10.2018