

## НЕЧЁТКИЕ МНОЖЕСТВА И БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В ТРЁХМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

© 2024 г. А.Д. Гвишиани<sup>a,b,\*</sup>, Н.А. Фоменко<sup>a,\*\*</sup>, Б.А. Дзебоев<sup>a,b,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Геофизический центр РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

\*E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

\*\*E-mail: n.fomenko@gcras.ru

\*\*\*E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Опасные природные явления и катастрофы носят разрушительный характер, приводят к серьёзному материальному ущербу и большому количеству жертв, к тому же в большинстве случаев они возникают внезапно. Одно из таких опасных природных явлений — землетрясения. Авторы статьи рассматривают возможность применения нечётких множеств для обработки Больших данных с целью уменьшить разрушительные последствия землетрясений. Предлагается новый подход к интерпретации результатов сейсмического районирования территории Российской Федерации и сопредельных стран. Статья подготовлена по материалам научного доклада, представленного на Всероссийской научной конференции «Опасные природные явления и катастрофы: причины, последствия, возможности предотвращения (Лавёровские чтения 2024)».

*Ключевые слова:* нечёткие множества, Большие данные, 3D-модель, сейсмическая опасность, сейсмическое районирование.

DOI: 10.31857/S0869587324080026, EDN: FDIXBU

По данным МЧС России, в 2022 г. в Российской Федерации природные катастрофы составили 32.2% от общего числа чрезвычайных ситуаций. При этом пострадало 134 362 человека, а материальный ущерб составил 92.38% от общего ущерба, причинённого чрезвычайными ситуациями [1]. Отметим, что в 2022 г. в мире была зарегистрирована 421 природная катастрофа, экономический ущерб достиг сотен

миллиардов долларов. Здесь необходимо заметить, что за период 1990–2019 гг. произошли 9 924 природные катастрофы, из которых первое место, 41.5% от общего количества, занимают наводнения. На втором месте стоят ураганы (29.6%), на третьем — землетрясения (8.2%) (рис. 1) [2].

Среди разрушительных сейсмических событий наибольшие экономические потери принесло



ГВИШИАНИ Алексей Джерменович — академик РАН, научный руководитель Геофизического центра РАН. ФОМЕНКО Наталья Александровна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Геофизического центра РАН. ДЗЕБОЕВ Борис Аркадьевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке Геофизического центра РАН.



Рис. 1. Количество природных катастроф в мире за период 1990–2019 гг. [2]

землетрясение, произошедшее на северо-востоке Японии 11 марта 2011 г. с магнитудой 9.0 [3] и получившее название “Великое землетрясение Восточной Японии” [4]. Оно вызвало крупнейшее цунами, приведшее к развитию продолжительной аварии на крупной японской атомной электростанции (АЭС) “Фукусима-1”. Ущерб, нанесённый экономике, транспорту и инфраструктуре Японии, без учёта затрат, связанных с аварией на АЭС, составил около 210 млрд долл. Около 400 000 зданий были повреждены, из них 126 000 полностью или наполовину разрушены. По приблизительной оценке Министерства по охране окружающей среды Японии, из районов, пострадавших от цунами, было вывезено более 23 млн тонн мусора [5]. Составленный японскими экспертами план ликвидации последствий аварии на “Фукусима-1” рассчитан на 30 лет (до 2041 г.) [6].

На третьем месте по экономическим потерям среди всех природных катастроф, произошедших за 1990–2019 гг., находится землетрясение, произошедшее 17 января 1995 г. в Японии (г. Кобе) с магнитудой 7.3 [7]. Общий ущерб от него составил около 100 млрд долл. [8]. Были разрушены около 105 000 жилых зданий, 85% учебных заведений, повреждены более 144 000 различных сооружений, 274 100 домашних хозяйств, 7 200 дорог, 330 мостов и т.д.

Спустя 10 лет после землетрясения в городе Кобе состоялась Всемирная конференция по уменьшению опасности стихийных бедствий. По результатам конференции была принята Рамочная программа действий по снижению к 2030 году смертности в результате землетрясений, наводнений, ураганов и других стихийных бедствий; числа пострадавших людей в целом; сокращения размеров экономических потерь [9].

Наиболее разрушительные сейсмические события 2023 г. произошли 6 февраля на юго-востоке Турции вблизи границы с Сирией — два землетрясения

с магнитудами 7.8 и 7.7 [10, 11]. Пострадало более 18.1 млн человек, погибло более 50 000 человек, экономический ущерб составил не менее 100 млрд долл. [12]. Было разрушено около 180 000 зданий, под завалами которых находилась большая часть погибших и пострадавших. По оценкам экспертов, большинство зданий и сооружений были построены с нарушениями норм сейсмостойкого строительства [13].

В настоящей статье предпринимается попытка трактовки проблемы сейсмического районирования с точки зрения нечётких множеств и Больших данных (Бод).

### СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИИ

Сейсмическое районирование, наряду с сейсмостойким строительством и укреплением зданий, — важный инструмент уменьшения ущерба от землетрясений. По своей сути выполнение сейсмического районирования является проектом системного анализа геолого-геофизических и сейсмологических данных. В нашей стране действует свод норм и правил, регулирующих строительство в сейсмоактивных районах в зависимости от макросейсмической балльности. В частности, этот свод регламентирует проектирование зданий и сооружений на территориях с сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов [14]. Нормативной базой, наглядно демонстрирующей уровень сейсмической опасности территории Российской Федерации, служат карты Общего сейсмического районирования (ОСР).

Комплект современных нормативных карт ОСР-97 территории Российской Федерации [15, 16], предназначенный для строительства объектов разных категорий ответственности и сроков службы, был создан спустя 9 лет после Спитакского землетрясения, произошедшего 7 декабря 1988 г. [17] и ставшего одним из самых разрушительных в СССР. Следует отметить вклад в развитие исследований по Общему сейсмическому районированию нашей страны вице-президента АН СССР и РАН, академика Н.П. Лавёрова. В 1988–1989 гг., возглавляя научную группу Правительственной комиссии СССР по устранению последствий Спитакского землетрясения, он выступал одним из инициаторов методики ОСР.

По инициативе академика АН СССР М.А. Садовского, а затем и Н.П. Лавёрова в нашей стране была создана система сейсмических наблюдений, эффективно взаимодействующая сегодня с МЧС России и Минстроем России. Для мониторинга землетрясений в России и сопредельных странах в 1994 г. была создана Единая геофизическая служба РАН. В связи с успехом этого фундаментального проекта следует упомянуть имена членов АН СССР и РАН М.А. Садовского, Н.П. Лавёрова, В.Н. Страхова,

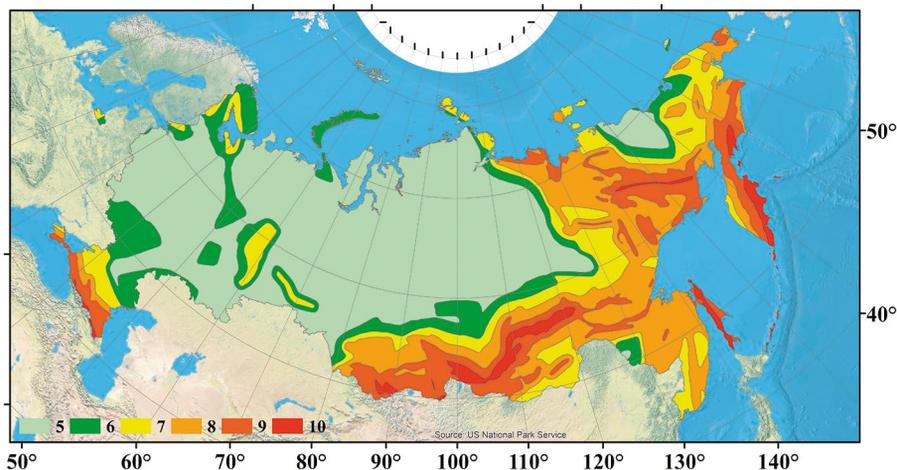


Рис. 2. Пример карты сейсмического районирования из комплекта нормативных карт ОСР-2016 [19]

А.Э. Конторовича, В.В. Адушкина, А.О. Глико, А.В. Николаева, Г.А. Соболева, А.А. Маловичко, а также профессоров И.Л. Нерсесова, В.И. Мячкина, Н.В. Шебалина, Е.А. Попова, Б.В. Кострова, Н.В. Кондорской [18].

Последними созданными и принятыми в качестве нормативных картами ОСР стал комплект ОСР-2016 [19] (рис. 2). При этом ОСР-2016, как и его предшественники, обладает рядом недостатков [20, 21]. Заметим, что на картах ОСР (например, рис. 2) в баллах шкалы интенсивности показано максимально возможное сейсмическое воздействие в точке  $(x, y)$  от любого землетрясения с любой магнитудой  $M$ , любым гипоцентром  $(X, Y, H)$  в любой момент времени  $t$ . Таким образом, интенсивность  $I$  есть конечнозначная функция, которую можно записать:

$$I(x, y) = I(x, y, M, X, Y, H, t, \xi), \quad (1)$$

где  $\xi$  — некая совокупность дополнительных аргументов, включающая в себя множество переменных, выходящих за рамки сейсмологических исследований. Примером элемента  $\xi$  здесь могут служить характеристики качества строительства. Отметим, что изучение поведения зависимости (1) как функции от  $\xi$  при сейсмическом районировании сегодня практически не проводится.

При построении карт ОСР используется шкала интенсивности Медведова—Шпонхойера—Карника MSK-64 (1964) [22], являющаяся 12-балльной, то есть  $I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ . Примеры других 12-балльных шкал интенсивности [23] — шкала Меркалли (1902) [24] и Европейская макросейсмическая шкала (EMS, 1998) [25].

Шкала MSK-64 преимущественно используется в Восточной Европе и в странах бывшего СССР. Она описывает в баллах наблюденную интенсивность в точке  $(x, y)$  по характеру воздействий на человека,

разрушений и изменений в окружающей среде. Общие характеристики зон балльности MSK-64 приведены на рисунке 3.



Рис. 3. 12-балльная шкала Медведова—Шпонхойера—Карника (MSK-64). Общая характеристика зон балльности

НЕЧЁТКОЕ МНОЖЕСТВО *i*-БАЛЛЬНЫХ СОТЯСЕНИЙ

В настоящее время при построении карт ОСР сейсмологи используют классическую теорию множеств. Попробуем посмотреть на задачу сейсмического районирования с другой точки зрения. Для иллюстрации нового возможного подхода введём несколько основных понятий:

- $X = \{x\}$  – классическое множество, состоящее из элементов  $x \in X$ ;
- $A$  – собственное подмножество  $X$ , иными словами,  $A \subset X$ , в то же время  $A \neq X$ ;
- $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$  – функция принадлежности, определяющая, в какой мере элемент  $x \in X$  принадлежит подмножеству  $A$ . Функция  $\mu_A(x)$ , как правило, нелинейна и вводится алгоритмически;
- $F_x(A) = \{A, \mu_A(x)\}$  – нечёткое множество [26, 27].

Сегодня карты ОСР строятся по сейсмологическим оценкам  $max I(x, y)$ . Соответственно, определённая территория на картах окрашивается в цвет максимальной интенсивности (рис. 2). Таким образом, выделяются, как правило, вложенные друг в друга зоны  $S_i \supset S_{i+1}, i = 1, \dots, 11$  возможной максимальной интенсивности  $i$ , удовлетворяющие соотношениям:

$$S_i = \{ \forall (x, y) \in S_i : max I(x, y) \geq i \}, \quad (2)$$

$$S_{12} \subset S_{11} \subset S_{10} \subset \dots \subset S_3 \subset S_2 \subset S_1.$$

Зоны  $S_{i-1} \setminus S_i$  маркируются на карте ОСР единым цветом. Это говорит о том, что все точки, принадлежащие одной зоне, равноценны. В реальности это не так.

После создания плоской 2D-карты ОСР (подложка) необходимо сделать следующий фундаментальный шаг, продиктованный сутью решаемой задачи сейсмического районирования. Каждую точку  $(x, y) \in X$  необходимо снабдить весом, ранжирующим возможность возникновения в ней

*i*-балльного сотрясения и определяющим отличие друг от друга точек из одной и той же зоны балльности подложки (рис. 2). Говоря на языке теории нечётких множеств, требуется построить функцию принадлежности  $\mu_{S_i}(x, y)$  к  $S_i$ , например  $i = 7$ . Таким образом, возникает новая 3D-нечёткая интерпретация зон балльности на картах сейсмического районирования. Это есть набор нечётких множеств  $F_x(S_i) = \{S_i, \mu_{S_i}\}$  (рис. 4).

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В РАЗВИТИИ ОСР

Построенные 3D множества  $F_x(S_i)$  есть фрагменты 3D-ОСР-карты с 2D подложкой  $X$ . Их моделирование сводится к построению функций принадлежности  $\mu_{S_i}$ . Построить модель  $\mu_{S_i}$  помогут Большие данные, насыщаемые разнообразной информацией, которая относится к определению максимальных сотрясений. Объёмы и разнообразие видов Бод должны напоминать снежный ком, постоянно растущий за счёт включения в него новых компонентов [28].

Бод – это разнообразные данные, которые поступают и обрабатываются с растущими скоростью, объёмом и разнообразием. Они характеризуются основным критерием 3V: Volume (объём), Velocity (скорость), Variety (разнообразие); и дополнительными критериями: Value (ценность), Appropriacy (уместность), Variability (вариативность, возможность стать разнообразными со временем) [29]. В задаче сейсмического районирования Бод призваны заменить и субъективные выборки, которые сейсмологи берут за основу [30].

За прошедшие с момента создания комплекта карт ОСР-2016 8 лет объём новой геофизической информации существенно увеличился [31], и эти сведения могут служить ядром Бод для моделирования 3D-карты сейсмического районирования. Сюда относятся:

- глобальная сейсмологическая информация (историческая и оперативная);

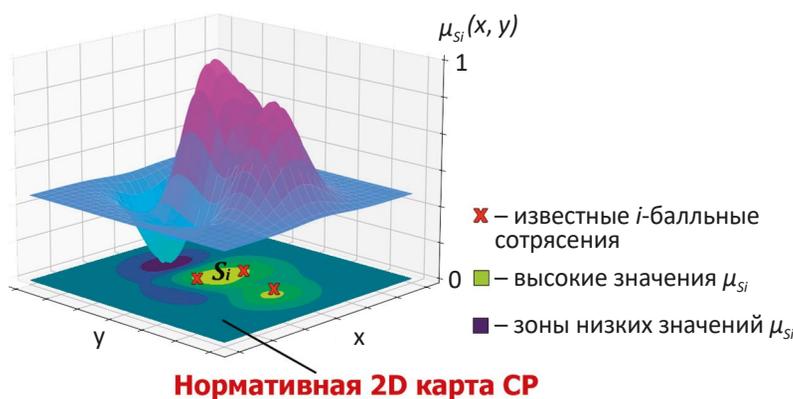


Рис. 4. *i*-балльная зона 3D сейсмического районирования – нечёткое множество  $F_x(S_i) = \{S_i, \mu_{S_i}\}$

- результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений и мониторинга проявления их активности;
- геологические, геодинамические, тектонические, геоморфологические данные;
- данные мониторинга вулканической активности;
- дистанционное зондирование Земли из космоса;
- возможно, многое другое.

С целью эффективного предотвращения разрушений зданий и сооружений при создании Бод и построении 3D-модели следует учитывать данные о застройке на рассматриваемой территории, включая:

- информацию о материалах, видах, классификации и планах развития строительства;
- данные об опасных производствах и объектах особой важности;
- информацию о строительстве новых и эксплуатации существующих транспортных магистралей и узлов, аэропортов, морских и речных портов;
- мониторинг строительства, в том числе данные о возведении новых зданий, сооружений и антисейсмическом укреплении объектов;
- данные мониторинга прокладки и планирования трубопроводов и электросетей;
- данные мониторинга состояния плотин и гидроэлектростанций;
- информацию о результатах проверок Ростехнадзора и т.п.

Многие другие виды информации могут оказаться важны для построения трёхмерного нечёткого сейсмического районирования. Какие именно — станет ясно в процессе создания Бод для их дальнейшего системного анализа.

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Реализуемое сегодня сейсмическое районирование — это только часть необходимого исследования. Его искомым результатом, по своей сути, имеет трёхмерный характер. Третья пространственная компонента — значение весовой функции, численно определяющей возможность сильного сотрясения в данной точке. Эта часть ОСР на сегодня не разработана и не планируется к разработке.

Необходимо предложить теорию и практику, которые интегрировали бы исследования по Общему сейсмическому районированию и Большим данным. Важную роль в этом могут сыграть результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений методами FCAZ (Formalized Clustering and Zoning) [32] и ERA (Earthquake-Prone Areas) [33, 34]. На сегодня это фундаментальное исследование, успешно реализуемое уже в течение

50 лет в ряде стран мира. Наша страна входит в число лидеров этого научного направления. Приведём список горных стран мира, где уже выполнено распознавание высокосейсмичных зон для сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

- Метод FCAZ: Анды Южной Америки, Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка, Калифорния, регион Прибайкалье—Забайкалье, регион Алтай—Саяны, восточный сектор Арктической зоны Российской Федерации, Кавказ и Крымский полуостров.

- Метод ERA: Памир и Тянь-Шань, Балканы, Калифорния и Невада, Апеннины и Сицилия, Анды, Камчатка, Западные Альпы, Пиренеи, Гималаи, Карпаты, Динариды, Эквадор, Иберийская плита, Северный Вьетнам, Центральный Французский массив, Кавказский регион, Северо-Западный Египет, Крым, Южная Сибирь и др.

Достоверность результатов распознавания сейсмоопасных зон методами FCAZ и ERA подтверждена контрольными экспериментами и локациями сильных землетрясений, произошедших после выполнения распознавания [34]. В то же время сегодня результаты этих исследований не используются при проведении ОСР, представляя собой параллельный поток знаний.

Оба указанных метода, FCAZ и ERA, созданы и развиваются в нашей стране. Сегодня необходимы исследования, которые обеспечивали бы адекватное включение результатов FCAZ и ERA в процесс сейсмического районирования.

Сейсмическим районированием и распознаванием сейсмоопасных зон занимаются разные специалисты. В первом случае это сейсмологи. Во втором — геоинформатики и математические геофизики [35]. Отметим, что внедрение в ОСР Больших данных поможет объединить усилия этих групп на основе системного анализа и инкорпорировать результаты FCAZ и ERA в виде блоков как сейсмического районирования, так и создания соответствующих Бод.

Общее сейсмическое районирование следует развивать, предусматривая переход от 2D к 3D-нечётким моделям его интерпретации. Методологической базой 3D сейсмического районирования должны стать: системный анализ, нечёткие множества, а также теория и практика Больших данных. Для построения описанной 3D-нечёткой модели ОСР необходимо создать долговременные совместные исследовательские группы сейсмологов, геоинформатиков, математиков, экономистов и геофизиков, а также специалистов в области искусственного интеллекта.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Геофизического центра РАН (№ 075-00443-24-01)

и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 075-00273-24-01), утверждённых Минобрнауки России.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались данные и сервисы, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. Государственный доклад “О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году”. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/6751> (дата обращения 22.04.2024).

The Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2023. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2022”. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/6751> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

2. РБК, 2023. \$383 млн в день: как человечество расплачивается за стихийные бедствия. <https://pro.rbc.ru/demo/64ede4ec9a794782cf04ada5> (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2023. \$383 million a day: how humanity is paying for natural disasters. <https://pro.rbc.ru/demo/64ede4ec9a794782cf04ada5> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

3. *Simons M., Minson S., Sladen A. et al.* The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries // *Science*. 2011, v. 332, is. 6036, pp. 1421–1425. DOI: 10.1126/science.1206731.

4. РИА Новости, 2013. Землетрясение в Японии 11 марта 2011 года: хроника событий. <https://ria.ru/20130311/926334197.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2013. Earthquake in Japan on March 11, 2011: chronicle of events. <https://ria.ru/20130311/926334197.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

5. РБК, 2011. Япония раскрыла, сколько граждан погибло в мартовской катастрофе. [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d](https://www.rbc.ru/spb_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d) (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2011. Japan revealed how many citizens died in the March disaster. [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d](https://www.rbc.ru/spb_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d) (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

6. РИА Новости, 2012. Совещание по аварии на АЭС “Фукусима” открылось в Японии. <https://ria.ru/20120224/573514710.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2012. Meeting on the accident at the Fukushima nuclear power plant opened in Japan. <https://ria.ru/20120224/573514710.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

7. *Kanamori H.* The Kobe (Hyogo-ken Nanbu), Japan, Earthquake of January 16, 1995 // *Seismological Research Letters*. 1995, v. 66, is. 2, pp. 6–10. DOI: 10.1785/gssrl.66.2.6.

8. *Holzer Th. L.* The 1995 Hanshin-Awaji (Kobe), Japan, Earthquake // *GSA TODAY*. 1995, v. 5, no. 8, pp. 153–167.

9. РИА Новости, 2020. Разрушительное землетрясение в Кобе (Япония) 17 января 1995 года. <https://ria.ru/20200117/1563433390.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2020. Destructive earthquake in Kobe (Japan) on January 17, 1995. <https://ria.ru/20200117/1563433390.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

10. *Dal Zilio L., Ampuero J.P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria // *Communications Earth & Environment*. 2023, v. 4, 71. DOI: 10.1038/s43247-023-00747-z.

11. *Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С. и др.* Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 г. по данным радарной спутниковой интерферометрии // *Физика Земли*. 2023. № 6. С. 77–88. DOI: 10.31857/S000233372306011X.

*Mikhailov V.O., Babayants I.P., Volkova M.S. et al.* Reconstruction of Co-Seismic and Post-Seismic Processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from Data of Satellite SAR Interferometry // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2023, v. 59, is. 6, pp. 888–898. DOI: 10.1134/S1069351323060113.

12. РБК, 2024. Как выглядит Турция через год после землетрясения. Репортаж РБК. [https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story\\_63e0ddb99a7947396eaa33c](https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story_63e0ddb99a7947396eaa33c) (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2024. What Türkiye looks like a year after the earthquake. RBC report. [https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story\\_63e0ddb99a7947396eaa33c](https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story_63e0ddb99a7947396eaa33c) (access date 04/22/2024). (In Russ.)

13. РБК, 2023. В Турции нашли дефекты в конструкциях разрушенных при землетрясении домов. <https://www.rbc.ru/society/10/02/2023/63e6799c9a79473a86822510> (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2023. In Turkey, defects were found in the structures of houses destroyed by an earthquake. <https://www.rbc.ru/society/10/02/2023/63e6799c9a79473a86822510> (access date 04/22/2024). (In Russ.)

14. СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. Москва: Росстандарт, 2018.
- SP 14.13330.2018. Set of rules. Construction in seismic areas. Updated edition of SNiP II-7-81\*. Moscow: Rosstandart, 2018. (In Russ.)
15. *Utomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999, v. 42, is. 6, pp. 1023–1038.
16. *Giardini D.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annali di Geofisica*. 1999, v. 42, is. 6, pp. 957–974. DOI: 10.4401/ag-3780.
17. *Cisternas A., Philip H., Bousquet J.C. et al.* The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988: field observations, seismology and tectonics // *Nature*. 1989, v. 339, pp. 675–679. DOI: 10.1038/339675a0.
18. *Лавёров Н.П., Леонов Ю.Г., Макоско А.А. и др.* Предложения по развитию и модернизации системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений // Проблемы национальной безопасности. Экспертные заключения. Аналитические материалы. Предложения / Под общ. ред. акад. Н.П. Лавёрова. М.: Наука, 2008. С. 206–232.
- Laverov N.P., Leonov Yu.G., Makosko A.A. et al.* Proposals for the development and modernization of the system of seismological observations and earthquake prediction // *Problems of national security. Expert opinions. Analytical materials. Proposals / General ed. acad. N.P. Laverov*. Moscow: Nauka, 2008. Pp. 206–232. (In Russ.)
19. Пояснительная записка к комплексу карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.
- Explanatory note to the set of maps of the General seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-2016 // *Engineering survey*. 2016, no. 7, pp. 49–122. (In Russ.)
20. *Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Скоркина А.А.* Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.
- Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A.* Why Are New Approaches to Seismic Hazard Assessment Required? // *Doklady Earth Sciences*. 2022, v. 507, part 1, pp. 930–935. DOI: 10.1134/S1028334X22700362.
21. *Шестоперов Г.С.* О недостатках карт общего сейсмического районирования России // ГеоИнфо. 2020. С. 1–8.
- Shestoperov G.S.* On the shortcomings of general seismic zoning maps of Russia // *GeoInfo*. 2020, pp. 1–8. (In Russ.)
22. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Межведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1964.
- Medvedev S.V., Shponheuer V., Karnik V.* Seismic intensity scale MSK-64. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee under the Presidium of the USSR Academy of Sciences, 1964. (In Russ.)
23. *Шебалин Н.В., Антикаев Ф.Ф.* Развитие шкал типа MSK // Шкалы и методы в макросейсмике. 2003. С. 210–253.
- Shebalin N.V., Aptikaev F.F.* Development of MSK type scales // *Scales and methods in macroseismic*. 2003, pp. 210–253. (In Russ.)
24. *Wood H.O., Neumann F.* Modified Mercalli Intensity Scale of 1931 // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1931, v. 21, pp. 277–283.
25. *Grunthal G.* (Ed.) European Macroseismic Scale 1998 EMS-98. ESC, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scale. Luxembourg, 1998.
26. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. V. 8. P. 338–353.
27. *Dubois J., Gvishiani A.* Dynamic Systems and Dynamic Classification Problems in Geophysical Applications. Paris: Springer-Verlag, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-49951-7.
28. *Гвишиани А.Д., Панченко В.Я., Никитина И.М.* Системный анализ больших данных для наук о Земле // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 6. С. 518–525.
- Gvishiani A.D., Panchenko V.Ya., Nikitina I.M.* System analysis of big data for Earth sciences // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023, v. 93, no. 6, pp. 518–525. (In Russ.)
29. *Гвишиани А.Д., Добровольский М.Н., Дзеранов Б.В., Дзобоев Б.А.* Большие Данные в геофизике и других науках о Земле // Физика Земли. 2022. № 1. С. 3–34. DOI: 10.31857/S0002333722010033.
- Gvishiani A.D., Dobrovolsky M.N., Dzeranov B.V., Dzeboev B.A.* Big Data in Geophysics and Other Earth Sciences // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2022, v. 58, is. 1, pp. 1–29. DOI: 10.1134/S1069351322010037.
30. *Майер-Шенбергер В.М., Кукьер К.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живём, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014.
- Mayer-Schoenberger V.M., Kukier K.* Big data. A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Moscow. Mann, Ivanov and Ferber, 2014. (In Russ.)
31. *Гвишиани А.Д., Дзеранов Б.В., Скоркина А.А., Дзобоев Б.А.* Мировые сейсмические сети и каталоги землетрясений // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 1. ES1012. DOI: 10.2205/2024es000901.

- Gvishiani A.D., Dzeranov B.V., Skorkina A.A., Dzeboev B.A.* World Seismic Networks and Earthquake Catalogs // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2024, v. 24, is. 1, ES1012. DOI: 10.2205/2024es000901.
32. *Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M. et al.* System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. 2021, v. 11, 7972. DOI: 10.3390/app11177972.
33. *Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. и др.* Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988.  
*Gvishiani A.D., Gorshkov A.I., Rantsman E.Ya. et al.* Recognition of Earthquake-Prone Areas in the Regions of Moderate Seismicity. Moscow: Nauka, 1988. (In Russ.)
34. *Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Дзебоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: 10.31857/S0002333720010044.
- Gvishiani A.D., Soloviev A.A., Dzeboev B.A.* Problem of Recognition of Strong-Earthquake-Prone Areas: a State-of-the-Art Review // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020, v. 56, is. 1, pp. 1–23. DOI: 10.1134/S1069351320010048.
35. *Rozenberg I.N., Dulin S.K.* Current Issues Problems of Geoinformatics // Russian Journal of Earth Sciences. 2024, v. 24, is. 1. DOI: 10.2205/2024ES000893.

## FUZZY SETS AND BIG DATA IN THREE-DIMENSIONAL INTERPRETATION OF SEISMIC ZONING

**A.D. Gvishiani<sup>a,b,\*</sup>, N.A. Fomenko<sup>a,\*\*</sup>, B.A. Dzeboev<sup>a,b,\*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

\*\*E-mail: n.fomenko@gcras.ru

\*\*\*E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Natural hazards and disasters are destructive, lead to serious material damage and a large number of casualties, and in most cases occur suddenly. One of these hazardous natural disasters is earthquakes. The article is devoted to studying the possibility of using fuzzy sets for processing Big Data to reduce the destructive consequences of earthquakes. The article proposes a new possible approach to interpreting the results of seismic zoning of the territory of the Russian Federation and neighboring countries.

The article is based on the materials of the scientific report made at the All-Russian Scientific Conference “Hazardous Natural Phenomena and Disasters: Causes, Consequences, Prevention Possibilities (Laverov Readings – 2024)”.

*Keywords:* fuzzy sets, Big Data, 3D model, seismic hazard, seismic zoning.