

УДК 550.341

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ МОРФОСТРУКТУРНЫХ ЛИНЕАМЕНТОВ НА КАВКАЗЕ И В РЕГИОНЕ АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЕ

© 2021 г. А. Д. Гвишиани^{a, b}, Б. А. Дзебоев^{a, c, *}, С. М. Агаян^a, И. О. Белов^a, Ю. И. Николова^a

^aГеофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119296 Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^cГеофизический институт ВНЦ РАН, ул. Маркова, 93а, Владикавказ, 362002 Россия

*e-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Поступила в редакцию 30.10.2020 г.

После доработки 09.11.2020 г.

Принята к публикации 11.12.2020 г.

Статья посвящена распознаванию мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе и в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье. Предлагается новый подход к классификации пересечений морфоструктурных линейментов с помощью определения нечеткого множества. Последнее дает возможность интегральной интерпретации единого результата (композиции) распознаваний высокосейсмичных зон, выполненных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”.

Ключевые слова: распознавание мест возможного возникновения землетрясений, ЕРА, Барьер-3, Кора-3, нечеткие множества, сейсмическая опасность, Кавказ, регион Алтай–Саяны–Прибайкалье

DOI: 10.31857/S0203030621020036

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным инструментом поиска решений задачи определения мест возможного возникновения сильных землетрясений является распознавание образов [Гвишиани и др., 2019, 2020; Соловьев и др., 2014]. Принципиальная возможность использования такого подхода впервые была обоснована в 1972 г. в работе [Гельфанд и др., 1972]. Позже разработанный в работе [Гельфанд и др., 1972] метод, интегрирующий в себе кроме блока распознавания образов геолого-геофизические и геоморфологические исследования в рассматриваемом регионе, получил название ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [Гвишиани и др., 2020; Косо-боков, Соловьев, 2018; Соловьев и др., 2014 и др.].

За прошедшие с момента его создания и развития полвека ЕРА был применен для распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в большинстве горных стран мира [Гвишиани и др., 2020; Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018]. Формализованная постановка проблемы ЕРА в ее классическом виде приведена в работах [Гвишиани и др., 2020; Соловьев и др., 2014].

До 2017 г. для выполнения классификации объектов распознавания на высоко- и низкосейсмичные в ЕРА использовались исключительно классические алгоритмы дихотомии с обучением:

“Кора-3” [Бонгард и др., 1966; Вайнцвайг, 1973; Гвишиани и др., 2020 и др.], “Подклассы” [Гвишиани и др., 2020; Гельфанд и др., 1976 и др.] и “Правило Хемминга” [Гвишиани и др., 2020; Косо-боков, 1981]. Эти алгоритмы являются частными случаями семейства алгоритмов ГНП (Голосование по Набору Признаков), построенного А.Д. Гвишиани и В.А. Гурвичем [Гвишиани, Гурвич, 1992].

Перечисленные алгоритмы осуществляют дихотомию с обучением множества пересечений морфоструктурных линейментов [Габриэлов и др., 1977; Ранцман, 1979; Ранцман, Гласко, 2004; Alekseevskaya et al., 1977], являющихся объектами распознавания, на высоко- и низкосейсмичные подмножества. Базой обучения при этом является пара B_0 и H_0 . В этой паре B_0 не может содержать в себе объектов противоположного низкосейсмичного класса H , т.е. является “чистой” обучающей выборкой высокосейсмичного класса B . В свою очередь, H_0 необходимо содержит в себе как высоко- так и низкосейсмичные объекты, т.е. не является “чистым” низкосейсмичным классом обучения.

Практика применения метода ЕРА в многочисленных горных странах мира продиктовала необходимость избежать в распознавании такой асимметричности обучения [Гвишиани и др., 2017]. Стало ясно, что для повышения достовер-

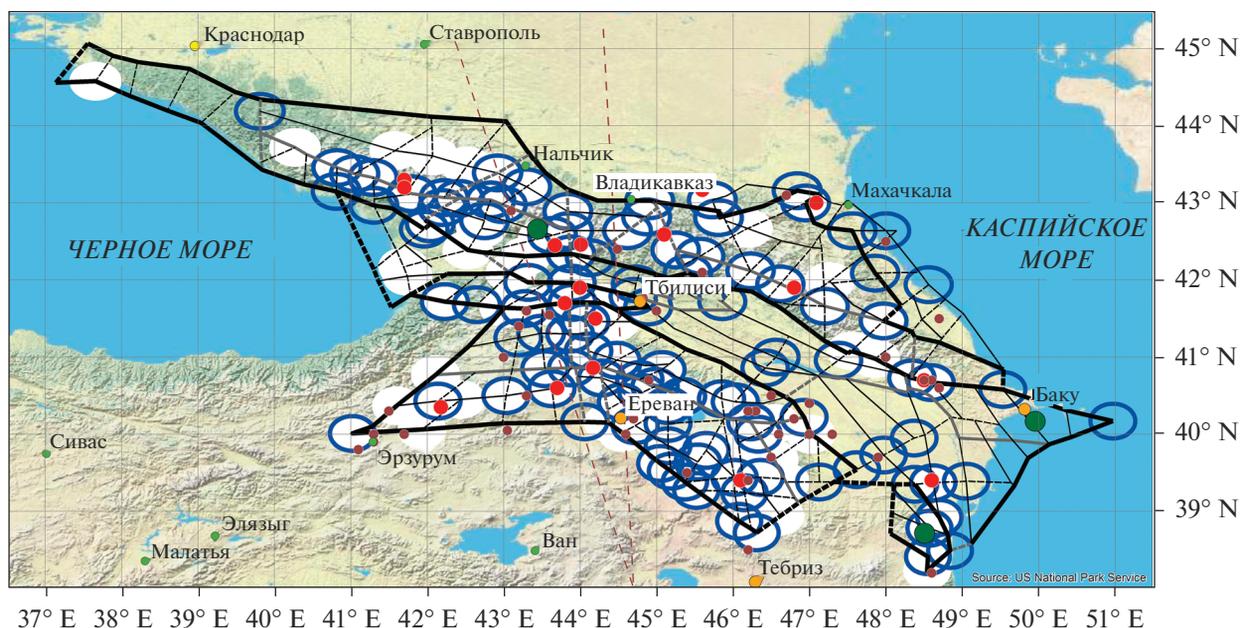


Рис. 1. Схема морфоструктурного районирования Кавказа (толстые черные линии – линеаменты I-го ранга, средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга, сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные) [Соловьев и др., 2013], места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (пустые эллипсы с темными границами – “Барьер-3” [Dzeboev et al., 2019], белые эллипсы – “Кора-3” [Соловьев и др., 2016], белые эллипсы с темными границами – оба алгоритма) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ (маленькие коричневые точки – до 1900 г., средние красные точки – за период 1900–1992 гг., большие темно-зеленые точки – начиная с 1993 г.). Бордовыми вертикальными пунктирными линиями отмечено Транскавказское поднятие (по [Акопян и др., 2017]).

ности результатов распознавания следует создать алгоритм с обучением по единственному высокосейсмичному классу B_0 , включающему в себя объекты, в окрестностях которых сильные землетрясения уже известны [Гвишиани и др., 2020].

В 2017 г. авторами работы [Гвишиани и др., 2017] был создан принципиально новый алгоритм “Барьер” для его использования в качестве нового блока распознавания метода ERA. В 2019 г. этот алгоритм был модифицирован. Новая версия алгоритма получила название “Барьер-3” [Dzeboev et al., 2019; Dzeboev et al., 2019]. Принципиальным отличием алгоритмов “Барьер” и “Барьер-3” от алгоритмов, ранее используемых в ERA, является то, что процесс обучения в них ведется лишь по одной достоверной выборке B_0 высокосейсмичного класса. Эта выборка не содержит в себе заведомых ошибок классификации. “Барьер-3” хорошо зарекомендовал себя при распознавании высокосейсмичных зон в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье [Dzeboev et al., 2019] и на Кавказе [Dzeboev et al., 2019].

В настоящей статье на примере регионов Алтай–Саяны–Прибайкалье и Кавказ строится совместная интерпретация мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$, распознанных по одному (“чистому”) и двум (“чистому” и “смешанному”) классам обучения. Интерпрета-

ция базируется на композиции конструкции нечеткого множества и результатов, полученных независимо алгоритмом “Барьер-3” и классической дихотомией “Кора-3”.

МЕСТА ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С $M \geq 6.0$ НА КАВКАЗЕ

В 2013 г. в работе [Соловьев и др., 2013] была построена схема морфоструктурного районирования (МСР) Кавказа. На ней выделено 237 пересечений осей морфоструктурных линеаментов трех рангов (рис. 1). В 2016 г. в работе [Соловьев и др., 2016] с помощью алгоритма дихотомии “Кора-3” на Кавказе было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$. В 2019 г. в работе [Dzeboev et al., 2019] было выполнено независимое распознавание с использованием алгоритма “Барьер-3” в качестве блока классификации объектов метода ERA.

На рис. 1 представлено сравнение классификаций пересечений линеаментов на Кавказе, полученных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”. Отметим, что в обоих алгоритмах в качестве обучающей выборки B_0 высокосейсмичного класса использовались 16 пересечений морфоструктурных линеаментов, в окрестностях которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$, начиная с 1900 г. (17 землетрясений за период

1900–1992 гг.). Алгоритм “Барьер-3” распознал как высокосейсмичные 108 пересечений линеаментов (пустые эллипсы с темными границами, см. рис. 1) [Dzeboev et al., 2019], “Кора-3” – 107 пересечений (белые эллипсы, см. рис. 1) [Соловьев и др., 2016], одновременно оба алгоритма – 73 (белые эллипсы с темными границами, см. рис. 1). Совокупность окрестностей пересечений линеаментов, классифицированных как высокосейсмичные, – эллипсов (см. рис. 1), используемых для вычисления значений геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания, согласно подходу ЕРА [Гвишиани и др., 2020; Кособоков, Соловьев, 2018; Соловьев и др., 2014], определяет места возможного возникновения землетрясений (в данном случае для $M \geq 6.0$).

Из рис. 1 видно, что объекты, расположенные на продольных линеаментах II-го ранга и независимо классифицированные обоими алгоритмами как высокосейсмичные в Центральном и Юго-Восточном сегментах Большого Кавказа, образуют протяженные зоны вдоль оси Главного хребта. Хорошее совпадение результатов наблюдается в восточном секторе Малого Кавказа и на Армянском вулканическом нагорье.

Совокупность объектов, расположенных на поперечных линеаментах II-го ранга и отнесенных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3” к высокосейсмичному классу B , образует в пределах Транскавказского поперечного поднятия протяженную субмеридиональную зону, соединяющую места возможного возникновения сильных землетрясений на Большом и Малом Кавказе. Также достаточно хорошая согласованность высокосейсмичных зон наблюдается в районе Тальшских гор. Заметим, что значительная часть известных в регионе землетрясений с $M \geq 6.0$ произошла в окрестности объектов, образующих описанные зоны.

Анализ рис. 1 показал, что все 17 эпицентров землетрясений (1900–1992 гг.) с $M \geq 6.0$, используемых для формирования обучающих выборок B_0 алгоритмов, находятся внутри зон, распознанных обоими алгоритмами как высокосейсмичные. Из 42 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших до 1900 г. (см. рис. 1) и составлявших при распознавании материал экзамена, внутри зон, распознанных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”, находятся 35 и 34 эпицентра соответственно.

На рис. 1 показаны эпицентры трех землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших на Кавказе начиная с 1993 г. Информация об этих землетрясениях никак не использовалась при формировании обучающих выборок алгоритмов и тем самым представляет собой материал чистого эксперимента. Два эпицентра находятся строго внутри высоко-

сейсмичных зон, распознанных обоими алгоритмами (см. рис. 1).

Таким образом, из 62 рассматриваемых на Кавказе землетрясений $M \geq 6.0$ вне высокосейсмичных зон, распознанных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”, находятся, соответственно, 8 и 9 эпицентров.

Полученные независимо положительные варианты распознавания алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3” (см. рис. 1) делают их контрольными экспериментами друг для друга. В силу достаточной близости результатов эти контрольные эксперименты следует признать удачными, что повышает оценку достоверности распознавания.

МЕСТА ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С $M \geq 6.0$ В РЕГИОНЕ АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЕ

На рис. 2 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, распознанные независимо алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”. Здесь в качестве B_0 использовались 16 пересечений линеаментов, в окрестности которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$, начиная с 1900 г. (15 землетрясений за период 1900–2012 гг.). Сравнительный анализ результатов показал их хорошую согласованность. Алгоритм “Барьер-3” распознал как высокосейсмичные 32 пересечения линеаментов из 97 [Дзебоев и др., 2019], “Кора-3” – 33 пересечения [Горшков и др., 2018]. При этом оба алгоритма отнесли 25 объектов к классу B .

Из рис. 2 видно, что различия в классификации объектов алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3” наблюдаются в Чуйской степи и предгорьях Курайского и Чулышманского хребтов на Восточном Алтае. Здесь “Кора-3” распознал на 4 пересечения линеаментов больше. Различия также наблюдаются на Окинском плоскогорье, ограниченном Окинским хребтом и южной частью Восточных Саян, и на северном и западном побережьях оз. Байкал (см. рис. 2).

Если в качестве мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье рассматривать объединение подмножеств пересечений линеаментов, классифицированных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3” как опасные, то из рис. 2 видно, что потенциально высокосейсмичные зоны группируются вдоль границ горных систем. Так, высокосейсмичным является продольный линеамент II-го ранга, отделяющий изучаемый регион от Монгольского Алтая. 4 из 5 находящихся на нем пересечений распознаны как опасные. Аналогично высокосейсмичным является поперечный линеамент I-го ранга (4 из 5 пересечений), отделяющий

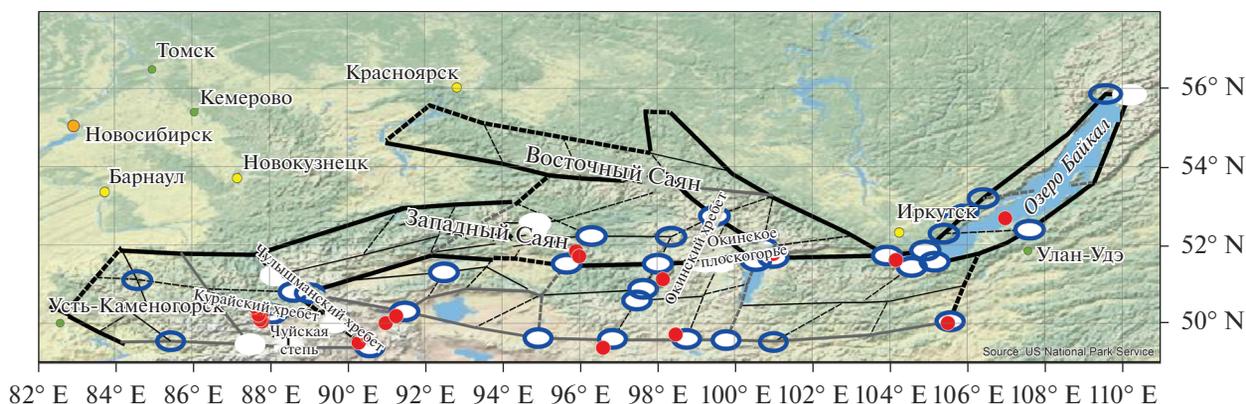


Рис. 2. Схема морфоструктурного районирования региона Алтай–Саяны–Прибайкалье [Горшков и др., 2018] (обозначения см. рис. 1), места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ [Горшков и др., 2018; Дзедобоев и др., 2019] (обозначения см. рис. 1) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ (1900–2012 гг.).

Восточный Алтай от Западных Саян. На продольном линементе I-го ранга, отделяющем Западный и Восточный Саяны от горных хребтов Хангая, распознаны как высокосейсмичные все 7 пересечений.

На юге рассматриваемого региона (см. рис. 2) классифицированы как высокосейсмичные 8 из 10 объектов на продольном линементе II-го ранга. 6 из 7 объектов объявлены опасными на поперечном линементе III-го ранга в центральном сегменте изучаемого региона. Сейсмоопасным признан продольный линемент I-го ранга, обрамляющий западное побережье оз. Байкал.

Следует отметить, что эпицентры всех 15-ти рассматриваемых в регионе землетрясений с $M \geq 6.0$ (1900–2012 гг.) расположены строго внутри зон, распознанных обоими алгоритмами.

Результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, полученные алгоритмами “Барьер-3” (один класс обучения) и “Кора-3” (два класса обучения), достаточно хорошо согласуются (см. рис. 2). Это говорит в пользу достоверности обоих результатов, т.к. распознавание производилось независимо.

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ЛИНЕАМЕНТОВ

Понятие нечеткого множества было введено в 1965 г. основоположником “нечеткой математики” Лофти Заде в статье “Fuzzy Sets”, опубликованной в журнале “Information and Control” [Zadeh, 1965]. Этот выдающийся математик расширил классическое понятие множества, допустив, что его характеристическая функция может принимать любые значения в интервале $[0, 1]$, а не только значения 0 и 1. Расширив, таким образом,

класс характеристических функций, Л. Заде назвал их функциями принадлежности.

Определение 1. Под нечетким множеством A понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсума X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$ [https://ru.wikipedia.org]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}.$$

При этом $\mu_A(x)$ – *функция принадлежности* (обобщение понятия характеристической функции классических четких множеств) указывает, в какой степени (мере) элемент x принадлежит нечеткому множеству A .

Функция $\mu_A(x)$, вообще говоря, принимает значения в некотором линейно упорядоченном множестве M [Фихтенгольц, 2015], которое называют множеством принадлежности. В его качестве мы выбираем отрезок $[0, 1]$, заведомо являющийся линейно упорядоченным множеством. Заметим, что если $M = \{0, 1\}$ (т.е. множество принадлежностей состоит из двух элементов), то нечеткое множество превращается в классическое.

Пусть A – нечеткое множество с элементами из универсума X и его $M = [0, 1]$.

Определение 2. Носителем (support) A называется множество:

$$\{x | x \in X, \mu_A(x) > 0\} = \text{supp} A.$$

Определение 3. Верхняя грань, вычисленная как $\sup_{x \in X} \mu_A(x)$, называется высотой нечеткого множества A .

Нечеткое множество нормально, если его высота равна 1. Если высота A строго меньше 1, нечеткое множество A называется субнормальным.



Рис. 3. Схема построения нечеткого множества высокосейсмичных пересечений линейментов.

Нечеткое множество пусто, если $\forall x \in X: \mu_A(x) = 0$.

Элементы $x \in X$, для которых $\mu_A(x) = 0.5$, называются точками перехода нечеткого множества A .

Применим конструкцию нечеткого множества для построения интегрального результата, равноценный вклад в который вносят алгоритмы “Барьер-3” и “Кора-3”.

Положим универсум X равным множеству W всех пересечений морфоструктурных линейментов (объектов) в регионе, где уже проведено независимое распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”. Определим искомое нечеткое множество высокосейсмичных объектов, в окрестности которых возможны землетрясения с $M \geq 6.0$, как множество пар:

$$B = \{w, \mu_B(w) | w \in W\}. \tag{1}$$

При этом функция принадлежности $\mu_B(w)$ задается формулой:

$$\mu_B(w) = \mu_{B_B, B_K}(w) = \begin{cases} 1, w \in B_B \cap B_K \\ 0.5, w \in B_B \Delta B_K \\ 0, w \notin B_B \cup B_K \end{cases} \tag{2}$$

$$= (B_B \cup B_K) \setminus (B_B \cap B_K),$$

где B_B и B_K – множества объектов, распознанных как высокосейсмичные алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3” соответственно.

Согласно формулам (1)–(2) интегральный результат распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений может быть интерпретирован как непустое нормальное нечеткое множество. Из (1)–(2) следует, что это имеет место для любой пороговой магнитуды M_0 , такой, что задача имеет смысл, и соответствующее распознавание обоими алгоритмами выполнено.

Высокосейсмичными объектами в интегральном результате будем считать пересечения для которых $\mu_{B_B, B_K}(w) > 0$ (рис. 3). Иными словами, мы ищем объекты $w \in W$, принадлежащие носителю нечеткого множества B , определенного формулой (1). Таким образом, на основе формулы (2) нам нужно определить $supp B$.

На рис. 4 показаны примеры интерпретации результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе и в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье с помощью конструкции нечеткого множества (1)–(2).

Все рассматриваемые в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье землетрясения с $M \geq 6.0$ (см. рис. 2) использовались для формирования обучающих выборок высокосейсмичного класса алгоритмов “Барьер-3” и “Кора-3” [Горшков и др., 2018; Дзобоев и др., 2019]. В силу полученных результатов указанные эпицентры располагаются в окрестностях объектов, отнесенных к классу B обоими алгоритмами (см. рис. 4а). Отсюда количество “пропусков цели” распознавания, полученного с помощью нечеткой функции (см. рис. 4а), такое же, как у каждого из алгоритмов в отдельности (см. рис. 2). Во всех трех случаях это число равно нулю. В данном случае распознавание с помощью формул (1)–(2) не влияет на качество результата, а лишь увеличивает количество искомым высокосейсмичных объектов, где сильные землетрясения до настоящего времени не были зарегистрированы.

Иная ситуация имеет место на Кавказе. Подход с помощью нечеткой функции априорно улучшает здесь качество результата. Напомним, что на рис. 1 из 62 эпицентров рассматриваемых землетрясений с $M \geq 6.0$ вне высокосейсмичных зон, распознанных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”, находятся 8 и 9 эпицентров соответственно. При этом всего 4 эпицентра находятся за пределами зон, определенных как высокосейсмичные по (1)–(2) (см. рис. 4б).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было показано на рис. 1 и 2, места возможного возникновения сильных землетрясений в регионах Алтай–Саяны–Прибайкалье и Кавказ, распознанные алгоритмом “Барьер-3” (один класс обучения) и классическим алгоритмом дихотомии “Кора-3” (два класса обучения), хорошо согласуются. В пользу близости результатов говорит и схожесть критериев высокой сейсмичности [Гвишиани и др., 2020], выявленных алгоритмами в изученных регионах [Горшков и др., 2018; Дзобоев и др., 2019; Соловьев и др., 2016; Dzeboev et al., 2019].

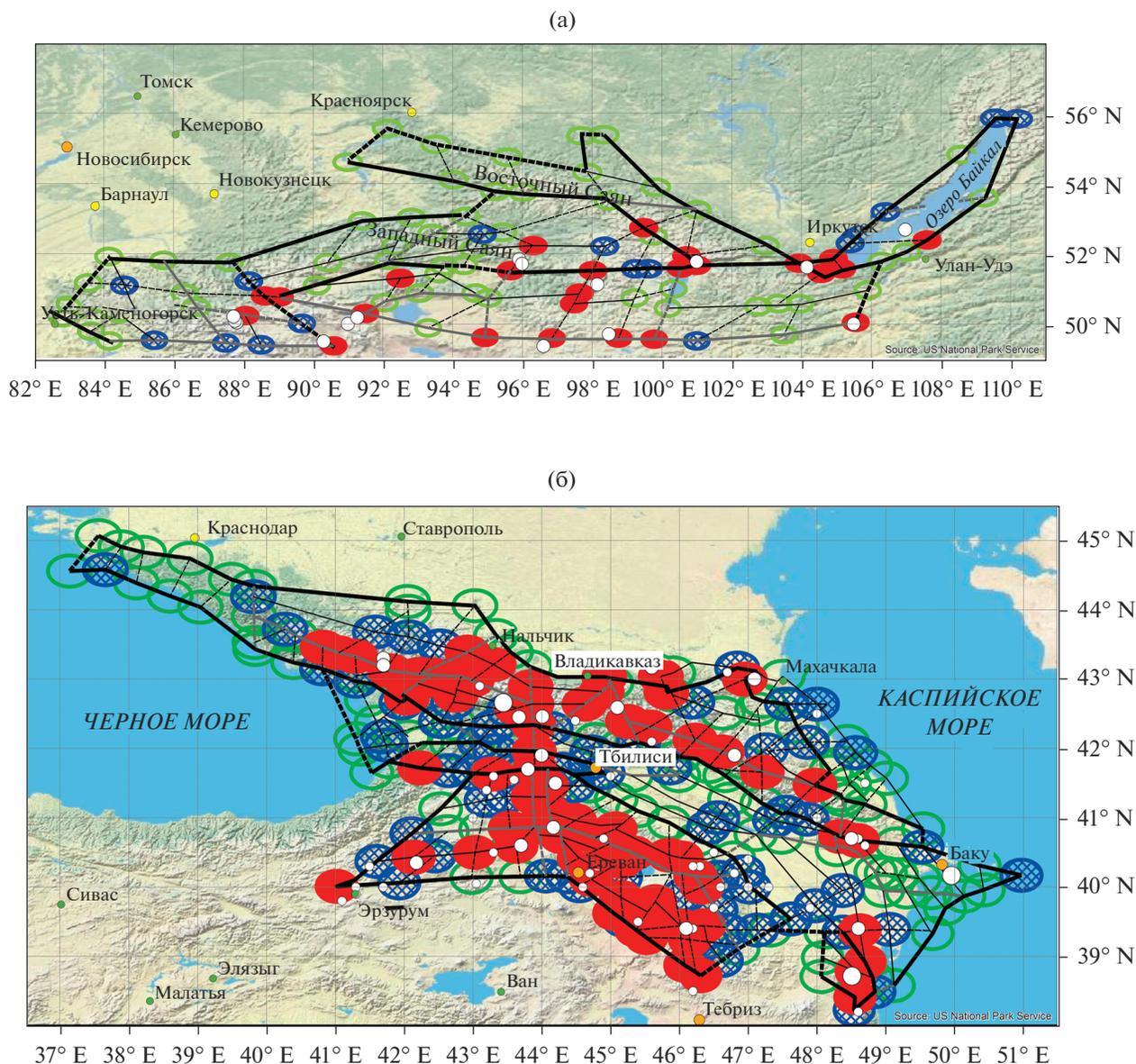


Рис. 4. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ с помощью нечеткой композиции (1–2) алгоритмов “Барьер-3” и “Кора-3”.

а – регион Алтай–Саяны–Прибайкалье (белые точки – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$); б – Кавказ (белые точки – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: маленькие – до 1900 г., средние – 1900–1992 гг., большие – после 1992 г.). Объекты с функцией принадлежности $\mu_{B_b, B_k} = 1$ показаны красным цветом (сплошные эллипсы), синим (заштрихованные эллипсы) – $\mu_{B_b, B_k} = 0.5$, зеленым (пустые эллипсы) – $\mu_{B_b, B_k} = 0$.

Высокосейсмичные зоны, определенные обоими алгоритмами, хорошо согласуются как с эпицентрами исторических и инструментальных сильных землетрясений, произошедших до выполнения распознавания, так и с эпицентрами землетрясений, не участвовавших в формировании обучающих выборок и, соответственно, являющихся материалом чистого эксперимента.

Алгоритмы “Барьер-3” и “Кора-3” классифицировали как высокосейсмичные, соответствен-

но, 46 и 45% пересечений линейментов на Кавказе (см. рис. 1), 32 и 34% – в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье (см. рис. 2). В интегральном результате, полученном с помощью нечеткого множества, высокосейсмичными объявлено 41.2% объектов в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье (см. рис. 4а) и 59.9% – на Кавказе (см. рис. 4б). При этом в проблеме ЕРА [Гвишиани и др., 2020; Кособоков, Соловьев, 2018; Соловьев и др., 2014 и др.], как правило, результат считается нетривиаль-

ным, если не более 60% объектов классифицированы как высокосейсмичные [Соловьев и др., 2014].

Распознавание, полученное по формулам (1)–(2) (см. рис. 4), для обоих регионов удовлетворяет этому условию. Таким образом, это позволяет получить новый нетривиальный результат для обоих регионов и вдвое уменьшить количество “пропусков цели” на Кавказе.

Улучшение результата связано с тем, что использование нечеткой математики позволяет интегрировать воедино различные критерии двух независимых распознаваний, выполненных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”. Это позволяет в какой-то мере компенсировать неполноту, а иногда и дефектность исходных данных.

Предложенная в настоящей статье математическая конструкция, представляющая собой композицию нечеткого множества и классификаций высокосейсмичных зон, независимо распознанных с обучением по одному и двум классам, является шагом на пути к созданию инструмента системного анализа. Этот инструмент может оказаться весьма полезным для дальнейшего изучения проблемы определения мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-70054 “Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Бонгард М.М., Вайнцвайг М.Н., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Смирнов М.С. Использование обучающейся программы для выявления нефтеносных пластов // Геология и геофизика. 1966. № 6(II). С. 15–29.
- Вайнцвайг М.Н. Алгоритм обучения распознаванию образов “Кора” // Алгоритмы обучения распознаванию образов. М.: Сов. Радио, 1973. С. 8–12.
- Габриэлов А.М., Горшков В.И., Раницман Е.Я. Опыт морфоструктурного районирования по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. В.И. Кейлис-Борока // Вычислительная сейсмология. 1977. Вып. 10. С. 50–58.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзобоев Б.А., Белов И.О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Докл. АН. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92.
<https://doi.org/10.7868/S0869565217130175>
- Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука, 1992. 360 с.
- Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н., Вавилин Е.В. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. 2019. № 1. С. 42–60.
<https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзобоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29.
<https://doi.org/10.31857/S0002333720010044>
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф.С., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Вычислительная сейсмология. Вып. 9. Исследование сейсмичности и моделей Земли / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. М., 1976. С. 3–91.
- Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье // Докл. АН. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335.
<https://doi.org/10.7868/S0869565218090219>
- Дзобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Татаринов В.Н., Агаян С.М., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье. $M \geq 6.0$ // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47.
<https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47>
- Кособоков В.Г. Распознавание мест сильных землетрясений востока Средней Азии и Анатолии методом Хемминга // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. М., 1981. С. 76–81.
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. Вып. 4. С. 53–88.
<https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>
- Раницман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 172 с.
- Раницман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-Пресс, 2004. 224 с.
- 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.
<https://doi.org/10.7868/S0002333714020112>
- 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 // Докл. АН. 2013. Т. 450. № 5. С. 599–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565213170222>

Соловьев Ал.Ан., Горшков А.И., Соловьев Ан.Ал. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21–27. <https://doi.org/10.7868/S0002333716050148>

Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Санкт-Петербург: Лань, 2015. Ч. 1. 448 с., Ч. 2. 464 с.

Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E. Formal morphostructural zoning of mountain territories // Geophysics. 1977. V. 42(2). P. 227–233.

Dzeboev B.A., Soloviev A.A., Dzeranov B.V., Karapetyan J.K., Sergeeva N.A. Strong earthquake-prone areas recognition

based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus, $M \geq 6.0$. Variable EPA method // Russian J. Earth Sciences (RJES). 2019. V. 19. P. ES6005. <https://doi.org/10.2205/2019ES000691>

Gorshkov A., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the Arc-Map // Acta Geophysica. 2018. V. 66. Iss. 5. P. 843–853. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177-3>

https://ru.wikipedia.org/wiki/Нечеткое_множество.

Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. V. 8. P. 338–353.

Fuzzy Sets of High Seismicity Crossings of Morphostructural Lineaments in the Caucasus and in the Altai–Sayan–Baikal Region

A. D. Gvishiani^{1, 2}, B. A. Dzeboev^{1, 3, *}, S. M. Agayan¹, I. O. Belov¹, and J. I. Nikolova¹

¹Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia

²Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia

³Geophysical Institute – the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Markova str., 93a, Vladikavkaz, 362002 Russia

*e-mail: b.dzeboev@gcras.ru

The article is devoted to earthquake-prone areas recognition with $M \geq 6.0$ in the Caucasus and in the Altai–Sayan–Baikal region. A new approach to the classification of intersections of morphostructural lineaments using the definition of a fuzzy set is proposed. The latter enables an integral interpretation of a single result (composition) of high seismicity zones recognition performed by the “Barrier-3” and “Cora-3” algorithms.

Keywords: earthquake-prone areas recognition, EPA, Barrier-3, Cora-3, fuzzy sets, seismic hazard, Caucasus, Altai–Sayan–Baikal region