

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию Дзебоева Бориса Аркадьевича «Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа Б.А. Дзебоева направлена на решение важной научной проблемы – распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. Методологические основы определения мест возникновения будущих землетрясений заложили полвека назад всемирно известные ученые, академики И.М. Гельфанд и В.И. Кейлис-Борок. Позднее ученик И.М. Гельфанда академик РАН А.Д. Гвишиани сделал важный шаг в развитии этой методологии – создание математической теории стабильности финальных решений в предельных задачах распознавания мест землетрясений.

В рассматриваемой диссертации ученик А.Д. Гвишиани Борис Аркадьевич Дзебоев развивает математическую компоненту решения этой фундаментальной задачи. Задача заключается в нахождении в геофизических терминах различий между районами, где могут или нет возникать в будущем сильные землетрясения. В диссертационной работе распознавание мест возможного возникновения землетрясений осуществляется как с обучением по одному известному классу, так и вообще без обучения. Актуальность исследования подчеркивается перспективой использования мест возможного возникновения землетрясений при построении современных карт сейсмической опасности.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав и заключения и изложена 309 страницами. Список использованной литературы содержит 330 источников.

Во введении описаны актуальность, объекты, цель, новизна и достоверность результатов исследования, перечислены защищаемые положения, указан личный вклад диссертанта.

Первая глава представляет собой, на мой взгляд, наиболее полный исторический обзор по полувековому применению методов распознавания образов для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, для которых диссертант использует сокращение ЕРА (Earthquake-Prone Area). Обзор выполнен достаточно качественно и базируется на анализе огромного цикла работ, выполнявшихся в разных институтах АН СССР и РАН при активном международном сотрудничестве. Отметим, что обзор является актуальным в связи с быстрым развитием методов искусственного интеллекта в науке и других областях жизни человека. Применявшиеся на разных этапах развития ЕРА алгоритмы распознавания образов являются, по сути, прототипом

методов искусственного интеллекта. Развитию алгоритмов распознавания образов для применения в задаче ЕРА посвящены все последующие главы диссертации.

Вторая глава диссертации посвящена результатам распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе обучения по единственному достоверному классу. Рассматриваются 2 сейсмоактивных региона Российской Федерации - Алтай-Саяны-Прибайкалье и Кавказ и распознаются места, в границах которых могут в будущем возникнуть землетрясения с $M \geq 6.0$. В качестве объектов распознавания диссертант использует точки пересечений осей морфоструктурных линеаментов.

Для классификации объектов применяется оригинальный алгоритм «Барьер-3», разработанный диссертантом в 2017 году и доведенный до вида, представленного в диссертации, в 2019 году. Алгоритм «Барьер-3» имеет принципиальное отличие от алгоритмов, использовавшихся до сегодняшнего дня при решении задачи ЕРА распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Отличие заключается в том, что обучение в нем ведется только по одной выборке высокосейсмичного класса, которая не содержит в себе заведомых ошибок классификации.

Сформулированы критерии высокой сейсмичности рассматриваемых в главе регионов. Критерии представляют собой численно выраженный вклад используемых геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания в формирование конечного высокосейсмичного множества пересечений линеаментов. Диссертантом определены интервалы значений характеристик, свойственные объектам распознанным как высокосейсмичные.

По результатам выполненного в главе распознавания проведен сравнительный анализ мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье с результатами, полученными с помощью классического алгоритма дихотомии «Кора-3». Анализ показал хорошее совпадение высокосейсмичных зон, распознанных разными алгоритмами.

Диссертантом предложена интерпретация совместного результата определения высокосейсмичных зон, полученного с помощью алгоритмов распознавания «Кора-3» и «Барьер-3». Множество точек пересечения осей морфоструктурных линеаментов определяется как нечеткое множество объектов, в окрестности которых возможно возникновение сильных землетрясений. Приведен возможный вид функции принадлежности к такому множеству.

Подход, основанный на определении нечеткого множества, к оценке сейсмической опасности впервые примененный диссертантом представляется важным аспектом работы. Он намечает пути дальнейшего расширения использования теории нечетких множеств в сейсмическом районировании.

Третья глава посвящена подробному описанию математических конструкций созданных диссертантом методов распознавания мест возможного возникновения землетрясений. Разработанный метод FCAZ является принципиально новым математическим подходом к решению задачи ЕРА. Он позволяет отказаться от проведения морфоструктурного районирования, являющегося наиболее трудоемким и неоднозначным этапом распознавания классическим подходом ЕРА. В качестве объектов распознавания FCAZ использует эпицентры слабых землетрясений.

FCAZ осуществляет системный подход к исследованию мест возможного возникновения сильных землетрясений. Его суть состоит в том, что распознавание высокосейсмичных зон в принципиально различных по своему строению регионах земного шара базируется на универсальных фактах и подходах, позволяющих единообразно подойти к решению всего множества таких задач.

В нем по плотным сгущениям многочисленных эпицентров слабых землетрясений распознаются области повышенной сейсмичности, которые аутентифицируются с местами возникновения сильных землетрясений. Такой замысел диссертанта обоснован. Известно, что сильные землетрясения имеют тенденцию возникать там, где происходит много слабых событий.

Несомненной научной новизной исследования представляется метод SFCAZ. Он является дальнейшим развитием математических идей диссертанта, положенных в основу FCAZ. Математическая структура SFCAZ заключается в итерационном применении FCAZ к уменьшающемуся шаг за шагом множеству объектов распознавания. Это демонстрирует возможность последовательного определения мест возможного возникновения землетрясений для конечной возрастающей последовательности магнитудных порогов.

Четвертая и пятая главы посвящены демонстрации многочисленных результатов распознавания методами FCAZ и SFCAZ. Здесь определяются места возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в различных регионах мира: Южная Америка, Камчатка, Курильские острова, Калифорния, Алтай-Саяны, Прибайкалье-Забайкалье, Кавказ и Крым. Приведенные результаты указывают на достижение диссертантом главной цели его исследования – эффективное распознавание мест возможного возникновения землетрясений используя только инструментальные данные об эпицентрах, в общем, слабых землетрясений.

Особый интерес представляют результаты анализа согласованности определенных методом FCAZ зон и положений эпицентров землетрясений с соответствующими магнитудами, произошедших после окончания инструментальных каталогов, которые использовались диссертантом для выбора множеств объектов распознавания. В диссертации такой анализ называется чистым экспериментом. В изученных в работе регионах произошло 25 таких землетрясений. Согласно тексту

диссертации расположение эпицентров 84% из них говорит об их приуроченности к местам возможного возникновения землетрясений, распознанным методом FCAZ. Такой результат является представительным и дает аргументы в пользу достоверности проведенного распознавания.

Представленные результаты применения метода FCAZ к данным долговременного сейсмологического мониторинга с целью распознавания зон возможного возникновения землетрясений говорят о возможности его использования в регионах с совершенно разным уровнем сейсмической активности. Это имеет практическую ценность.

Шестая глава содержит описание результатов контрольных вычислительных экспериментов и сравнительного анализа мест возможного возникновения землетрясений, определенных методом FCAZ и классическим подходом ЕРА с использованием, как правило, алгоритма дихотомии «Кора-3» в качестве блока распознавания. Приведенный Б.А. Дзобоевым материал убедительно обосновывает достоверность полученных в диссертации результатов распознавания методом FCAZ.

В четвертой и пятой главах диссертации для распознавания методом FCAZ использовались эпицентры всех землетрясений из рассматриваемых инструментальных каталогов. При этом оставался вопрос, в какой степени на получаемые результаты влияют имеющиеся в каталогах форшоковые и афтершоковые последовательности, которые создают плотные скопления эпицентров в отдельных частях изучаемого региона. Последний раздел шестой главы посвящен изучению этого вопроса. В нем описаны результаты, впервые полученные путем применения FCAZ к эпицентрам только главных толчков, которые остаются после исключения из исходного каталога форшоков и афтершоков.

Представленные результаты показывают, что исключение из каталога землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты применения FCAZ. Этот вывод имеет теоретическое значение для дальнейшего развития метода FCAZ и дает дополнительные подтверждения достоверности полученных ранее с его помощью результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений.

Седьмая глава посвящена рассмотрению FCAZ-распознавания с точки зрения теоретического системного анализа и построению его дискретной системно-математической модели.

В **Заключении** в сжатом виде изложены основные результаты диссертационного исследования.

Основные замечания:

- В тексте диссертационной работы землетрясения, места возможного

возникновения которых распознаются, подразделяются на сильнейшие, сильные и значительные. Приведены соответствующие магнитудные пороги. Но при этом в диссертации не приводятся критерии такой классификации сейсмических событий. Их приведение в тексте работы было бы полезным.

- Описанию применения метода FCAZ посвящена значительная часть диссертационной работы. В ней в качестве исходных данных используются инструментальные каталоги землетрясений. При этом в тексте диссертации каталоги описаны недостаточно. Было бы полезно привести более подробное описание используемых каталогов, их представительность и т.п., что позволило бы более обоснованно продемонстрировать выбор порога магнитуды, начиная с которого эпицентры используются в качестве объектов распознавания.

- В сейсмологии введено и используется большое количество различных магнитуд землетрясений. В диссертационной работе следовало бы дать разъяснение о типах используемых магнитуд.

- Информационной основой для выполненного в диссертации анализа являются каталоги. Автор очень внимательно подошел к их составлению. Вместе с тем необходимо сделать одно замечание. Для территории Северной Евразии параметры землетрясений до 1990 года обосновано заимствованы из фундаментальной монографии "Новый каталог сильных землетрясений ..." (1977 г.) и классической работы Н.В. Кондорской с коллегами "О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений ..." (1993 г.). Для периода после 1990 г. таких фундаментальных работ нет. Вместе с тем отмечу, что в 2015 г. ФИЦ "Единая геофизическая служба РАН" был открыт публичный электронный доступ к ежегодно пополняемый Базе данных "Землетрясения России" через Web-ресурс <http://eqru.garas.ru>, в которой приводятся данные о всех землетрясениях, произошедших на территории России начиная с 2003 года. Для землетрясений, произошедших после 2003 г., использование данных из этой базы является более обоснованным.

Сделанные замечания несколько не снижают значимость результатов диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

В диссертационной работе Б.А. Дзедобоевым использовались современные методы математической геофизики, геоинформатики, системного анализа, теории нечетких множеств и ГИС-технологий. Основные полученные научные результаты опубликованы в 18 статьях в журналах из списка ВАК.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертация и автореферат имеют внутреннее единство и включают новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

Диссертация Бориса Аркадьевича Дзедоева выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит новое решение задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. По глубине проработки решаемой задачи и новизне полученных научных результатов диссертация полностью соответствует критериям, установленным п.9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени доктора наук, а её автор Б.А. Дзедоев достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Я, Маловичко Алексей Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

научный руководитель, председатель Ученого совета

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федеральный исследовательский центр

«Единая геофизическая служба Российской академии наук»,

член-корреспондент Российской академии наук,

доктор технических наук

Алексей Александрович Маловичко



249035, г. Обнинск Калужской обл., пр. Ленина, д. 189,

тел.: +7 (495) 912-68-72,

e-mail: amal@gsras.ru

30 апреля 2021 года

Подпись Маловичко Алексея Александровича заверяю:

Ведущий специалист по кадрам ФИЦ ЕГС РАН Е.В. Зюликова

