

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

Актуальность исследований. Объект и предмет исследований.

Диссертационная работа Бориса Аркадьевича Дзедоева посвящена развитию теоретических основ и математического инструментария для поиска решений фундаментальной проблемы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Объектом исследования являются районы, в которых могут возникать сильные землетрясения.

Определение потенциально высокосейсмичных районов представляет собой важнейшую составляющую в исследованиях по сейсмическому районированию и оценке сейсмической опасности. Так, например, информация о возможных местах сильных землетрясений является важным условием для эффективного применения на практике как классических детерминистских методов оценки сейсмической опасности (Deterministic Seismic Hazard Analysis), так и современных не-одетерминистских (Neodeterministic Seismic Hazard Assessment), активно развиваемых в последнее десятилетие научной школой Университета Триеста, Италия (Giuliano Panza, Università degli Studi di Trieste, Italia).

Результаты диссертационной работы создают условия для серьезного усиления достоверности сейсмического районирования, что имеет большое практическое значение для снижения катастрофических последствий землетрясений. Сказанное определяет актуальность диссертационной работы, являющейся новым направлением в математической геофизике.

Научная новизна.

К числу наиболее значимых научных результатов, полученных в диссертационной работе, следует отнести:

- Существенное развитие математического аппарата алгоритмов распознавания образов для определения мест возможного возникновения землетрясений. В том числе, разработка алгоритма классификации объектов с обучением по имеющемуся в распоряжении исследователя единственному классу.

- Использование композиции конструкции нечеткого множества и результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений, полученных разными методами, в качестве основы для усиления их совместной интерпретации.
- Создание допускающей появление во времени дополнительных объектов системно-математической модели метода идентификации высокосейсмичных районов FCAZ. Его дальнейшее развитие для последовательного определения сейсмоопасных зон для некоторой последовательности порогов магнитуды.
- Результаты распознавания потенциально высокосейсмичных районов в ряде горных стран мира, подтвержденные как серией контрольных вычислительных экспериментов, так и результатами чистого экзамена.

Диссертационная работа Бориса Аркадьевича Дзедоева состоит из введения, семи глав, заключения и списка используемой литературы. Она содержит 309 страниц машинописного текста и включает в себя 78 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 330 наименований.

Во **введении** диссертантом дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, приведены цель и задачи исследования, сформулированы защищаемые положения и научная новизна, дана информация о публикациях по теме диссертации и конференциях, на которых были представлены результаты работы.

В **первой главе** приведен достаточно полный обзор истории решения на протяжении почти 50-ти лет задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. В широких научных кругах эта задача известна как ЕРА (Earthquake-Prone Areas). Научный консультант диссертанта академик РАН А.Д.Гвишиани наряду с академиками АН СССР И.М. Гельфандом и В.И. Кейлисом-Бороком стоял у истоков решения задачи ЕРА. А.Д. Гвишиани принадлежит существенная часть публикаций по тематике ЕРА. Проведенные в последние годы апостериорные оценки результатов распознавания показали высокую достоверность подхода ЕРА.

В главе 1 Б.А. Дзедоевым перечислены, за редким исключением, все регионы, в которых в разные годы проводилось ЕРА-распознавание и достаточно подробно описаны его результаты. Обзор содержит подробное и понятное описание

всех этапов решения задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. А именно: выбор объектов распознавания (морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов) – морфоструктурное районирование; оценка приуроченности эпицентров сильных землетрясений к объектам распознавания; формирование векторного описания объектов распознавания; описание применяемых для распознавания алгоритмов дихотомии; методы оценки достоверности результатов распознавания, в том числе контрольные эксперименты.

В завершение обзора диссертант ясно описывает выявленные им недостатки подхода ЕРА (в первую очередь в блоке распознавания образов) и четко формулирует конкретные цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе Б.А. Дзобоевым предложена новая схема решения классической задачи ЕРА. А именно, разработан принципиально иной алгоритм «Барьер-3» классификации дизъюнктивных узлов и пересечений морфоструктурных линеаментов на высоко- и низкосейсмичные. Создание алгоритма «Барьер-3» позволяет отказаться от необходимости формирования материала обучения низкосейсмичного класса, который в силу ограниченности достоверной информации об исторических сильных землетрясениях может содержать заведомые ошибки классификации. Соответственно, эти ошибки могут отрицательно влиять на достоверность экзамена распознавания.

Алгоритм «Барьер-3» использован Б.А. Дзобоевым в качестве блока распознавания для определения в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье и на Кавказе мест, где могут возникать землетрясения с магнитудой, начиная с 6.0. Высокая достоверность полученных результатов продемонстрирована их глубоким анализом, сравнением с высокосейсмичными зонами, ранее определенными подходом ЕРА с использованием классического алгоритма дихотомии «Кора-3», согласованностью с эпицентрами произошедших сильных землетрясений, а также проведением чистого экзамена. Диссертантом показано, что идентифицированные высокосейсмичные зоны характеризуются высокой степенью тектонической раздробленности, наличием плотностных глубинных неоднородностей, специфическим строением и составом земной коры. Б.А. Дзобоевым продемонстрировано, что совместная интерпретация высокосейсмичных зон, определенных разными

методами, улучшает качество результата в случае ее представления в виде нечеткого множества.

Материалы и выводы **второй главы обосновывают третье защищаемое положение.**

Третья глава работы посвящена развитию созданного диссертантом метода распознавания образов FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Так, например, на базе развиваемого с участием диссертанта в Геофизическом центре РАН направления системного анализа – Дискретный математический анализ в структуре FCAZ созданы блоки искусственного интеллекта. Они позволили впервые в задаче определения мест возможного возникновения землетрясений осуществить автоматизированную процедуру выбора свободных параметров алгоритма классификации с учетом реальной картины распределения объектов распознавания. Это является существенным достижением, т.к. в современных реалиях на первый план выходит создание воспроизводимых малопараметрических алгоритмических подходов.

Очередной шаг диссертанта в развитии FCAZ привел к созданию нового метода SFCAZ, который впервые, в рамках проблемы ЕРА, дает возможность проводить последовательное распознавание высокосейсмичных районов для последовательности возрастающих магнитудных порогов.

В четвертой главе дается описание результатов применения метода FCAZ для распознавания мест возможного возникновения сильнейших землетрясений в трех регионах Тихоокеанского сейсмического кольца. Представленные результаты определения высокосейсмичных зон достоверны и представительны. Нетривиальность результатов обоснована диссертантом путем оценки площади, занимаемой распознанными зонами, и процента эпицентров землетрясений, расположенных внутри и на границе FCAZ-зон.

Представленные в главе результаты FCAZ-распознавания для Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка демонстрируют, что сейсмотектонические условия возникновения сильнейших землетрясений в его северной части кардинально отличаются от аналогичных условий на остальной территории побережья. Этот факт является известным. Однако диссертация дает еще один весомый аргумент в пользу исключения северного сектора побережья Камчатки при прогнозе землетрясений в Курило-Камчатском регионе методом академика

С.А. Федотова, основанным на закономерностях «сейсмических брешей» и сейсмического цикла.

Пятая глава диссертационной работы посвящена демонстрации результатов FCAZ-распознавания в Калифорнии и ряде регионов России. Достоверность определенных высокосейсмичных зон обосновывается диссертантом, в частности, их согласованностью с эпицентрами исторических и инструментальных землетрясений. В том числе рассматриваются эпицентры сильных землетрясений, произошедших и после окончания каталога землетрясений, являющегося источником множества объектов распознавания.

Так, эпицентр землетрясения 6 июля 2019 года с $M=7.1$ в Калифорнии расположен строго внутри распознанных FCAZ-зон. Это землетрясение произошло спустя 6.5 лет после окончания используемого в диссертации инструментального каталога. Заметим, что ранее в этом районе сильные землетрясения не были известны. Более того, землетрясения подобной магнитуды в этом районе и не ожидалось. Некоторым ученым удалось ретроспективно указать место подготовки землетрясения по многолетним рядам геодезических данных. В диссертационной работе Б.А. Дзедобоеву удалось картировать эту высокосейсмичную зону с использованием только сейсмологической информации и метода распознавания FCAZ.

Несомненным достижением, изложенным в данной главе, является успешное применение разработанного диссертантом метода SFCAZ для последовательного распознавания высокосейсмичных зон в регионе Прибайкалье-Забайкалье. Метод SFCAZ позволил определить цепочку мест возможного возникновения землетрясений, в которой зоны для большей пороговой магнитуды вложены в зоны для меньшей. Этот результат является весьма полезным для целей сейсмического районирования.

Материалы и выводы третьей и пятой глав обосновывают второе защищаемое положение.

В шестой главе приводятся аргументы, обосновывающие достоверность проведенного методом FCAZ распознавания мест возможного возникновения землетрясений. Результаты контрольных вычислительных экспериментов указывают на устойчивость FCAZ-распознавания во времени и пространстве. Сравнительный анализ высокосейсмичных зон, определенных подходом ERA и методом

FCAZ, выявил ряд преимуществ последнего. Интересным является то, что удаление из используемого при FCAZ-распознавании каталога землетрясений зависимых событий не приводит к существенным изменениям конечного результата распознавания.

В **седьмой** главе FCAZ-распознавание рассматривается с точки зрения теоретического системного анализа. Здесь строится его дискретная системно-математическая модель. Приведенные в главе математические конструкции и рассуждения подтверждают отнесение метода FCAZ к инструментам современного системного анализа в его части исследований во времени изменений характеристик сложной динамической системы.

Материалы и выводы **третьей, четвертой, пятой, шестой и седьмой глав** обосновывают первое защищаемое положение.

В **заключении** кратко приведены основные результаты диссертационной работы.

Общие замечания к диссертационной работе:

- Очевидно, что одной из основных целей диссертационной работы являлось развитие классического подхода ЕРА к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений. В этой связи первая глава работы, представляющая собой исторический обзор, полностью сведена к описанию этапов создания, развития и применения ЕРА. В главе отсутствует упоминание отличных от ЕРА методов и подходов к картированию потенциально высокосейсмичных районов. Анализ научных основ и инструментария таких методов и подходов мог бы дать диссертанту дополнительные аргументы в пользу новизны полученных в диссертации результатов. Также в обзоре не упоминаются развиваемые в России и за рубежом геодинамические подходы при анализе сильнейших землетрясений, происходящих в зонах субдукции: за рубежом - это широко известная концепция шероховатостей (asperity) в зоне контакта взаимодействующих плит, развиваемая на протяжении десятков лет Х.Канамори с соавторами, а в России - разработанная в Институте океанологии им. П.П.Ширшова РАН клавишная геодинамическая модель циклов сильнейших землетрясений, происходящих в зонах субдукции, которая получила в последние годы подтверждение прямыми данными космической геодезии.

- В главе 6 при демонстрации результатов контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» FCAZ-распознавания диссертант приводит иллюстративный материал и описание исключительно для успешных экспериментов. Полезным было бы приведение в тексте диссертации карт-схем и подробного описания для землетрясений, которые не попали в распознанные в рамках эксперимента высокосейсмичные зоны.

- Местами в тексте диссертационной работы встречаются фрагменты текста, которые в том или ином виде повторяют обзорную часть, приведенную в первой главе.

- Иллюстративный материал в автореферате значительно качественнее, чем в диссертационной работе. На некоторых рисунках в диссертации сложно читаются надписи (например, белая звезда и подпись к ней на рис. 5.3). В главах, посвященных FCAZ-распознаванию, за редким исключением на картах не отмечены населенные пункты, что усложняет восприятие приведенных на них результатов.

Диссертационная работа написана Б.А. Дзобоевым самостоятельно. Выдвигаемые на защиту научные положения свидетельствуют о личном вкладе диссертанта в область исследований. Автореферат диссертации кратко, но достаточно полно освещает все полученные автором результаты, которые сопровождаются наглядным иллюстративным материалом.

По теме диссертационной работы Б.А. Дзобоевым опубликовано 18 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК РФ, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и Russian Science Citation Index. Публикации в полной мере отражают результаты диссертационной работы, которые прошли апробацию на целом ряде крупных российских и международных представительных конференций (в том числе, Генеральные ассамблеи IUGG, EGU и ESC).

Выводы.

Диссертация Дзобоева Бориса Аркадьевича «Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений» является завершенным научно-квалификационным исследованием и содержит реше-

ние задачи развития теоретических основ и разработки новых математических методов для поиска решений задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, что имеет существенное значение в исследованиях по оценке сейсмической опасности.

Диссертация соответствует всем 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. Дзобоев достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Я, Лобковский Леопольд Исаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

научный руководитель геологического направления,
руководитель лаборатории геодинамики, георесурсов, георисков и геоэкологии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук,
академик Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор

 Леопольд Исаевич Лобковский

117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,

тел.: +7 (499) 124-59-96,

e-mail: lobkovsky@ocean.ru

21 апреля 2021 года

Подпись Леопольда Исаевича Лобковского заверяю:



