

На правах рукописи



Дзедоев Борис Аркадьевич

**СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ
МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность 25.00.10 — Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геофизическом центре Российской академии наук в лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований и лаборатории геофизических данных.

Научный консультант: **Гвишиани Алексей Джерменович,** академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, научный руководитель, главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований.

Официальные оппоненты: **Лобковский Леопольд Исаевич,** академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, научный руководитель геологического направления, руководитель лаборатории геодинамики, георесурсов, георисков и геоэкологии;

Маловичко Алексей Александрович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», научный руководитель, председатель Ученого совета;

Чубариков Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», президент механико-математического факультета, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук.**

Защита диссертации состоится **20 мая 2021 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « ____ » апреля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Адекватная оценка сейсмической опасности представляет собой важнейшую научную проблему сейсмологии и геофизики в целом. С развитием мировой экономики, освоением новых территорий, проектированием и строительством новых объектов повышенной ответственности важность проблемы растет и приобретает глобальное значение.

Сильные землетрясения (с магнитудой $M \geq M_0$), как правило, возникают не на всей территории региона, подверженного сейсмическим воздействиям [Гвишиани и др., 2017]. Соответственно, распознавание мест возможного возникновения будущих сильных землетрясений является актуальным фундаментальным направлением в исследованиях по оценке сейсмической опасности. Определение потенциально высокосейсмичных зон в сейсмоактивных регионах важно как с теоретической, так и с практической точек зрения [Гвишиани и др., 2016].

Имеющиеся на сегодняшний день методы распознавания высокосейсмичных зон не позволяют многократно корректировать их результаты с течением времени в силу неизменности используемого множества объектов распознавания [Гвишиани и др., 2020]. В диссертации создан новый системно-аналитический метод FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) для решения этой проблемы, который использует эпицентры слабых землетрясений (с $M \geq M_R$) в качестве объектов распознавания [Дзобоев и др., 2018]. Это дает возможность развития результата распознавания зон повышенной сейсмической опасности вслед за появлением эпицентров новых землетрясений. Последнее делает FCAZ методом системного анализа [Grant et al., 1997; Zgurovsky, Pankratova, 2007].

Созданные и разработанные в диссертации методы анализа данных привели к успешному распознаванию мест сильнейших, сильных и значительных землетрясений на континентах Северной и Южной Америки, Евразии и в зонах субдукции Тихоокеанского кольца [Гвишиани и др., 2013; 2016; 2020; и др.]. При этом, в частности, для классического метода определения мест возможного возникновения сильных землетрясений EPA (Earthquake-Prone Areas) [Гельфанд и др., 1972; 1973; 1974; 1976; Гвишиани и др., 1988; 2020; Соловьев и др., 2014; Кособоков, Соловьев, 2018; и др.] в диссертации создается новая схема распознавания высокосейсмичных дизъюнктивных узлов и пересечений линеаментов с обучением лишь по одному высокосейсмичному классу [Гвишиани и др., 2017; Дзобоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019].

Диссертация является продолжением исследований по математическим методам системного анализа и распознавания знаний в геофизике, проводимых научной школой под руководством академика РАН Алексея Джерменовича Гвишиани.

Объектом исследования являются зоны возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в ряде горных стран мира.

Цель работы – создание системно-аналитических подходов и развитие существующих методов распознавания для повышения достоверности решения проблемы идентификации мест возможного возникновения сильных землетрясений по комплексу геолого-геофизических, геоморфологических, сейсмологических и других данных.

Для достижения цели поставлены и решены следующие основные задачи:

- Проведен сравнительный анализ полувековой истории развития алгоритмов распознавания высокосейсмичных зон. На основе проведенного анализа сделаны выбор и постановка задач диссертационного исследования.

- Создан оригинальный метод классификации объектов с обучением по одному классу, базирующийся на принципах дискретного математического анализа и элементах искусственного интеллекта.

- Разработана новая методика отбора информативных характеристик объектов распознавания высокосейсмичных зон для случая одного класса обучения.

- Выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в ряде сейсмически опасных регионов России с обучением по одному классу.

- Создана новая системно-аналитическая версия алгоритмической системы FCAZ для распознавания высокосейсмичных зон на базе объектов – эпицентров слабых землетрясений.

- Проведено FCAZ-распознавание и построение карт-схем мест возможного возникновения землетрясений в целом ряде сейсмоопасных регионов мира.

- На основе контрольных вычислительных экспериментов проведена оценка достоверности и надежности результатов применения FCAZ для определения возможных мест будущих сильных землетрясений.

- Проведено сравнение результатов, полученных разработанными в диссертации методами распознавания мест возможного возникновения землетрясений, с независимыми результатами определения потенциальных мест будущих землетрясений методом ERA.

- Оценен вклад форшоковых и афтершоковых последовательностей в каталогах землетрясений в формирование результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений методом FCAZ.

- Получена оценка возможного влияния удаленных землетрясений на сейсмическую опасность территории Нижне-Канского гранитоидного массива в связи с захоронением там радиоактивных отходов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- В рамках методологии теоретического системного анализа создана новая, допускающая появление дополнительных объектов распознавания, системная модель метода FCAZ.

- Разработан оригинальный метод SFCAZ (Successive FCAZ), расширяющий возможности FCAZ, для проведения последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений для нескольких магнитудных порогов.

- Методом FCAZ успешно выполнено распознавание зон повышенной сейсмической опасности в горном поясе Анд Южной Америки ($M \geq 7.75$), на Тихоокеанском побережье Камчатки ($M \geq 7.75$) и Курильских островов ($M \geq 7.75$), в Калифорнии ($M \geq 6.5$), в регионе Прибайкалье-Забайкалье ($M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$), в регионе Алтай-Саяны ($M \geq 5.5$), на Кавказе ($M \geq 5.0$), на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа ($M \geq 4.5$, $M \geq 5.0$). Надежность результатов подтверждается различными методами оценки их достоверности.

- Показано, что наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты распознавания высокосейсмичных зон в рамках кластеризационного метода FCAZ.

- Создан и программно реализован новый алгоритм распознавания образов «Барьер-3» с обучением по одному классу для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Принципиальным отличием этого метода от классических алгоритмов дихотомии является то, что «Барьер-3» обучается по одной выборке высокосейсмичного класса, не содержащей в себе заведомых ошибок классификации.

- Впервые успешно выполнено определение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье с использованием алгоритма «Барьер-3» в качестве блока распознавания.

- Алгоритмом «Барьер-3» на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье выявлены интервалы значений геолого-геофизических и геоморфологических характеристик, свойственные объектам, классифицированным как высокосейсмичные: высокая степень тектонической раздробленности, наличие плотностных глубинных неоднородностей, а также специфическое строение и состав земной коры.

- Предложена интерпретация в виде нечеткого множества для интегрального результата определения высокосейсмичных зон блоками распознавания «Барьер-3» и «Алгоритм дихотомии». Обоснована возможность варьирования блока распознавания образов в процедуре ЕРА: «Алгоритм дихотомии» ↔ «Барьер-3».

- Создана ГИС-база карт зон возможного возникновения землетрясений для изученных в диссертации регионов.

Основные научные защищаемые положения:

1. Метод системного анализа, позволяющий, на основе долговременного сейсмического мониторинга, многократно распознавать зоны возможного возникновения сильных землетрясений в функции времени. Основой метода является дискретно-математическая модель FCAZ, допускающая распознавание в моменты кардинальных изменений структуры кластеров эпицентров слабых землетрясений.

2. Метод SFCAZ, дающий возможность последовательного распознавания высокосейсмичных зон для нескольких возрастающих магнитудных порогов на основе сужения путем топологической фильтрации используемого множества эпицентров землетрясений.

3. Оригинальный алгоритм «Барьер-3» с обучением по единственному классу, который в композиции с алгоритмами дихотомии и конструкцией нечеткого множества улучшает качество распознавания.

Методы исследования. В работе использован набор методов математической геофизики, геоинформатики, сейсмологии, системного анализа, дискретного математического анализа, теории нечетких множеств, ГИС-технологии и др.

Использованные данные: каталоги землетрясений, схемы морфоструктурного районирования, карты геолого-геофизических характеристик регионов, результаты их анализа, литературные источники и др.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в повышении детальности, надежности и точности распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Это, в свою очередь, вносит вклад в прогноз ущерба от землетрясений и может быть использовано для уточнения карт сейсмического районирования.

В диссертации картированы потенциальные высокосейсмичные зоны в ряде сейсмоопасных регионов мира (большинство из них в Российской Федерации). Надежное определение таких зон имеет существенное значение для работ по оценке сейсмической опасности. Результаты диссертации вносят вклад и в создание условий обеспечения строительной деятельности в сейсмоактивных регионах Российской Федерации – сейсмостойком проектировании, строительстве объектов различной степени ответственности.

Другим аспектом практической значимости диссертационной работы является то, что созданный системно-аналитический метод FCAZ позволяет распознавать места возможного возникновения сильных землетрясений как функцию времени. FCAZ использует для распознавания динамически возникающие объекты – эпицентры землетрясений. Это позволяет воспроизводить классификацию искомых высокосейсмичных зон по мере появления новых объектов распознавания. Последнее повышает не только практическую значимость, но и достоверность результатов.

Созданные в работе методы и алгоритмы описаны в достаточно общем,

математически абстрактном виде. Это открывает возможность их использования для решения аналогичных проблем распознавания образов в других областях науки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательным отбором и контролем качества исходных данных, согласованностью распознанных мест возможного возникновения землетрясений с расположением эпицентров произошедших сильнейших, сильных и значительных землетрясений, зарегистрированных инструментально, и исторических землетрясений, а также с высокосейсмичными зонами, распознанными другими методами, вычислительными контрольными экспериментами и др.

Кроме того, достоверность подтверждается и результатами следующего реального эксперимента. В изученных регионах после выполнения распознаваний произошло суммарно (для двух методов) 29 землетрясений с магнитудой, превышающей заданный порог M_0 . Эпицентры 80% из них расположены внутри распознанных высокосейсмичных зон.

Личный вклад автора. Формулировка цели и выбор методов диссертационного исследования, формирование каталогов землетрясений исследуемых регионов, оцифровка исторических геофизических данных, разработка математических моделей и алгоритмов, написание расчетных программ, выполнение расчетов, построение карт в ГИС-среде, интерпретация результатов выполнены лично диссертантом.

Диссертанту принадлежит определяющая роль в получении всех результатов диссертационной работы. Им лично написана существенная часть объема публикаций по теме диссертации.

По тематике диссертационной работы диссертант являлся / является руководителем двух тем государственного задания Геофизического центра Российской академии наук, двух грантов РФФИ (№ 16-35-00603 и № 20-35-70054), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№ МК-4555.2016.5), ответственным исполнителем четырех грантов РФФИ (№ 15-17-30020, № 16-17-00093, № 18-17-00241 и № 19-77-10075).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на международных и российских научных конференциях и совещаниях, в том числе на I-й Международной конференции по рискам в Молдавии (First International Conference on Moldavian Risks – From Global to Local Scale) (Бакау, Румыния, 16 – 19 мая 2012 г.), на 33-й Генеральной ассамблее ESC (Москва, 19 – 24 августа 2012 г.), на III-й Международной научно-практической конференции «Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа», приуроченной к 10-летию схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. (Владикавказ, 18 – 21 сентября 2012 г.), на I-й Международной конференции молодых ученых «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и

сейсмостойкого строительства», посвященной 70-летию основания НАН РА (Ереван-Гюмри-Цахкадзор, 12 – 16 мая 2013 г.), на V-й Кавказской Международной школе-семинаре «Сейсмическая опасность. Управление сейсмическим риском на Кавказе» (Владикавказ, 16 – 18 октября 2013 г.), на Международной конференции «Геофизические обсерватории, многофункциональные ГИС и распознавание в информационных массивах» (Калуга, 30 сентября – 2 октября 2013 г.), на 26-й и 27-й Генеральных Ассамблеях IUGG (Прага, 22 июня – 2 июля 2015 г.; Монреаль, 8 – 18 июля 2019 г.), на конференции «Systems Analysis 2015», посвященной первому директору ИААА Говарду Райффу (Лаксенбург, Австрия, 11 – 13 ноября 2015 г.), на Генеральных Ассамблеях EGU 2016 и EGU 2018 (Вена, 17 – 22 апреля 2016 г.; Вена, 8 – 13 апреля 2018 г.), на Школе молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности» (Москва, 12 – 15 июля 2016 г.), на Международной конференции «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies» (Сочи, 18 – 21 июля 2016 г.), на Международной конференции «Systems Analysis: Modeling and Control», посвященной памяти академика РАН А.В. Кряжимского (Екатеринбург, 3 – 8 октября 2016 г.), на I-й Международной научной школе-семинаре «Проблемы усовершенствования шкалы сейсмической интенсивности», посвященной 55-й годовщине основания ИГИС НАН РА (Гюмри, 25 – 27 октября 2016 г.), на Международной научно-практической конференции «Проблемы и решения в экологии горного дела» (Москва, 28 – 29 марта 2017 г.), на VII-м Международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», посвященном 80-летию со дня рождения Ю.А. Трапезникова (Бишкек, 19 – 24 июня 2017 г.), на Международной конференции «Global Challenges and Data-Driven Science» (Санкт-Петербург, 8 – 13 октября 2017 г.), на 32-й конференции IUGG по математической геофизике (Нижний Новгород, 23 – 28 июня 2018 г.), на X-й Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» (Алматы, 6 – 10 августа 2018 г.), на V-й Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 4 – 7 июня 2019 г.), на всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», посвященной 30-летию ИТПЗ РАН (Москва, 27 – 28 ноября 2019 г.), на XV-й Владикавказской молодежной математической школе (РСО-А, 20 – 25 сентября 2020 г.), на семинарах и рабочих совещаниях Геофизического центра РАН (г. Москва), Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва) и Геофизического института ВЦ РАН (г. Владикавказ).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 18 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК РФ (16 в журналах, индексируемых в международных системах Web of Science и Scopus, 2 в журналах из списка Russian Science Citation Index). Также

результаты опубликованы в тематическом сборнике, изданном издательством Springer: «Disaster Risk Reduction and Resilience» книжной серии «Disaster and Risk Research: GADRI Book Series».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи Глав, заключения и списка литературы. Текст работы занимает 309 страниц, включая 78 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 330 наименований.

Выполнение работы. Диссертационная работа выполнялась автором в Геофизическом центре Российской академии наук – лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований и лаборатория геофизических данных.

Благодарности. Диссертант выражает благодарность своему научному консультанту, академику РАН Алексею Джерменовичу Гвишиани за постоянное внимание, неоценимую помощь в проведении исследований и человеческую поддержку во время работы над диссертацией.

Автор глубоко благодарен за всестороннюю поддержку исследований по теме диссертационной работы академику-секретарю ОНЗ РАН, академику РАН А.О. Глико, за полезные обсуждения г.н.с. ИТПЗ РАН, чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьеву, директору ГЦ РАН, чл.-корр. РАН Ан.Ал. Соловьеву, директору ИТПЗ РАН, чл.-корр. РАН П.Н. Шебалину, г.н.с. ГЦ РАН, д.ф.-м.н. С.М. Агаяну, директору ГФИ ВЦ РАН, д.ф.-м.н. В.Б. Заалишвили, в.н.с. ГЦ РАН, директору Мирового центра данных по солнечно-земной физике, к.ф.-м.н. Н.А. Сергеевой и заместителю директора по развитию ГЦ РАН, к.г.-м.н. А.И. Рыбкиной.

Диссертант выражает искреннюю благодарность всем сотрудникам ГЦ РАН за помощь в работе над диссертацией, в особенности лаборатории геодинамики в лице д.т.н. В.Н. Татарина. Диссертант благодарен г.н.с. ИТПЗ РАН, д.ф.-м.н. А.И. Горшкову за предоставленные схемы морфоструктурного районирования, в.н.с. ГЦ РАН, к.ф.-м.н. Ш.Р. Богоутдинову и м.н.с. ГЦ РАН И.О. Белову за помощь в программной реализации алгоритмов, ученому секретарю ГЦ РАН, к.ф.-м.н. Р.И. Красноперову и н.с. ГЦ РАН Ю.И. Николовой за помощь в работе в ГИС-среде, н.с. ГЦ РАН О.О. Самохиной за помощь в подготовке иллюстративного материала, сотрудникам библиотеки ГЦ РАН И.Е. Витвицкой и М.В. Шайкиной за обеспечение необходимой научной литературой.

Диссертант благодарен своим друзьям и коллегам д.ф.-м.н. Т.Т. Магкоеву, к.г.н. Дж.К. Карапетяну, к.г.-м.н. Б.В. Дзеранову, к.ф.-м.н. Ж.Д. Тотиевой, к.т.н. Д.В. Кудину, к.ф.-м.н. Э.О. Кедрову, А.И. Маневичу, Ю.В. Барыкиной, В.А. Тимофеевой, Е.В. Вавилину, А.А. Одинцовой и многим другим за неоценимую моральную поддержку во время работы над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, определяются цель и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся структура работы и методология исследования, аргументируется достоверность результатов, формулируются основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: обзор. В Главе приведен анализ почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью поиска решений проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений, а также сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Сильные землетрясения, как правило, могут происходить не на всей территории сейсмоактивного региона. При оценке сейсмической опасности одной из важнейших задач является определение мест, в которых возможно возникновение сильного землетрясения. Эффективным инструментом решения этой задачи является распознавание образов [Гвишиани и др., 2020]. Принципиальная возможность использования методов и алгоритмов распознавания образов для определения потенциально высокосейсмичных мест впервые была обоснована выдающимся математиком И.М. Гельфандом с соавторами в 1972 г. [Гельфанд и др., 1972]. Разработанный ими подход в последующем получил название ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [Гвишиани и др., 1988; 2020; Соловьев и др., 2014; Кособоков, Соловьев, 2018].

Метод ЕРА получил развитие в фундаментальных работах академиков АН СССР И.М. Гельфанда и В.И. Кейлис-Борока, академика РАН А.Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьева, известных советских и российских ученых: д.т.н. Ш.А. Губермана, к.г.н. М.П. Жидкова, д.ф.-м.н. В.Г. Кособокова, д.ф.-м.н. А.И. Горшкова, к.ф.-м.н. В.А. Гурвича, д.г.н. Е.Я. Ранцман, д.ф.-м.н. И.М. Ротвайн и др. Активное участие в развитии ЕРА приняли крупные иностранные геофизики, сейсмологи, геологи и математики: члены национальной академии наук США Ф. Пресс и Л. Кнопофф, французские ученые, профессора А. Систернас, Ж. Боннин, Э. Филип, К. Вебер и Ж. Саллантен, члены национальной академии наук Италии М. Капуто, Дж. Панца и другие [Гвишиани и др., 2020].

В классической постановке Гельфанда – Кейлис-Борока задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (проблема ЕРА) формулируется следующим образом. Необходимо определить в рассматриваемом сейсмоактивном регионе места возможного возникновения сильных (с магнитудой $M \geq M_0$, где M_0 – заданный порог) землетрясений. Поиск таких мест осуществляется среди выделенных в регионе объектов распознавания, в качестве которых рассматриваются морфоструктурные узлы или пересечения линеаментов, полученные

в результате морфоструктурного районирования (МСР). Множество объектов распознавания W необходимо разделить на две непересекающиеся совокупности: класс B , состоящий из объектов, в окрестностях которых возможны сильные землетрясения, и класс H , состоящий из объектов, где такие землетрясения не могут происходить.

Для выполнения этой классификации применяется алгоритм распознавания образов с обучением. Он использует определенную на основе информации о сейсмичности региона обучающую выборку W_0 . В свою очередь W_0 состоит из двух непересекающихся подмножеств: B_0 , содержащего объекты, отнесенные к классу B , и H_0 , содержащего представителей класса H . Результатом применения алгоритма распознавания является решающее правило, на основании которого объект из W может быть отнесен к классу B или H , и сама классификация объектов [Гвишиани и др., 1988; 2020].

В Главе рассмотрены применяемые в ЕРА алгоритмы распознавания образов, методы оценки достоверности получаемых результатов, включая теорию динамических и предельных задач распознавания. Приведено описание всех этапов решения проблемы ЕРА и подробный обзор результатов ЕРА-распознавания в многочисленных сейсмоопасных регионах мира.

Говоря о недостатках метода ЕРА, отметим следующее. Формирование материала обучения является основополагающим этапом распознавания. В обучающую выборку B_0 включаются объекты, в окрестностях которых известны эпицентры сильных землетрясений. Логично предположить, что сформированная таким образом выборка B_0 с большой вероятностью не содержит априорных ошибок или их количество так мало, что не может оказать существенного влияния на результат распознавания. Формирование аналогичного «чистого» материала обучения класса H затруднительно. В выборку H_0 включаются либо все объекты, не вошедшие в B_0 , либо объекты, в окрестностях которых известны лишь землетрясения с магнитудой $M < M_0 - \delta$, где $\delta > 0$ [Гвишиани и др., 2020].

По сути самой задачи ЕРА, являющейся предельной проблемой распознавания [Гвишиани, Гурвич, 1982; 1992], класс обучения H_0 содержит в себе потенциальные ошибки. Таким образом, низкосейсмичный класс обучения в действительности никак не является совокупностью эталонных объектов, которые не могут быть связаны с местами возможного возникновения сильных землетрясений. Обучающие выборки B_0 и H_0 оказываются неравноправными [Дзебоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019], а процедурой ЕРА это игнорируется [Гвишиани и др., 2017].

Многолетняя практика применения метода ЕРА в многочисленных горных странах мира показала необходимость избежать в распознавании асимметричности обучения. Для повышения достоверности ЕРА-результатов необходимо дополнить

блок распознавания алгоритмом с обучением по единственному высокосейсмичного классу B_0 , включающему в себя объекты, в окрестности которых сильные землетрясения уже известны [Гвишиани и др., 2021]. Разработка такого алгоритма распознавания является одной из основных задач диссертационного исследования.

Другим недостатком метода ЕРА является то, что определение объектов распознавания и измерение их геолого-геофизических и геоморфологических характеристик представляет собой трудоемкую задачу. При этом, возможность использования выбранных объектов необходимо обосновывать для каждого региона отдельно. Сказанное говорит о все еще существующей значительной сложности применения метода ЕРА на практике. Это приводит к необходимости разработки новых современных алгоритмических систем, позволяющих автоматизировать процесс распознавания. Основной задачей диссертационного исследования является создание и развитие такого рода системы.

Глава 2. Вариативный метод ЕРА. В Главе предложен принципиально новый алгоритм для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе обучения по единственному высокосейсмичному классу. Выполнено определение высокосейсмичных зон ($c M \geq 6.0$) на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье.

В рамках диссертационной работы метод ЕРА [Гвишиани и др., 1988; 2020] получил развитие в виде создания нового алгоритма «Барьер-3», примененного в блоке распознавания. Принципиальным отличием алгоритма «Барьер-3» от используемых ранее в ЕРА алгоритмов дихотомии, является то, что обучение в нем ведется только по выборке B_0 высокосейсмичного класса.

Алгоритм «Барьер-3», обучаясь только по одному классу, не является, вообще говоря, алгоритмом дихотомии. Однако он может эффективно использоваться в ЕРА. «Барьер-3» так же делит территорию на две непересекающиеся области, где, соответственно, могут или нет возникать сильные землетрясения [Дзобоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019].

В алгоритме «Барьер-3» так же, как и в алгоритмах дихотомии [Гвишиани и др., 1988], в качестве объектов распознавания рассматриваются дизъюнктивные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов. Такой выбор объектов обоснован их глубокой тектонической связью с сильными землетрясениями. Приуроченность эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов была подтверждена и статистически в [Гвишиани, Соловьев, 1980].

Задача алгоритма «Барьер-3» – изучить характеристики обучающей выборки B_0 единственного высокосейсмичного класса и на базе полученных знаний выявить объекты, «похожие» на объекты обучения. Последние – объявляются высокосейсмичными. Говоря языком теории множеств, «Барьер-3» решает задачу построения в конечном множестве объектов W его подмножества B , расширяющего

единственный класс обучения B_0 . Для этого по каждой характеристике строится мера различия между двумя произвольными объектами. Тем самым находится и количественно оценивается «барьер», разделяющий эти объекты в рамках рассматриваемой характеристики. Эта оценка играет роль меры близости на исходном множестве W , позволяющей придать точный смысл понятию близости к B_0 на основе данной совокупности характеристик. Перейдем к строгой формулировке задачи и построению алгоритма «Барьер-3».

Пусть $\Pi = \{\pi\}$ – конечная совокупность числовых характеристик объектов распознавания $w \in W$, $\pi: W \rightarrow R$, B_0 – собственное подмножество в W для обучения высокосейсмичного класса B . На основе совокупности характеристик Π множества объектов W необходимо построить множество $P_\Pi(B_0)$, адекватно расширяющее B_0 в смысле требований поставленной задачи.

Близости объектов w_1 и w_2 по характеристике π «мешают» все те объекты w , значения $\pi(w)$ для которых лежат между значениями $\pi(w_1)$ и $\pi(w_2)$. Они образуют барьер:

$$B_\pi(w_1, w_2) = \{w \in W: \min(\pi(w_1), \pi(w_2)) \leq \pi(w) \leq \max(\pi(w_1), \pi(w_2))\}. \quad (1)$$

Естественно предположить, что для близости w_1 и w_2 на W по характеристике π тем лучше, чем барьер $B_\pi(w_1, w_2)$ меньше. Это наблюдение объясняет название алгоритма.

Отношение

$$\rho_\pi(w_1, w_2) = |B_\pi(w_1, w_2)|/|W| \quad (2)$$

назовем мерой различия w_1 и w_2 по характеристике π или просто мерой барьера.

Формирование множества $P_\Pi(v)$ близких к $v \in B_0$ объектов из W на основе характеристик Π алгоритм «Барьер-3» осуществляет в три этапа.

Этап первый: формирование множества $P_\pi(v)$ близких к v объектов в W по характеристике π с помощью порога минимальности $\alpha_\pi(v)$:

$$P_\pi(v) = \{w \in W: \rho_\pi(w, v) \leq \alpha_\pi(v)\}. \quad (3)$$

Порог $\alpha_\pi(v)$ играет роль гибкой нижней границы множества $\{\rho_\pi(w, v), w \in W\}$ и может быть получен, например, с помощью колмогоровского усреднения с показателем $s < 0$:

$$\alpha_\pi(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} \rho_\pi(\bar{w}, v)^s}{|W|} \right)^{1/s}. \quad (4)$$

Этап второй: формирование на W показателя $p_\Pi(w|v)$ близости w к v на основе всех характеристик Π :

$$p_\Pi(w|v) = |\{\pi \in \Pi: w \in P_\pi(v)\}|. \quad (5)$$

Здесь $P_\pi(v)$ определяется формулой (3), а введенный формулой (5) целочисленный показатель $p_\Pi(w|v)$ изменяется от 0 до $|\Pi|$.

Этап третий: формирование в W подмножества $P_\Pi(v)$ близких к v объектов на

основе всех характеристик Π с помощью порога максимальности $\beta_{\Pi}(v)$:

$$P_{\Pi}(v) = \{w \in W: p_{\Pi}(w|v) \geq \beta_{\Pi}(v)\}. \quad (6)$$

Порог $\beta_{\Pi}(v)$ играет роль гибкой верхней границы множества показателей $\{p_{\Pi}(w|v), w \in W\}$. Аналогично формуле (4) $\beta_{\Pi}(v)$ может быть построен с помощью колмогоровского усреднения с показателем $q > 0$:

$$\beta_{\Pi}(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} p_{\Pi}(\bar{w}|v)^q}{|W|} \right)^{1/q}. \quad (7)$$

В итоге искомое множество $P_{\Pi}(B_0)$ определяется формулой:

$$P_{\Pi}(B_0) = \cup_{v \in B_0} P_{\Pi}(v). \quad (8)$$

Для количественной оценки вклада характеристик в формирование искомого подмножества высокосейсмичных объектов алгоритм снабжен дополнительными вычислительными блоками. Параллельно с вычислением $p_{\Pi}(w|v)$ формируется бинарная матрица $M_{\Pi}(w|v)$:

$$M_{\Pi}(w|v)_{i,j} = \begin{cases} 1, w_i \in P_{\pi_j}(v) \\ 0, w_i \notin P_{\pi_j}(v) \end{cases}, \quad i = 1, \dots, |W|, j = 1, \dots, |\Pi|. \quad (9)$$

Каждый элемент матрицы (9) определяет принадлежность или нет объекта $w \in W$ к множеству $P_{\pi_j}(v)$, $\pi_j \in \Pi$ близких к v объектов. Построковое суммирование матрицы $M_{\Pi}(w|v)$ для всех $w \in P_{\Pi}(v)$ формирует вектор $W_{\Pi}(v)$:

$$W_{\Pi}(v)_j = \sum_k M_{\Pi}(w|v)_{k,j}, \quad w_k \in P_{\Pi}(v), \quad j = 1, \dots, |\Pi|. \quad (10)$$

Элементы вектора (10) показывают вклад характеристики $\pi_j \in \Pi$ в формирование подмножества $P_{\Pi}(v)$ объектов, близких к $v \in B_0$. Количественные оценки вклада характеристик в формирование $P_{\Pi}(B_0)$ выполняются в два этапа:

1. Поэлементное сложение всех векторов $W_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$ и нормирование на $|B_0|$ позволяет получить средний вклад характеристик в распознавание искомого высокосейсмичного подмножества $P_{\Pi}(B_0)$.

2. Сортировка $W_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$ и выбор для каждого из них трех характеристик с наибольшими значениями, с последующим суммированием количества попаданий характеристик в сформированные тройки позволяет оценить вклад характеристик через их попадание в класс «сильнейших». Такой класс будем называть рейтингом Топ 3. Это объясняет название алгоритма – «Барьер-3».

Множество объектов распознавания представляется в виде дизъюнктного объединения $W = B \sqcup H$ высоко- и низкосейсмичных классов, $B = P_{\Pi}(B_0) \supseteq B_0$, а $H = W \setminus B$. Результат применения алгоритма «Барьер-3» однозначно определяется выбором значений его свободных параметров s и q . Принципы и методы выбора их значений описаны в тексте диссертации.

В диссертационной работе алгоритм «Барьер-3» применен в качестве блока распознавания ЕРА для определения мест возможного возникновения коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. В обоих

регионах в качестве обучающих выборок V_0 высокосейсмичного класса использовались 16 пересечений осей морфоструктурных линеаментов, в окрестности (радиусом 50 км в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье и 25 км на Кавказе) которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$, начиная с 1900 г.

Исходный перечень рассматриваемых характеристик объектов распознавания приведен в таблице. Жирным шрифтом выделены 7 характеристик, которые по итогам оценки информативности для случая одного класса обучения были отобраны для использования при распознавании в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, курсивом – 11 характеристик, отобранных для распознавания на Кавказе. Заметим, что 4 характеристики (H_{min} , Top , $R2$, dB) отобраны для распознавания алгоритмом «Барьер-3» в обоих регионах. Исходя из порога магнитуды распознаваемых мест землетрясений ($M \geq 6.0$) в качестве окрестностей, внутри которых вычислялись значения характеристик, брались круги радиусом 25 км.

Таблица. Исходный перечень характеристик объектов распознавания (пересечений линеаментов) на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье

<i>Максимальная высота</i>	<i>H_{max}</i>
Минимальная высота	H_{min}
<i>Размах высот</i>	<i>$dH = H_{max} - H_{min}$</i>
Расстояние между точками, в которых вычислены H_{max} и H_{min}	1
Градиент высот	$dH/1$
Сочетание типов рельефа	<i>Top</i>
<i>Площадь четвертичных пород</i>	<i>Q</i>
<i>Высший ранг линеамента</i>	<i>HR</i>
Число линеаментов в пересечении	NL
<i>Расстояние до ближайшего пересечения</i>	<i>R_{int}</i>
<i>Число линеаментов в окрестности пересечения</i>	<i>NLC</i>
<i>Расстояние до ближайшего линеамента I-го ранга</i>	<i>$R1$</i>
<i>Расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга</i>	<i>$R2$</i>
Максимальное значение аномалии Буге	B_{max}
Минимальное значение аномалии Буге	B_{min}
<i>Размах значений аномалий Буге</i>	<i>$dB = B_{max} - B_{min}$</i>
Максимальное значение магнитной аномалии	MO_{max}
Минимальное значение магнитной аномалии	MO_{min}
Размах значений магнитных аномалий	$MO_{dif} = MO_{max} - MO_{min}$

Результат распознавания в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье показан на рис. 1 эллипсами с синими границами. По итогам распознавания 32 объекта из 97 были отнесены к высокосейсмичному классу V . Совокупность окрестностей этих объектов (кругов используемых для вычисления значений характеристик) [Соловьев и др., 2014; Гвишиани и др., 2020] определяет зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$.

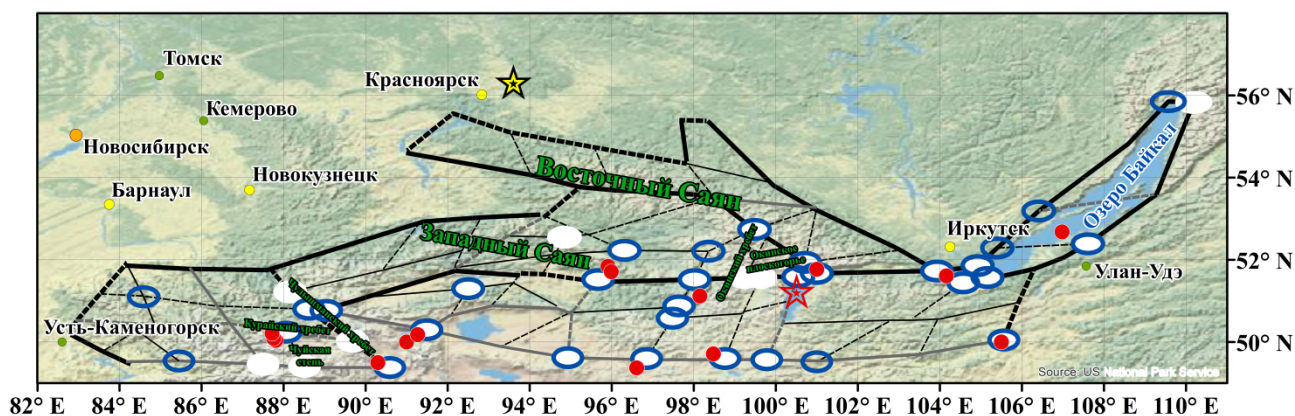


Рис. 1. Схема морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье (толстые черные линии – линеаменты I-го ранга, средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга, сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные) [Горшков и др., 2018], места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (эллипсы с синими границами – «Барьер-3», белые эллипсы – «Кора-3» [Горшков и др., 2018], белые эллипсы с синими границами – оба алгоритма). Красные круги – эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ (1900 – 2012 гг.), используемые для формирования обучающей выборки B_0 , красная звезда – эпицентр корового землетрясения (11 января 2021 г. с $M = 6.7$), произошедшего после выполнения распознавания. Желтой звездой показано расположение участка «Енисейский» Нижне-Канского гранитоидного массива.

На рис. 2а представлена гистограмма, характеризующая средний вклад характеристик в распознавание алгоритмом «Барьер-3» искомого высокосейсмического множества объектов. На рис. 2б показан вклад характеристик, выраженный через попадание в рейтинги Топ 3. По оси ординат на рис. 2а показано среднее количество «срабатываний» характеристик при распознавании множества $P_{II}(B_0)$ (см. выше), на рис. 2б – количество попаданий в тройки «сильнейших» характеристик (рейтинг Топ 3).

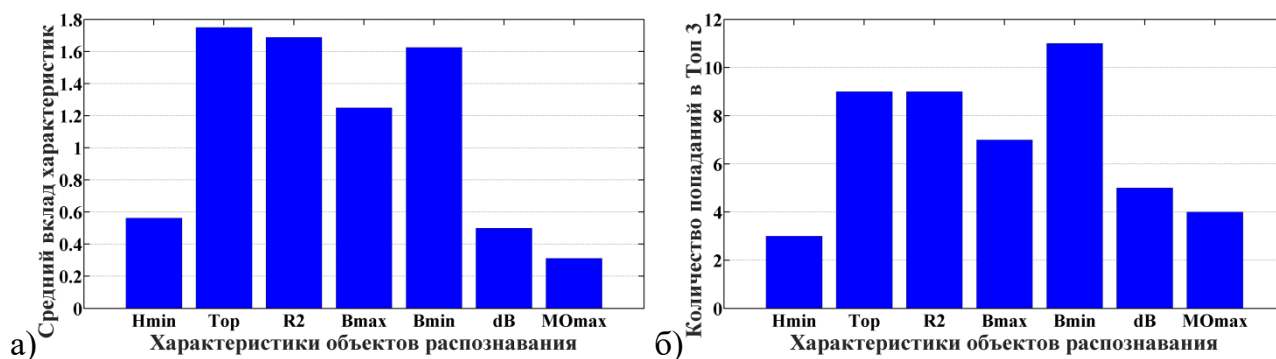


Рис. 2. Вклад характеристик в распознавание алгоритмом «Барьер-3» высокосейсмического множества объектов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье: а) средний вклад характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших».

Из рис. 2 видно, что при распознавании высокосейсмических зон в регионе Алтай-

Саяны-Прибайкалье алгоритмом «Барьер-3» наиболее значимыми характеристиками оказались гравитационные аномалии (V_{\max} и V_{\min}), сочетание типов рельефа (Top) и расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга (R_2). Пересечения линеаментов, распознанные как высокосейсмичные для $M \geq 6.0$, на фоне всего множества объектов в своих окрестностях характеризуются низкими значениями гравитационных аномалий (в большинстве случаев $V_{\max} \leq -160$ мГал и $V_{\min} \leq -220$ мГал) и контрастными сочетаниями типов рельефа – горы / предгорье и горы / горы. Для них характерны высокие значения магнитной аномалии (MO_{\max}), концентрация dV вокруг 60 мГал и 120 мГал, и концентрация H_{\min} менее -1 000 м и более 1 000 м.

Из рис. 2 видно, что литосферные аномалии магнитного поля вносят вклад в результат распознавания в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Тем самым, можно заключить, что окрестности высокосейсмичных пересечений линеаментов характеризуются высокой степенью тектонической раздробленности, наличием плотностных глубинных неоднородностей, а также специфическим строением и составом земной коры. Эти признаки естественно трактовать как критерии высокой сейсмичности в изучаемом регионе.

Сравнительный анализ результатов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученных независимо алгоритмом «Барьер-3» и наиболее часто используемым в ЕРА алгоритмом дихотомии «Кора-3», показал их хорошую согласованность (рис. 1). Алгоритм «Барьер-3» распознал как высокосейсмичные 32 пересечения морфоструктурных линеаментов, «Кора-3» – 33 пересечения [Горшков и др., 2018]. При этом 25 объектов оба алгоритма отнесли к классу B .

Алгоритм «Барьер-3» классифицировал как опасные 6 из 51 объекта обучающей выборки низкосейсмичного класса дихотомии, «Кора-3» – 3 из 51, а оба алгоритма – 2 пересечения. Следовательно, 44 объекта обучения класса H оба алгоритма распознали как неопасные для магнитуды $M \geq 6.0$. Это означает, что основные различия в классификации приходятся на множество объектов, изначально не отнесенных к обучающим выборкам (20 объектов классифицированы алгоритмами одинаково и 10 – различно). Отметим, что эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$, используемые для формирования обучающей выборки B_0 (красные круги на рис. 1), расположены строго внутри зон, распознанных обоими алгоритмами.

Заметим, что конструкция алгоритма «Барьер-3» устроена таким образом, что объекты обучения в конечной классификации всегда попадают в класс B . В свою очередь, при распознавании алгоритмами дихотомии объекты обучения, вообще говоря, не обязаны сохранять свою принадлежность соответствующему классу [Гвишиани и др., 1988; 2020; Соловьев и др., 2014].

Из рис. 1 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» отнес к классу B 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 озера Байкал (рис. 1).

На рис. 1 красной звездой показан эпицентр корового землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г. с $M = 6.7$. Это землетрясение произошло после выполнения описанных здесь независимых распознаваний алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» и, тем самым, является материалом чистого экзамена для них. Из рис. 1 видно, что эпицентр располагается вне окрестностей (радиусом 25 км) пересечений линеаментов, распознанных как высокосейсмичные обоими алгоритмами. В то же время он расположен на расстоянии 42 км от ближайшего к нему объекта распознавания, отнесенного к классу B обоими алгоритмами. При формировании материала обучения считалось, что эпицентр приурочен к пересечению, если находится на расстоянии не более 50 км от него. Таким образом, эпицентр землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г., приурочен к пересечению линеаментов, отнесенному к классу B обоими алгоритмами, но располагается за пределами 25-км окрестности, используемой для вычисления значений его характеристик.

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) [Горшков и др., 2018], хорошо согласуются. С одной стороны, это говорит в пользу достоверности обоих результатов, т.к. распознавание проводилось независимо. С другой стороны, при интерпретации различий (15.5% от общего числа объектов) в результатах, по-видимому, следует отдавать предпочтение классификации алгоритмом «Барьер-3», т.к. она была выполнена с обучением, не содержащим заведомых ошибок.

В диссертационной работе приведенные выше результаты использованы для оценки влияния возможных землетрясений с $M \geq 6.0$ Алтае-Саянской орогенной области на сейсмическую опасность зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы (Нижне-Канский гранитоидный массив). При дефиците достоверных исторических и инструментальных данных о сейсмичности Нижне-Канского массива такая оценка сейсмической опасности имеет геоэкологическое значение в связи с проектированием и строительством в его пределах (участок «Енисейский», желтая звезда на рис. 1) пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ПГЗРО) [Андерсон и др., 2011].

Анализ результатов распознавания показал, что места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$, приуроченные к пересечениям морфоструктурных линеаментов Алтае-Саянского орогенного пояса, находятся на расстояниях более 400 км (рис. 1) от ПГЗРО. Если воспользоваться классической формулой связи интенсивности сотрясений I с магнитудой M и эпицентральной

расстоянием R землетрясения [Шебалин, 1997]:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg R + 3.0, \quad (11)$$

то для магнитуды $M = 8.0$ при удалении от эпицентра на $R = 400$ км можно получить оценку I не выше 6 баллов. Заметим, что эпицентры всех четырех известных в регионе землетрясений с $M \geq 7.0$ расположены на самом юге рассматриваемой схемы МСР. При этом 3 из них произошли в 1905 г. и 1938 г. и их магнитуды могут быть завышенными. Наиболее сильное землетрясение оценивается магнитудой $M = 8.3$. Заметим, что согласно карте сейсмического районирования Российской Федерации ОСР-2016-D район площадки ПГЗРО относится к границе возможных 8 – 9 балльных сотрясений.

Таким образом, места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, распознанные методом ЕРА с варьированием блоков классификации «Барьер-3» и «Кора-3», находятся на таком расстоянии, что не могут оказать влияние на сейсмическую опасность площадки строительства ПГЗРО.

Результат определения мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, полученный с использованием алгоритма «Барьер-3» в качестве блока распознавания ЕРА, показан на рис.3 эллипсами с синими границами. К высокосейсмичному классу В «Барьер-3» отнес 108 из 237 пересечений линеаментов.

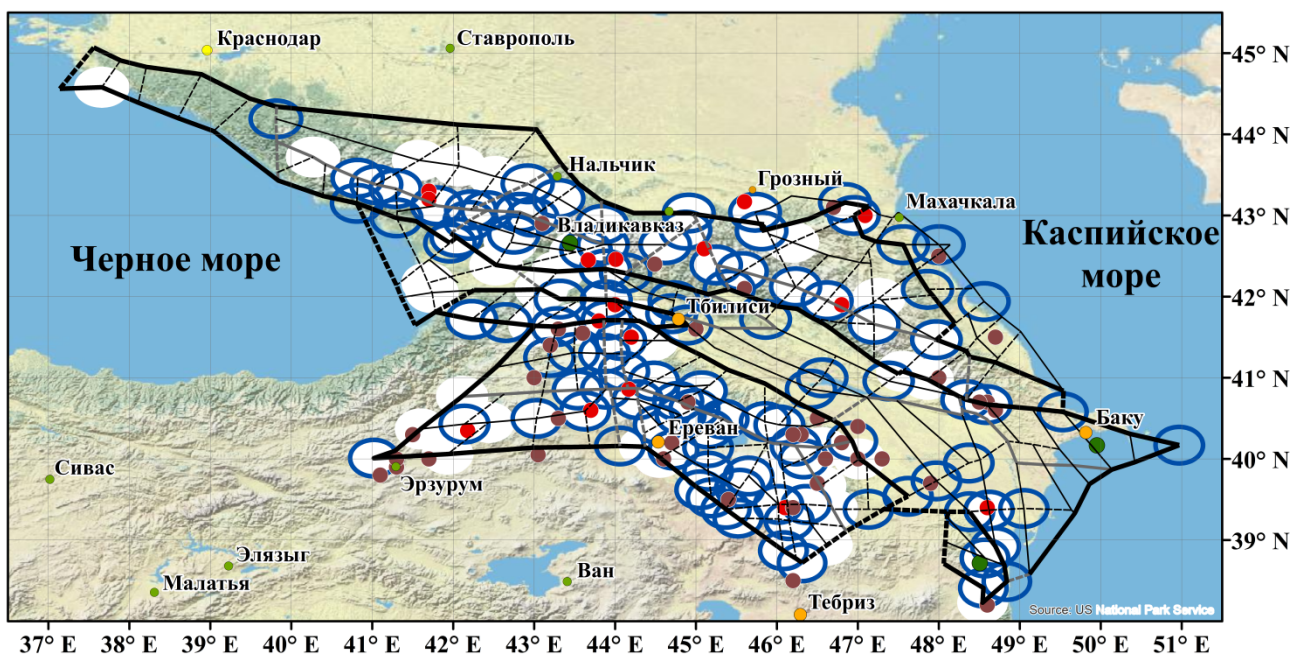


Рис. 3. Схема морфоструктурного районирования Кавказа (обозначения как на рис. 1) [Соловьев и др., 2013], места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (эллипсы с синими границами – «Барьер-3», белые эллипсы – «Кора-3» [Соловьев и др., 2016], белые эллипсы с синими границами – оба алгоритма) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ (коричневые круги – до 1900 г., красные круги – за период 1900 – 1992 гг. (используемые для формирования обучающей выборки V_0), темно-зеленые круги – начиная с 1993 г. (материал чистого экзамена)).

На рис. 4 представлены гистограммы, определяющие вклад характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» пересечений линеаментов, в окрестности которых на Кавказе возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.0$. Из рис. 4 видно, что наибольший вклад вносят характеристики, отвечающие за высоты рельефа (Hmax и Hmin), площадь четвертичных пород (Q), высший ранг линеамента (HR), число линеаментов в окрестности (NLC), а также расстояния до ближайших линеаментов I-го (R1) и II-го (R2) рангов.

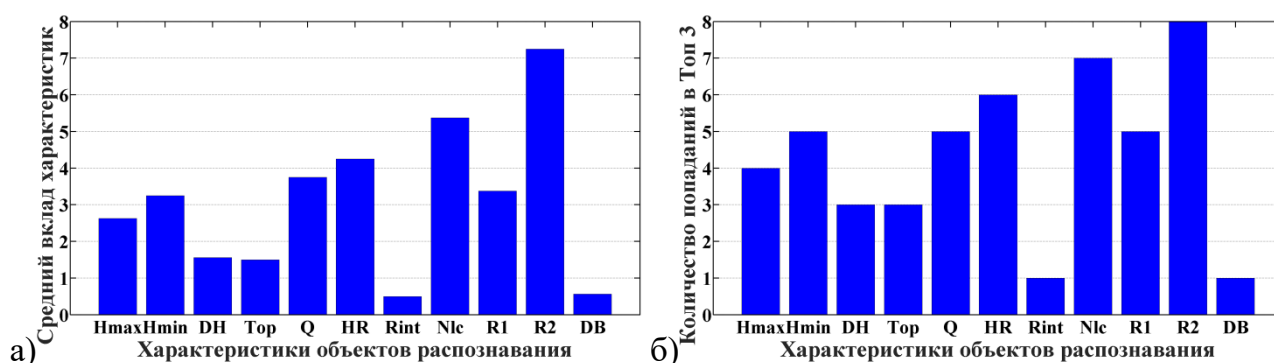


Рис. 4. Вклад характеристик в распознавание алгоритмом «Барьер-3» высокосейсмического множества объектов на Кавказе: а) средний вклад характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших».

На Кавказе пересечения линеаментов, распознанные как опасные для $M \geq 6.0$, на фоне всего множества объектов распознавания в своих окрестностях характеризуются большими значениями максимальных и минимальных высот ($H_{max} \geq 2500$ м и $H_{min} \geq 600$ м) и небольшой площадью четвертичных пород ($Q \leq 30\%$). Они образованы тремя или более линеаментами II-го или III-го рангов ($NLC \geq 3$, $HR = 2$ или $HR = 3$, $R2 \leq 30$ км) и находятся на сравнительно небольших расстояниях от линеаментов I-го ранга ($0 < R1 \leq 50$ км).

Совместный анализ рис. 2 и рис. 4 показывает, что в обоих регионах при распознавании алгоритмом «Барьер-3» существенный вклад в формирование высокосейсмического множества объектов вносит расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга. То есть характеристика R2 является важной для алгоритма «Барьер-3» и инвариантной по отношению к выбору региона из двух рассматриваемых в Главе.

На рис. 3 представлено сравнение классификаций пересечений линеаментов на Кавказе, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Первый из них распознал как высокосейсмические 108 пересечений линеаментов, второй – 107 [Соловьев и др., 2016], одновременно оба алгоритма – 73. Алгоритм «Барьер-3» классифицировал как опасные 24 из 71 объекта обучающей выборки низкосейсмического класса «Коры-3», «Кора-3» – 22, одновременно оба алгоритма – 16. Очевидно, что 41 объект обучения

низкосейсмичного класса оба алгоритма распознали как неопасные. Из множества пересечений, изначально не отнесенных к обучающим выборкам «Коры-3», алгоритмы одинаково классифицировали 95 объектов, и по-разному – 55.

Из рис. 3 видно, что объекты, расположенные на продольных линеаентах II-го ранга и классифицированные обоими алгоритмами как высокосейсмичные, в Центральном и Юго-Восточном сегментах Большого Кавказа образуют протяженные зоны вдоль оси Главного хребта. Хорошее совпадение результатов распознавания наблюдается в восточном секторе Малого Кавказа и на Армянском вулканическом нагорье. Совокупность объектов, расположенных на поперечных линеаентах II-го ранга и отнесенных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» к 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 Талышских гор. Заметим, что большинство известных на Кавказе землетрясений с $M \geq 6.0$ произошло в окрестности объектов, образующих описанные зоны.

Анализ рис. 3 показал, что все 17 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ (красные круги), участвовавших в формировании обучающих выборок высокосейсмичного класса, находятся внутри зон, распознанных обоими алгоритмами. Из 42 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших до 1900 г. (коричневые круги), вне зон, распознанных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», находятся 7 и 8 эпицентров соответственно. Половина из них расположена на незначительных расстояниях от распознанных алгоритмами потенциально высокосейсмичных зон.

На рис. 3 темно-зелеными кругами показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших на Кавказе, начиная с 1993 г. Информация об этих землетрясениях никак не использовалась при формировании обучающих выборок и, тем самым, представляет собой материал чистого экзамена. Два эпицентра из трех находятся строго внутри высокосейсмичных зон, распознанных обоими алгоритмами. Последнее есть существенный аргумент в пользу достоверности представленного на рис. 3 результата. Сравнение критериев высокой сейсмичности на Кавказе, выявленных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», также демонстрирует их близость.

Предпринятая в диссертации замена алгоритма дихотомии на оригинальный алгоритм «Барьер-3» есть попытка открыть новую страницу в развитии подхода ЕРА. Как показано выше, алгоритм «Барьер-3» хорошо зарекомендовал себя при распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений с одним классом обучения на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Этот факт укрепляет предположения о том, что подход к распознаванию потенциальных высокосейсмичных зон на основе единственного высокосейсмичного класса обучения путем его расширения адекватен постановке проблемы ЕРА.

Полученные независимо положительные варианты распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» делают их контрольными экспериментами друг для друга. В силу достаточной близости результатов эти контрольные эксперименты следует признать удачными. Это повышает оценку достоверности полученных выше результатов.

На базе изученных в настоящей Главе регионов предложена совместная интерпретация мест возможного возникновения сильных землетрясений, распознанных по одному и двум классам обучения. Интерпретация базируется на композиции конструкции нечеткого множества и результатов, полученных независимо алгоритмом «Барьер-3» и дихотомией «Кора-3» [Гвишиани и др., 2021; Dzeboev et al., 2019].

Пусть W по-прежнему множество пересечений линеаментов. Определим нечеткое множество высокосейсмичных объектов, как множество пар:

$$B = \{w, \mu_B(w) | w \in W\}. \quad (12)$$

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

$$\mu_B(w) = \mu_{B_B, B_K}(w) = \begin{cases} 1, & w \in B_B \cap B_K \\ 0.5, & w \in B_B \Delta B_K = (B_B \cup B_K) \setminus (B_B \cap B_K), \\ 0, & w \notin B_B \cup B_K \end{cases} \quad (13)$$

где B_B и B_K – множества объектов, распознанных как высокосейсмичные алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», соответственно. Высокосейсмичными объектами в интегральном результате будем считать пересечения для которых $\mu_{B_B, B_K}(w) > 0$.

На рис. 5 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 (12 – 13).

В регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье в силу полученных результатов распознавания (рис. 1) все используемые для формирования обучающей выборки высокосейсмичного класса эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ располагаются в окрестностях объектов, отнесенных к классу B обоими алгоритмами. Вне зависимости от того считать эпицентр землетрясения 2021 года ошибкой «пропуск цели» или нет количество «пропусков цели» распознавания, полученного с помощью нечеткой функции (рис. 5а), такое же, как и у каждого из алгоритмов в отдельности (рис. 1). В данном случае распознавание с помощью формул (12 – 13) лишь увеличивает количество искомых 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. 3 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 (красные и синие эллипсы на рис. 5б) по формулам (12 – 13).

Заметим, что в интегральном результате (рис. 5) высокосейсмичными объявлено 41.2% объектов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье и 59.9% на Кавказе. При этом в изучаемой проблеме, как правило, результат считается нетривиальным, если не более 60% объектов классифицированы как высокосейсмичные [Гвишиани и др., 1988]. Распознавание, полученное по формулам (12 – 13), для обоих регионов удовлетворяет этому условию. В тоже время это позволяет получить новый нетривиальный результат для обоих регионов и вдвое уменьшить количество «пропусков цели» на Кавказе.

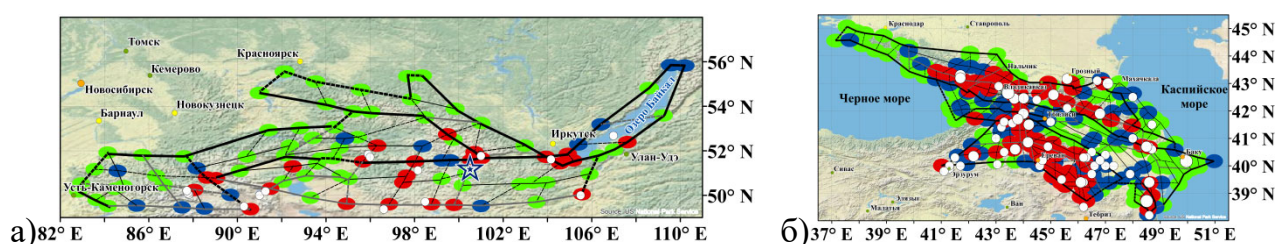


Рис. 5. Представление совместного результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткого множества окрестностей пересечений линеаментов: а) регион Алтай-Саяны-Прибайкалье (белые круги – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ (1900 – 2012 гг.), синяя звезда – эпицентр землетрясения 11.01.2021); б) Кавказ (белые круги – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: маленькие – до 1900 г., средние – 1900 – 1992 гг., большие – после 1992 г.). Красным цветом показаны окрестности пересечений линеаментов с функцией принадлежности $\mu_{ВБ,ВК} = 1$, синим – $\mu_{ВБ,ВК} = 0.5$, зеленым – $\mu_{ВБ,ВК} = 0$. Функция $\mu_{ВБ,ВК}$ определена формулой (13).

Улучшение результата распознавания 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 [Гвишиани и др., 2021].

Глава 3. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на базе выделения плотных сгущений точечных объектов. В Главе рассматривается решение проблемы распознавания мест возможного возникновения землетрясений с некоторой важной инновацией в ее постановке. Напомним, что общая формулировка проблемы приведена в начале первой Главы.

Абстрагируемся здесь от описанных выше объектов распознавания и их характеристик. Инновацией является то, что задача настоящего исследования ближе к реальности, чем в классическом подходе ЕРА. А именно, кроме надежной классификации конечного набора точечных объектов требуется создать

формализованный и воспроизводимый переход от распознанного множества B к реальной двумерной области на плоскости, имеющей мощность континуум. В пределах этой искомой области могут возникать сильные землетрясения, а вне области – нет. Иными словами, инновацией является построение отображения множества объектов распознавания W в изучаемый регион S , как в подмножество Евклидовой плоскости:

$$F_\gamma: W \rightarrow F_\gamma(W) \subset S \subset R^2, \quad (14)$$

где γ – множество свободных параметров отображения F_γ .

Искомое отображение F_γ должно удовлетворять следующим необходимым условиям:

а) плоское множество $F_\gamma(B) \subset S$ однозначно определяется по $B \subset W$ при фиксированных значениях свободных параметров γ .

б) плоское множество $F_\gamma(B)$ содержит в себе высокосейсмичные объекты $w \in B$ как точки на плоскости, т.е. $\forall w \in B \Rightarrow w \in F_\gamma(B)$.

в) эпицентры известных сильных землетрясений ($M \geq M_0$) расположены внутри или на границе зон $F_\gamma(B)$. При этом, с учетом возможных ошибок в определении исторических эпицентров может допускаться их расположение вблизи границ $F_\gamma(B)$.

Такие двумерные множества $F_\gamma(B)$ мощности континуум естественно рассматривать как реальные плоские зоны, в пределах которых и могут возникать сильные землетрясения. Выбор значений γ того или иного варианта среди удовлетворяющих условиям а), б), в) производится на основе системного подхода с использованием контрольных экспериментов.

В диссертации в качестве искомого отображения F_γ используется алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2016], являющаяся методом системного анализа в его части «Дискретный Математический Анализ» (ДМА) [Гвишиани и др., 2008; 2010].

Метод FCAZ позволяет эффективно проводить распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на базе кластерного анализа каталога сейсмических событий. FCAZ представляет собой последовательное применение алгоритмов DPS (Discrete Perfect Sets) и E²ХТ (рис. 6). В отличие от процедуры распознавания, описанной в Главе 2, метод системного анализа FCAZ не использует ни морфоструктурное районирование, ни обучение алгоритмов дихотомии. Он основывается на топологической фильтрации конечного множества эпицентров слабых землетрясений, которые выступают в качестве объектов распознавания.

Принципиальным отличием развиваемого в диссертации системного метода от классической процедуры, представленной в Главе 2, является наличие у FCAZ формализованного блока (алгоритм E²ХТ) перехода от классификации точечных объектов к искомым плоским высокосейсмичным зонам. Блок E²ХТ осуществляет

построение однозначного отображения множества распознанных алгоритмом DPS объектов в плоские зоны ненулевой меры. Внутри и на границе этих зон возможно возникновение сильных землетрясений. Такое отображение позволило перейти в проблеме определения мест возможного возникновения землетрясений от просто распознавания образов к полноценному системному анализу. В частности, удастся однозначно отделить с помощью точной границы подсистему распознанных высокосейсмичных зон от их непустого дополнения.



Рис. 6. Блок-схема метода FCAZ.

Ядром FCAZ является алгоритм топологической фильтрации DPS (рис. 6) [Дзедоев и др., 2018], выделяющий кластеры как собственные подмножества во множестве W . Это отличает DPS от классических алгоритмов кластеризации. Он нацелен на выделение в конечном множестве Евклидова пространства плотных областей заданного уровня плотности α .

Подчеркнем, что DPS эффективен в рассматриваемой задаче именно потому, что он отделяет компактные, связанные группы объектов от их размытого, неструктурированного дополнения. Иными словами, DPS отсекает изолированные объекты, «притягивая» остальные в плотные кластеры. При этом, в отличие от классических алгоритмов кластеризации, в DPS отнюдь не все объекты попадают в кластеры. В этом заключается новизна DPS как алгоритма системного анализа.

Алгоритм DPS имеет два свободных параметра: $q < 0$ для расчета радиуса локализации $r_q(W)$, который определяется как степенное среднее всех нетривиальных попарных расстояний во множестве объектов распознавания W , и $\beta \in [-1, 1]$ – уровень максимальности необходимой плотности $\alpha = \alpha(\beta, q)$ DPS-кластеров. На выходе получается множество $W(\alpha(\beta, q))$ α -плотное в каждом своем элементе.

Результат применения алгоритма DPS будем записывать:

$$\text{DPS}(q, \beta): W \rightarrow \{B_1, \dots, B_n\}, \quad (15)$$

где q и β определяют конкретный вид DPS-кластеров, B_1, \dots, B_n – собственные связные подмножества во множестве объектов распознавания. Иными словами, $B = \coprod_{i=1}^n B_i$, где $B_i, i = 1, \dots, n$ есть распознанные DPS-кластеры, $B, B_i \subset W$, а $W \setminus B$ составляет существенную часть множества W . Заметим, что если последнее не верно, то результат распознавания тривиален.

На следующем этапе DPS-кластеры B_1, \dots, B_n преобразуются алгоритмом E²XТ в плоские зоны мощности континуум (т.е. осуществляется отображение F_γ). На этом этапе строится отображение:

$$\text{E}^2\text{XT}(\delta, C, \omega, v): B_i \rightarrow F(B_i), \quad (16)$$

где δ – шаг географической сетки, $\omega < 0, v < 0$ – свободные параметры, C – тип связности, B_i – определены формулой (15), $F(B_i), i = 1, \dots, n$ – искомые плоские зоны ненулевой меры. Если для отображения (16) выполняются приведенные выше условия а), б) и в), то $F(B_i)$ есть искомые зоны возможного возникновения сильных землетрясений.

Таким образом, система FCAZ есть композиция двух алгоритмов:

$$\text{FCAZ}(\gamma) = \text{E}^2\text{XT}(\delta, C, \omega, v) \circ \text{DPS}(q, \beta), \quad (17)$$

а γ – множество свободных параметров FCAZ:

$$\gamma = \{\delta, C, \omega, v\} \cup \{q, \beta\} = \{\delta, C, \omega, v, q, \beta\}. \quad (18)$$

Наличие отображений (16 – 18) позволяет рассматривать FCAZ как метод системного анализа. Действительно, FCAZ(γ) осуществляет обработку исходных данных от начала до конца в единой системе. При этом предъявляется решение в виде искомым двумерных зон, а не их паллиативы, представляющие собой конечные множества точек на плоскости.

Конструкции алгоритмов DPS и E²XТ снабжены блоками искусственного интеллекта, осуществляющими автоматизированный выбор оптимальных значений β в DPS и ω, v в E²XТ. Это делает результат FCAZ-распознавания объективным и воспроизводимым. Оптимальное значение β позволяет распознать DPS-кластеры, для которых разница между совокупностью плотностей (в смысле, заложенном в алгоритм) объектов внутри кластеров и совокупностью плотностей объектов вне кластеров будет максимальной. Выбранные ω и v позволяют найти оптимальное сочетание связности и сканируемости DPS-кластеров.

FCAZ реализует системный подход к исследованию мест возможного возникновения сильных землетрясений. Его характеристическое свойство состоит в том, что распознавание искомым зон в различных по своему строению регионах земного шара базируется на универсальных фактах и методах, позволяющих единообразно подойти к решению всего класса таких задач. Постановка проблемы и процесс ее решения представляет собой единую систему, достаточно инвариантную

относительно геологического строения, выбора порогов магнитуды искомых сильных землетрясений и объектов и т.д. При этом условием применимости FCAZ является сейсмологическая и геолого-геофизическая изученность региона, выраженная в высоком качестве каталога землетрясений.

В Главах 4 – 6 диссертации будет показано, что метод FCAZ успешно применен для распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в целом ряде горных стран мира. Достоверность этих результатов оценена с помощью контрольных экспериментов, а также путем сравнения с высокосейсмичными зонами, распознанными другими методами.

Ранее распознавание высокосейсмичных зон проводилось лишь для одного фиксированного порога магнитуды M_0 . В диссертационной работе разработан метод для последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений для различных пороговых магнитуд в одном и том же регионе. Метод базируется на многократном применении FCAZ к последовательно сужаемому путем DPS-кластеризации множеству объектов распознавания. Он получил название «последовательный FCAZ» и обозначается SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning). Таким образом, сформулированная в Главе 1 классическая проблема впервые расширяется до системно более сложной задачи последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений в едином регионе для нескольких пороговых магнитуд.

Глава 4. FCAZ-распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений. В Главе приводятся результаты применения метода FCAZ для распознавания мест возможного возникновения сильнейших (с магнитудой $M \geq 7.75$) землетрясений в трех регионах Тихоокеанского сейсмического пояса: Анды Южной Америки и побережья полуострова Камчатка и Курильских островов.

В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с глубиной гипоцентров до 70 км из каталога ANSS (1963 – 2013 гг., Анды), каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 – 2015 гг., побережье полуострова Камчатка) и каталога Курило-Охотского региона (1962 – 2009 гг., побережье Курильских островов).

Для выбора порога магнитуды M_R , начиная с которого эпицентры использовались как объекты распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) в каталогах. С учетом оценки M_c было принято решение использовать в качестве объектов FCAZ-распознавания в Андах эпицентры землетрясений с $M \geq M_R = 4.5$ (16 556 эпицентров), на Камчатке – $M \geq M_R = 3.5$ (44 113 эпицентров), на Курильских островах – $M \geq M_R = 4.2$ (11 725 эпицентров). На рис. 7а совокупностью синего и зеленого цветов показаны объекты распознавания в горном поясе Анд Южной Америки.

Списки коровых землетрясений с $M \geq 7.75$, начиная с 1900 г., формировались на

базе перечисленных инструментальных каталогов, работ по ЕРА-распознаванию и каталога сильных землетрясений на территории СССР с древних времен до 1975 г. В итоге каталог землетрясений с $M \geq 7.75$ горного пояса Анд содержит 24 события за период 1900 – 2013 гг., каталог Камчатки – 8 (1900 – 2015 гг.), Курильских островов – 11 (1900 – 2009 гг.). Эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ показаны на рис. 7б – 8.

DPS-кластеризация эпицентров землетрясений, являющихся объектами FCAZ-распознавания, осуществлялась следующим образом. Вначале был применен алгоритм DPS с уровнем плотности $\alpha_1(\beta_1)$. Полученное плотное множество объектов $W_1(\alpha_1(\beta_1))$ было исключено из дальнейшего рассмотрения и алгоритм был применен второй раз к оставшемуся подмножеству с уровнем плотности $\alpha_2(\beta_2)$. Это дало новые DPS-кластеры $W_2(\alpha_2(\beta_2))$, где $W_2 = W \setminus W_1(\alpha_1(\beta_1))$. Аналогичным образом выполнялись последующие итерации. Искомыми DPS-кластерами были объявлены все связные компоненты, входящие в $W_1(\alpha_1(\beta_1)) \cup W_2(\alpha_2(\beta_2)) \cup \dots \cup W_k(\alpha_k(\beta_k))$.

В горном поясе Анд Южной Америки было выполнено 4 итерации DPS-кластеризации, на Камчатке – 2 итерации, на Курильских островах – 3. Оптимальные значения параметра β – уровня максимальности плотности DPS-кластеров – вычислялись автоматически с помощью блока искусственного интеллекта. Отметим, что в распознанные DPS-кластеры в горном поясе Анд вошло 67% объектов распознавания, на Камчатке – 73.3%, на Курильских островах – 77.5%. DPS-кластеры показаны на рис. 7 – 8 зеленым цветом.

В каждом из трех регионов к DPS-кластерам был применен алгоритм E²ХТ. Оптимальные значения его входных параметров ω и ν вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта. При этом использовалась регулярная географическая сетка и тип связности C_8 . На рис. 7б – 8 совокупностью зеленого и красного цветов показаны картированные таким образом FCAZ-зоны.

Как видно из рис. 7б – 8 FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров известных сильнейших землетрясений. Из 24 землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд эпицентр только одного (4.2%) расположен вне FCAZ-зон (рис. 7б) и создает ошибку типа «пропуск цели». Это эпицентр землетрясения, произошедшего 24 мая 1940 г. более чем за 20 лет до начала систематических инструментальных сейсмологических наблюдений в регионе. Соответственно, положение эпицентра может быть искажено, и эта единственная ошибка может быть и не актуальна.

Из 8 рассматриваемых на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка сильнейших землетрясений эпицентр только одного (12.5%) не попал в распознанные FCAZ-зоны (рис. 8а). Это эпицентр Озерновского землетрясения с $M = 7.75$ в Корякии, произошедшего 22 ноября 1969 г. на севере рассматриваемого региона.

В 2006 г. в Корякии севернее границы рассматриваемого региона (рис. 8а) произошло Олюторское землетрясение, аналогичное по силе Озерновскому. Ошибка

«пропуск цели» Озерновского землетрясения и не включение в рассматриваемый регион района Олюторского землетрясения связаны с тем, что их эпицентры расположены вне современной зоны субдукции. Условия возникновения этих землетрясений, находящихся вне зоны субдукции, кардинально отличаются от остальных рассматриваемых в регионе сильнейших землетрясений. Обоснованием этого служит и то, что эпицентры обоих землетрясений находятся вне территории, для которой ведутся работы по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений методом академика С.А. Федотова. Таким образом, эпицентр Озерновского землетрясения можно не считать ошибкой «пропуск цели».

На Тихоокеанском побережье Курильских островов (рис. 8б) из 11 известных землетрясений с $M \geq 7.75$ эпицентр только одного (9%) является ошибкой «пропуск цели» (землетрясение 01.05.1915 с $M = 8.3$). Отметим здесь, что определение мест возможного возникновения землетрясений на Тихоокеанском побережье Курильских островов методами распознавания образов ранее не проводилось. Оно впервые выполнено в диссертационной работе.

Необходимо особо отметить, что FCAZ-зоны, распознанные в горном поясе Анд Южной Америки, содержат в себе 69% эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ из имеющихся в используемом при распознавании инструментальном каталоге. При этом они занимают примерно половину площади сейсмоактивного горного пояса Анд и активной зоны субдукции.

FCAZ-зоны на побережье Камчатки содержат в себе 73% эпицентров землетрясений с $M \geq 4.0$ из имеющихся в инструментальном каталоге и занимают 40% площади сейсмоактивных Курило-Камчатской и Алеутской дуг, попадающих в границы рассматриваемого здесь региона. На побережье Курильских островов FCAZ-зоны содержат в себе 81% эпицентров землетрясений с $M \geq 5.0$ из имеющихся в каталоге.

Вышесказанное позволяет с большой степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны (рис. 7б – 8) как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд и на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и Курильских островов.

Распознанные зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Камчатке и Курильских островах хорошо согласовываются с результатами долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2013 – VIII 2018 гг. по методу С.А. Федотова. В [Федотов, Соломатин, 2015] с разной степенью вероятности ожидалось землетрясение с $M = 5.7 - 7.2$ на всем Тихоокеанском побережье Камчатки. При этом в течение указанного временного отрезка землетрясения с $M \geq 7.7$ ожидалось в прибрежной зоне Авачинского залива и у берегов Южной Камчатки. В этих районах располагаются и достаточно большие FCAZ-зоны (рис. 8).

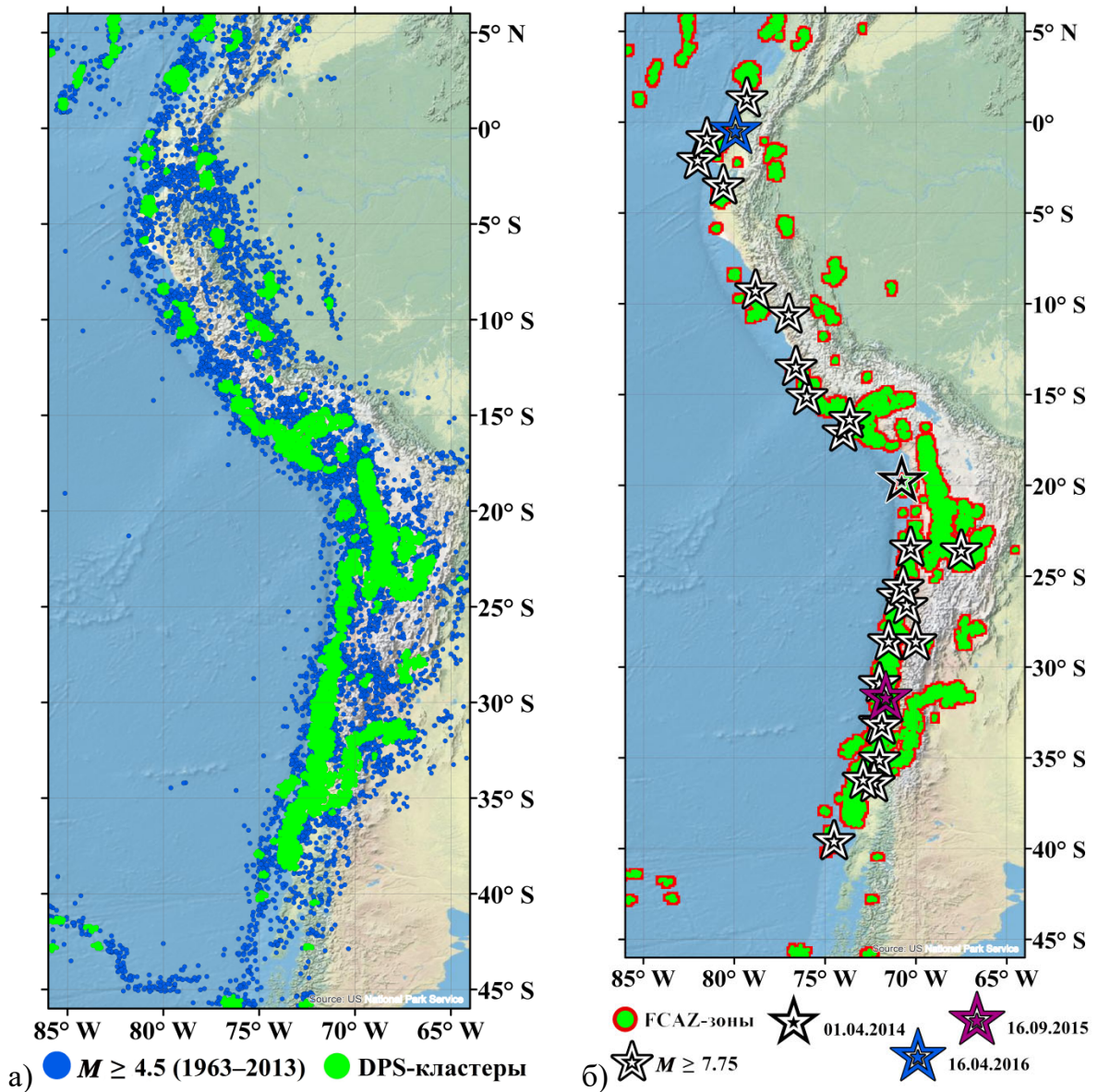


Рис. 7. Горный пояс Анд: а) объекты FCAZ-распознавания – эпицентры землетрясений с $M \geq 4.5$ и распознанные DPS-кластеры; б) FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$.

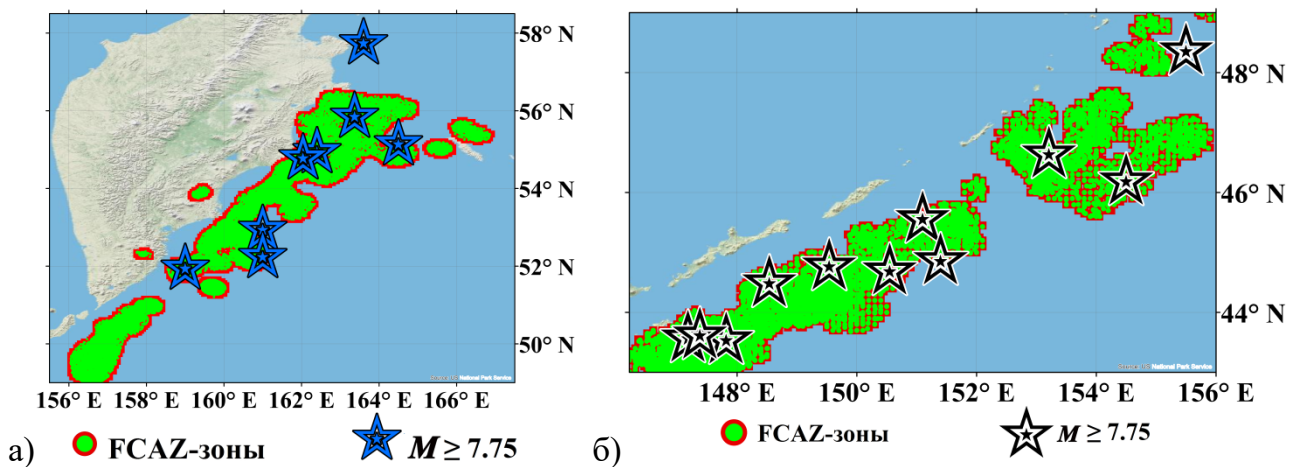


Рис. 8. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$: Тихоокеанское побережье а) полуострова Камчатка; б) Курильских островов.

Наилучшим обоснованием достоверности результатов распознавания является чистый эксперимент, т.е. анализ согласованности FCAZ-зон и расположения эпицентров землетрясений ($M \geq M_0$), произошедших после окончания используемого каталога. Так в горном поясе Анд Южной Америки после 2013 г. произошло 3 землетрясения с $M \geq 7.75$: 01.04.2014 с $M = 8.2$ (к северо-востоку от побережья Чили), 16.09.2015 с $M = 8.3$ (побережье Чили) и 16.04.2016 с $M = 7.8$ (Эквадор). Информация о них никак не использовалась при распознавании.

Эпицентры землетрясений 2014, 2015 и 2016 годов показаны на рис. 76 соответственно черной, фиолетовой и синей звездами. Первые два эпицентра находятся строго внутри FCAZ-зон. Третий располагается на малом расстоянии от границ распознанных зон. Тем самым получен весомый и независимый от результатов исследования аргумент в пользу достоверности проведенного FCAZ-распознавания в горном поясе Анд.

Подытоживая результаты Главы, отметим, что важным достижением здесь является то, что впервые распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений успешно проведено на базе объективной классификации без привлечения МСР и формирования обучающих выборок. При этом результаты, в целом, хорошо согласуются с полученными ранее независимо методом ЕРА (подробнее об этом в Главе 6). Таким образом, показано, что метод FCAZ применим для системного изучения регионов с очень высоким уровнем сейсмичности.

Глава 5. FCAZ-распознавание мест возможного возникновения сильных и значительных землетрясений для одной и нескольких пороговых магнитуд. В Главе рассматриваются регионы с более низким уровнем сейсмичности, чем в предыдущей Главе. Приводятся результаты FCAZ-распознавания мест возможного возникновения сильных (здесь сильными будем называть события с $M \geq 6.0$) землетрясений в Калифорнии ($M \geq 6.5$) и значительных землетрясений в регионах Алтай-Саяны ($M \geq 5.5$) и Прибайкалье-Забайкалье ($M \geq 5.5, 5.75, 6.0$), на Кавказе ($M \geq 5.0$), а также на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа ($M \geq 4.5, 5.0$).

Множества объектов распознавания формировались на базе эпицентров коровых землетрясений из каталогов: ANSS (1960 – 2012 гг., Калифорния), «Землетрясения в СССР» и «Землетрясения Северной Евразии» (1962 – 2008 гг., Кавказ; 1962 – 2008 гг., Крым и северо-запад Кавказа; 1962 – 2009 гг., регион Алтай-Саяны; 1962 – 2010 гг., регион Прибайкалье-Забайкалье). На базе оценки M_c было принято решение использовать в качестве объектов распознавания в Калифорнии эпицентры землетрясений с $M \geq M_R = 3.0$ (31 874 эпицентра), в регионе Алтай-Саяны – $M \geq M_R = 2.8$ (3 647 эпицентров), на Кавказе – $M \geq M_R = 3.0$ (6 980 эпицентров), в Крыму и на северо-западе Кавказа – $M \geq M_R = 2.0$ (2 398 эпицентров) и в регионе Прибайкалье-Забайкалье – $M \geq M_R = 2.7$ (11 297 эпицентров).

На рис. 9 совокупностью зеленого и красного цветов показаны распознанные

FCAZ-зоны возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии ($M \geq 6.5$) и значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны ($M \geq 5.5$), на Кавказе ($M \geq 5.0$), на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа ($M \geq 4.5$).

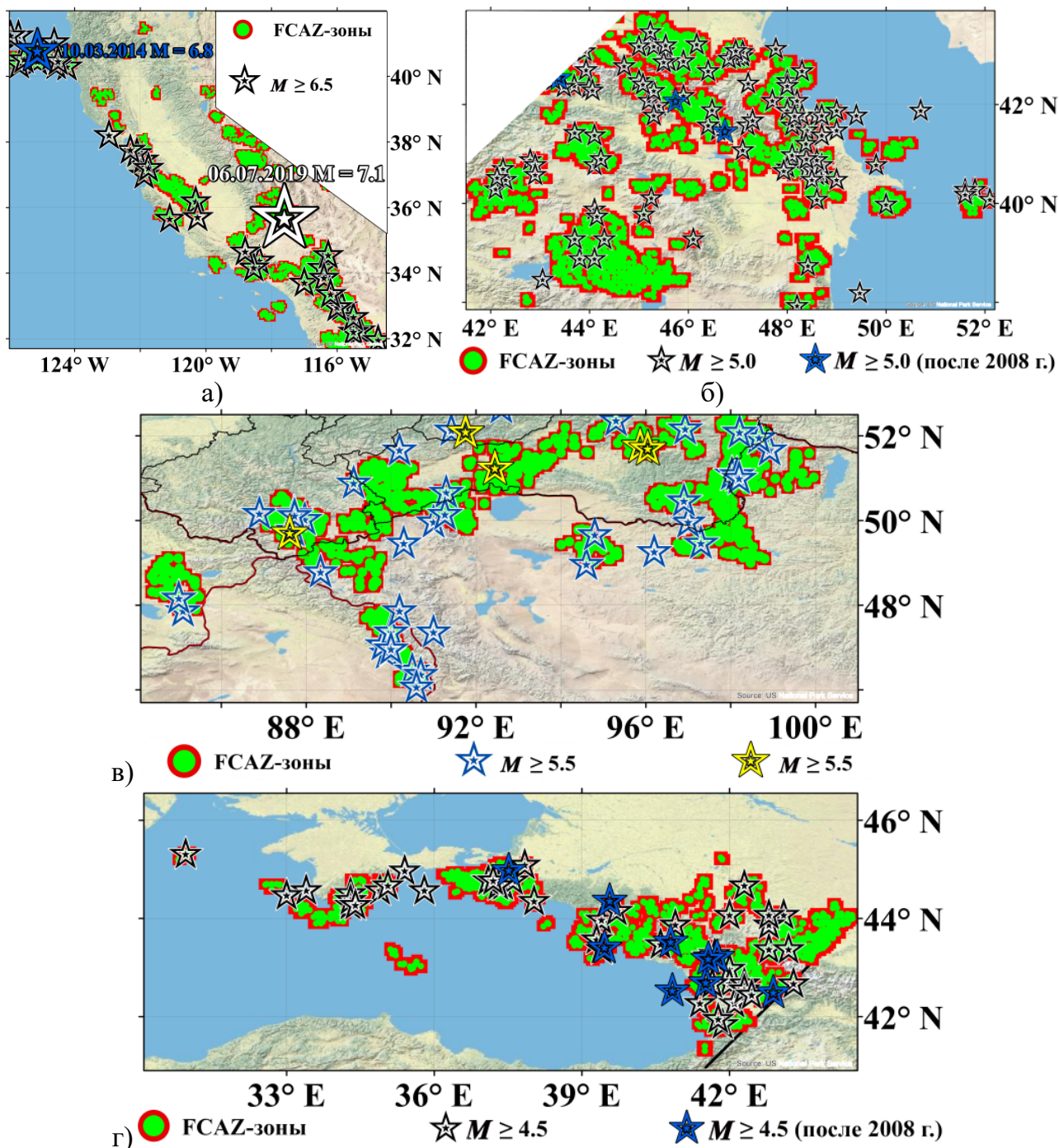


Рис. 9. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений: а) Калифорния, $M \geq 6.5$ (черные звезды – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$ за период 1836 – 2010 гг., синяя и белая звезды – $M \geq 6.5$, начиная с 2014 г.); б) Кавказ, $M \geq 5.0$ (черные звезды – $M \geq 5.0$ за период 650 – 2008 гг., синие звезды – $M \geq 5.0$, начиная с 2009 г.); в) регион Алтай-Саяны, $M \geq 5.5$ (синие звезды – $M \geq 5.5$ за период 1902 – 2008 гг., желтые звезды – $M \geq 5.5$, начиная с 2011 г.); г) Крым и северо-запад Кавказа, $M \geq 4.5$ (черные звезды – $M \geq 4.5$ за период 1990 – 2008 гг., синие звезды – $M \geq 4.5$, начиная с 2009 г.).

На первый взгляд из 33 землетрясений с $M \geq 6.5$ (1836 – 2010 гг.) в Калифорнии эпицентры 5-ти (15%) не попали во FCAZ-зоны (рис. 9а). Заметим, однако, что 3 из них расположены в акватории Тихого океана на большом расстоянии от побережья и, таким образом, фактически не обусловлены тектоникой изучаемого региона. Два других землетрясения произошли в 1857 г. и 1906 г. задолго до начала систематизированных инструментальных наблюдений в регионе. Тем самым, если исключить из рассмотрения эти особые случаи, то придем к тому, что, по сути, в результате отсутствуют ошибки типа «пропуск цели».

Отметим, что в Калифорнии FCAZ-зоны содержат в себе 83% событий с $M \geq 4.5$ из имеющихся в инструментальном каталоге. После окончания каталога, использованного для выбора объектов распознавания, произошло два сильных землетрясения (рис. 9а). Эпицентры обоих находятся строго внутри FCAZ-зон. Таким образом, мы имеем основания считать, что в результате распознавания были построены искомые места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии.

В регионе Алтай-Саяны из 48 (1902 – 2008 гг.) землетрясений с $M \geq 5.5$ эпицентры лишь 7 (15%) находятся вне распознанных FCAZ-зон (рис. 9в). Отметим, что 6 из них произошли до начала активных сейсмологических наблюдений в регионе и локация эпицентров некоторых из них могут быть недостоверными. При этом 3 эпицентра находятся на территории Монголии, а 2 расположены на юге Красноярского края, где и сегодня функционирует малое количество сейсмических станций. Таким образом, эти 6 эпицентров в реальности могут иметь иные локации и не быть пропусками цели.

FCAZ-зоны содержат в себе 67% эпицентров землетрясений с $M \geq 4.0$ из числа имеющихся в каталоге. После окончания используемого инструментального каталога в регионе произошло 5 землетрясений с $M \geq 5.5$ (рис. 9в). Эпицентры 4 из них расположены строго внутри FCAZ-зон. Резюмируя, по совокупности приведенных аргументов можно утверждать, что показанные на рис. 9в результаты FCAZ-распознавания в регионе Алтай-Саяны имеют высокую степень достоверности.

При FCAZ-исследовании в регионе Алтай-Саяны была предпринята попытка распознать также и зоны с наименьшим, из всех возможных, количеством ошибок типа «пропуск цели». Для этого в DPS-кластеризации путем изменения на заданном отрезке значений параметра q варьировался радиус локализации $r_q(W)$. Из всех полученных вариантов распознавания был выбран оптимальный, т.е. имеющий наименьшее количество пропусков эпицентров значительных землетрясений с $M \geq 5.5$. В нем, по сравнению с основным вариантом FCAZ-зон (рис. 9в), оказалось на два «пропуска цели» меньше.

Эпицентры этих двух землетрясений, составляющих разницу в количестве ошибок типа «пропуск цели», находятся соответственно на территории и на границе

Монголии. При этом площадь оптимальных зон оказалась в 1.5 раза больше, чем в основном варианте распознавания (рис. 9в). Таким образом, в случае оптимальных FCAZ-зон неизбежно возрастает число ложных тревог, что негативно влияет на достоверность распознавания. В связи с этим окончательный выбор был сделан в пользу основного варианта распознавания (рис. 9в).

На Кавказе из 106 (650 – 2008 гг.) значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ эпицентры 8 (7.5%) находятся вне FCAZ-зон (рис. 9б). Объясняя эти «пропуски цели», отметим, что 3 землетрясения произошли в 957, 1250 и 1667 годах задолго до начала систематизированных инструментальных наблюдений в регионе. Тем самым, их локация вполне могут быть ошибочными и не являться, в действительности, «пропусками цели». Еще 3 нераспознанных эпицентра располагаются на большом расстоянии от сейсмических сетей, на базе которых создавались использованные при распознавании каталоги. Это так же допускает сомнения в том, что эти землетрясения есть реальные «пропуски цели». Таким образом, уверенными «пропусками цели» являются два эпицентра: в Дагестане и акватории Каспийского моря.

Отметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 68% эпицентров землетрясений с $M \geq 4.0$ из числа имеющихся в каталоге. Эпицентры всех трех значительных землетрясений, произошедших после окончания используемого инструментального каталога, находятся строго внутри FCAZ-зон (рис. 9б). Это говорит в пользу достоверности результатов FCAZ-распознавания.

Заметим, что подрегион в северо-западном районе Кавказа (белый треугольник на рис. 9б) был исключен из рассмотрения в силу нехватки в этом районе эпицентров землетрясений, являющихся объектами распознавания. Проведение FCAZ-распознавания в этом подрегионе оказывается невозможным. Этот район вошел в объединенный регион Крым – северо-запад Кавказа, в котором проведено FCAZ-распознавание для $M_0 = 4.5$.

Количество землетрясений с $M \geq M_0$ должно быть достаточным для оценки степени их согласованности с распознанными FCAZ-зонами. В инструментальном каталоге землетрясений региона Крым и северо-запад Кавказа имеется всего 5 событий с $M \geq 5.0$, а начиная с 1900 г. – 17. При этом магнитуды землетрясений начала XX века могут быть завышенными. По этой причине в регионе рассматривались два различных магнитудных порога распознаваемых мест землетрясений: $M_0 = 4.5$ и $M_0 = 5.0$.

Как видно из рис. 9г, FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений (1900 – 2008 гг.) с $M \geq 4.5$. Только 5 (11.4%) эпицентров из 44 находятся вне распознанных зон. Отметим, что все пропущенные землетрясения произошли до начала используемого инструментального каталога. При этом 3 землетрясения имеют магнитуды $M = 4.5 - 4.7$, определенные с погрешностью ± 0.5 . Для порога $M_0 = 4.5$ можно достаточно уверенно говорить лишь о двух «пропусках

цели». FCAZ-зоны содержат в себе 67% эпицентров землетрясений с $M \geq 3.5$ из числа имеющихся в каталоге.

Распознанные FCAZ-зоны (рис. 9г) оказываются очевидно связанными и с событиями более высокого порога магнитуды $M_0 = 5.0$. В регионе на момент распознавания известно 17 землетрясений с $M \geq 5.0$. Эпицентры 15 (88.2%) из них расположены внутри или на границах FCAZ-зон. Таким образом, если рассматривать землетрясения с $M \geq 5.0$, то FCAZ-зоны могут интерпретироваться как места их возможного возникновения. При этом 2 «пропуска цели» – это те же 2 Черноморских землетрясения, что и в предыдущем рассуждении относительно порога $M_0 = 4.5$.

В рассматриваемом регионе после окончания используемого инструментального каталога произошло 9 землетрясений с $M \geq 4.5$. Эпицентры 8 из них находятся строго внутри FCAZ-зон. Единственной ошибкой «пропуск цели» является эпицентр землетрясения с $M = 4.6$, расположенный в акватории Черного моря.

Изучаемый Крым-Кавказский регион является первым для которого FCAZ-зоны интерпретировались для двух различных порогов магнитуды. Иными словами, в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений была допущена вариация порога магнитуды M_0 .

Приведенные выше статистические данные позволяют с большой степенью достоверности интерпретировать FCAZ-зоны (рис. 9) как места возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны, на Кавказе, а также на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа.

В Главе описывается впервые проведенное последовательное распознавание мест возможного возникновения землетрясений для нескольких магнитудных порогов в одном и том же регионе. Такое распознавание осуществлялось с помощью метода SFCAZ, упомянутого выше и являющегося дальнейшим развитием FCAZ. Последовательно изучены места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$ и $M \geq 6.0$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье.

На первом этапе исследования решалась классическая задача распознавания мест возможного возникновения землетрясений ($M \geq M_0 = 5.5$). На рис. 10а показаны распознанные зоны, которые хорошо согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 5.5$. Из 71 такого землетрясения эпицентры двух (2.8%) находятся вне распознанных зон, создавая тем самым ошибки типа «пропуск цели». Эти два землетрясения произошли до начала активных инструментальных наблюдений в регионе (1929 г. и 1957 г.) и имеют магнитуду $M = 5.6$, определенную с погрешностью ± 0.5 , а их эпицентры располагаются за пределами Российской Федерации. Таким образом, их реальная магнитуда может быть меньше порога $M_0 = 5.5$ и, вероятно, проведенное распознавание не имеет «пропусков цели».

Принципиально новыми являются второй и третий этапы последовательного

распознавания. На втором этапе исследовались места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$ в том же регионе Прибайкалье-Забайкалье. Для этого в качестве объектов распознавания использовались только эпицентры, вошедшие в DPS-кластеры на первом этапе. Таким образом, внутри DPS-кластеров, определяющих высокосейсмичные зоны для $M \geq 5.5$, распознавались подкластеры, формообразующие места возможного возникновения более сильных землетрясений.

Распознанные таким образом зоны хорошо согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 5.75$ (рис. 10б). Эпицентры лишь трех (10%) из 30 таких землетрясений находятся за их границами. Это эпицентры землетрясений с весьма неточным определением магнитуды: $M = 5.8 \pm 0.5$ и $M = 5.8 \pm 0.2$ [Кондорская, Шебалин, 1977]. Магнитуда третьего землетрясения пересчитана из энергетического класса. С существенной долей вероятности, магнитуды этих трех землетрясений могут иметь значения $M < 5.75$, а сами землетрясения не быть предметом исследования. Заметим, что распознанные территории вложены в высокосейсмичные зоны для магнитудного порога $M_0 = 5.5$, определенные на первом этапе исследования.

На третьем этапе распознавались места возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 6.0$. В качестве объектов распознавания уже использовались эпицентры землетрясений, вошедшие в DPS-кластеры на втором этапе. Из 17 землетрясений с $M \geq 6.0$ эпицентры лишь двух (11.7%) находятся вне распознанных зон (рис. 10в). Первый из них – эпицентр землетрясения 1939 г. с $M = 6.0 \pm 0.3$ [Кондорская, Шебалин, 1977]; второй, с $M = 6.3$ – 2008 г., – находится на расстоянии порядка 0.15° от картированных зон.

После 2010 г. в исследуемом регионе произошло 3 землетрясения с $M \geq 5.5$. Эпицентры двух из них находятся строго внутри зон, соответствующих их магнитудам, что говорит в пользу достоверности результатов SFCAZ-распознавания.

Путем последовательного распознавания методом SFCAZ получена цепочка высокосейсмичных зон в которой зоны для больших пороговых магнитуд вложены в соответствующие зоны для меньших. Таким образом, результаты последовательного распознавания могут быть практически использованы при сейсмическом районировании. Результаты проведенного здесь последовательного распознавания позволяют утверждать, что выполненный переход от FCAZ к SFCAZ не ухудшает качество получаемых результатов.

Подытоживая результаты Главы, отметим, что в изученных 5 регионах после окончания используемых инструментальных каталогов произошло 22 землетрясения с $M \geq M_0$. Эти события позволили провести чистый эксперимент. Заметим, что 19 (86.3%) эпицентров расположены внутри распознанных высокосейсмичных зон. Такой результат чистого эксперимента следует признать успешным. Тем самым получен еще один объективный аргумент в пользу достоверности результатов проведенного в Главе распознавания.

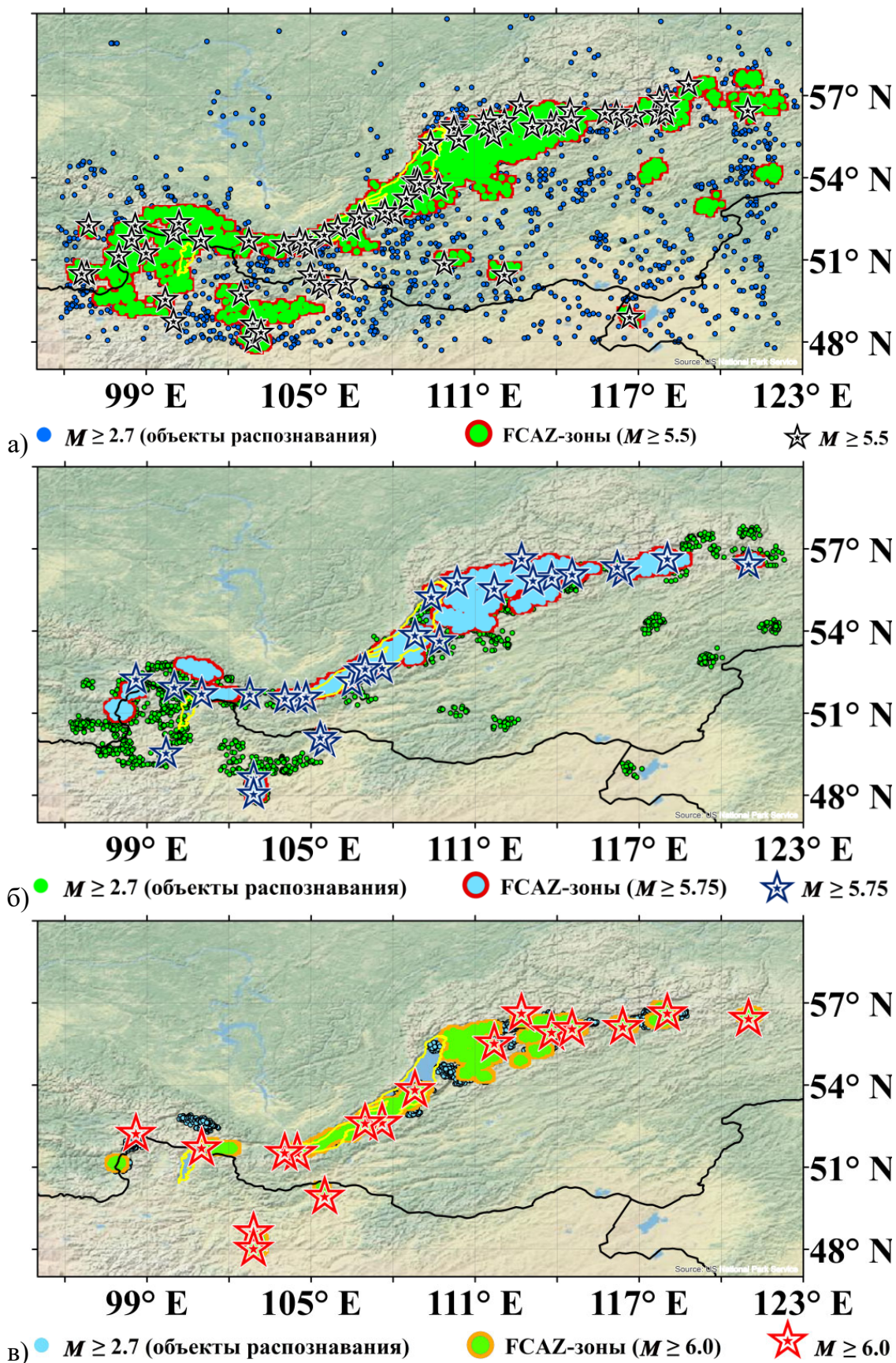


Рис. 10. Регион Прибайкалье-Забайкалье: а) зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$; б) зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$ и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.75$; в) зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$.

Отдельно необходимо отметить землетрясение с $M = 7.1$ в Калифорнии, произошедшее 6 июля 2019 г. (белая звезда на рис. 9а). Эпицентр этого землетрясения расположен внутри FCAZ-зон на территории, где ранее сильные землетрясения не происходили. Заметим, что этот эпицентр находится вне зон, распознанных как опасные для $M \geq 6.5$ методом ERA [Гельфанд и др., 1976].

Глава 6. Обоснование достоверности результатов FCAZ-распознавания. В Главе приводятся дополнительные аргументы в пользу интерпретации FCAZ-зон как мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

Одновременно с чистым экспериментом (см. Главы 4 – 5) или при его отсутствии оценка достоверности осуществляется с помощью вычислительных контрольных экспериментов. Для FCAZ-распознавания проводится два типа контрольных экспериментов: «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история».

В эксперименте «индивидуальная сейсмическая история» FCAZ-зоны строятся по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений (с $M \geq M_R$) только за 20 лет перед событиями с $M \geq M_0$. Эксперимент заканчивается анализом взаимного расположения распознанных зон и эпицентра землетрясения с $M \geq M_0$, для которого зоны были построены.

В эксперименте «полная сейсмическая история» из используемого инструментального каталога исключаются эпицентры за несколько последних лет, в течение которых происходили события с $M \geq M_0$. FCAZ-зоны строятся путем DPS-кластеризации оставшихся в каталоге эпицентров. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентров землетрясений с $M \geq M_0$ из отброшенной части каталога относительно распознанных зон.

Заметим, что с целью повышения объективности вычислительных экспериментов при их проведении значения параметров (q , β , δ , ω , ν , C) метода FCAZ (т.е. алгоритмов DPS и E²XТ) берутся те же, что и в основном варианте распознавания (Главы 4 – 5). Напомним, что значения β , ω и ν в основном варианте вычислялись автоматизировано блоками искусственного интеллекта.

Для горного пояса Анд Южной Америки, Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка, Калифорнии и Кавказа проведены серии контрольных экспериментов. На рис. 11 в качестве примера показаны характерные результаты экспериментов в Калифорнии.

Сравнительный анализ пространственного расположения 29-ти FCAZ-зон, распознанных в экспериментах «индивидуальная сейсмическая история», и основных результатов FCAZ-распознаний (Главы 4 – 5) показал высокую степень их подобия. При этом эпицентры 27 из 29 землетрясений, для которых проводились эксперименты, расположены внутри или на границах распознанных FCAZ-зон.

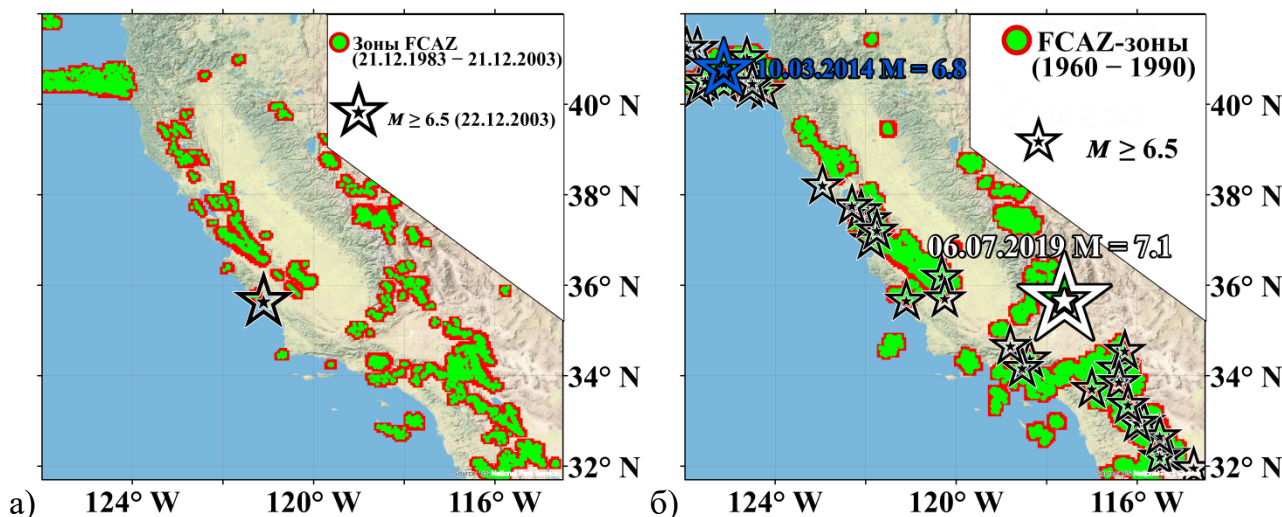


Рис. 11. Калифорния: а) вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 22.12.2003; б) вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1960 – 1990 гг.) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$.

FCAZ-зоны, распознанные в экспериментах «полная сейсмическая история», по своим формам и пространственному расположению близки к FCAZ-зонам основных вариантов распознаваний. Внутри зон попадают 25 из 27 эпицентров землетрясений с $M \geq M_0$, произошедших спустя годы (в частности, 10 – 25 лет) после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения). Так, в Калифорнии, строго внутри FCAZ-зон, располагается эпицентр землетрясения с $M = 7.1$, произошедшего спустя 28.5 лет после окончания используемого в эксперименте каталога (рис. 11б).

Результаты контрольных экспериментов говорят в пользу устойчивости FCAZ-результатов по времени и пространству. Это подтверждает достоверность основных вариантов распознаваний в изученных в диссертации регионах, как зон возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

В горном поясе Анд, на Тихоокеанском побережье Камчатки, в Калифорнии и на Кавказе был проведен сопоставительный анализ FCAZ-зон и распознанных ранее в [Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1982; 1984; 1988] зон ЕРА. Как правило, зоны FCAZ имеют меньшую площадь, чем зоны ЕРА. Исключением является горный пояс Анд, где FCAZ-распознавание проводилось на большей территории. На рис. 12 показано сравнение FCAZ-зон и зон ЕРА на Камчатке и в Калифорнии.

Отметим, прежде всего, что на Камчатке выделенные обоими методами высокосейсмичные территории имеют общее, северо-восточное простирание, обусловленное зоной субдукции. При этом FCAZ-зоны, как правило, расположены северо-западнее зон ЕРА (рис. 12а). Это объясняется тем, что большая часть объектов, распознанных как высокосейсмичные методом ЕРА, образованы пересечением глубоководного желоба с морфоструктурными линеаментами II-го и III-го рангов. В то же время, основная часть эпицентров, являющихся объектами

FCAZ-распознавания, расположена в зоне Беньофа (сейсмофокальной зоне) в пределах континентального склона до желоба и порождается конвергентным взаимодействием двух литосферных плит.

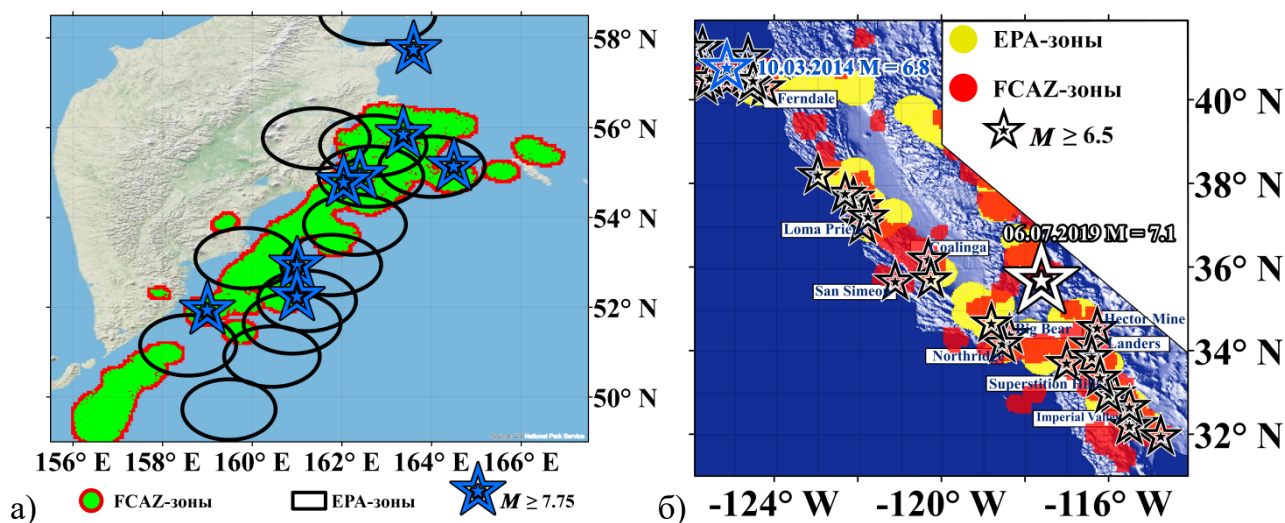


Рис. 12. Сравнение зон возможного возникновения землетрясений, распознанных методами FCAZ и ERA: а) Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка; б) Калифорния.

Зоны FCAZ достаточно хорошо согласуются с эпицентрами известных сильнейших (Анды и Камчатка), сильных (Калифорния) и значительных (Кавказ) землетрясений. Проверка подобной согласованности для ERA-зон является не однозначно поставленной задачей. Причина тому – особенности построения схемы МСР и выбора объектов ERA-распознавания, в особенности в регионах Тихоокеанского сейсмического кольца. Более того, в ERA отсутствует формализованный переход от классификации точечных объектов к искомым-плоским высокосейсмичным зонам с однозначными границами. В ERA эта нетривиальная задача решается тривиальным проведением кругов, радиуса пропорционального magnitude распознаваемых землетрясений, вокруг объектов, классифицированных как высокосейсмичные. Круги совпадают с областями, изначально использованными для вычисления значений характеристик объектов. Обоснованность такого перехода неочевидна.

Если говорить о событиях, составивших материал чистого эксперимента для обоих методов, то внутри или на границах FCAZ-зон находится 7 из 8 эпицентров таких землетрясений. При этом внутри зон ERA гарантировано находится лишь 4 эпицентра. Отметим, что эпицентр землетрясения 6 июля 2019 г. с $M = 7.1$ в Калифорнии расположен строго внутри FCAZ-зон, но за пределами зон ERA. Резюмируя, можно утверждать, что результаты FCAZ-распознавания, полученные в диссертационной работе, имеют целый ряд преимуществ по сравнению с ERA-результатами.

Для целей установления вклада форшоковых и афтершоковых последовательностей в формирование конечного результата FCAZ-распознавания впервые в качестве объектов распознавания были использованы эпицентры из декластеризованных каталогов. На Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и в Калифорнии FCAZ-зоны, распознанные на базе полных и декластеризованных каталогов, оказались почти совпадающими. Это говорит о том, что для рассматриваемых регионов наличие в каталогах форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты распознавания высокосейсмичных зон в рамках кластеризационного метода FCAZ.

Вычисленные в автоматическом режиме оптимальные значения параметра β (максимальность плотности в DPS-кластерах, а по сути, «взгляд» алгоритма на топологию множества объектов распознавания и отделимость их плотных сгущений от неплотного дополнения) для обоих распознаваний на Камчатке оказались очень близкими: -0.2 и -0.2 для декластеризованного каталога; -0.15 и -0.2 для полного каталога. Аналогичные оптимальные значения β в Калифорнии отличаются. Объяснением этому может быть то, что после декластеризации каталога количество объектов распознавания сократилось на 68%, что привело к изменению количественно-пространственного распределения множества объектов. Вместе с тем эксперимент в Калифорнии также можно считать успешным, т.к. результаты показывают, что это не привело к значительному изменению ни DPS-кластеров, ни, собственно, FCAZ-зон.

Глава 7. FCAZ-распознавание как проблема теоретического системного анализа. В Главе построена системно-математическая модель FCAZ-распознавания.

Рассмотрим проблему FCAZ-распознавания с точки зрения теоретического системного анализа (в англоязычной литературе ASA – Advanced Systems Analysis [Gvishiani, 2019; <https://iiasa.ac.at/>]). Процесс и результат определения потенциальных зон высокой сейсмической опасности представляет собой сложную систему [например, Zgurovsky, Pankratova, 2007]. Состояние системы зависит как от пространственных координат объектов распознавания, так и от времени. Полученные выше результаты FCAZ-распознавания следуют из алгоритмического анализа определенных в настоящий момент времени объектов $W = \{w\}$, представляющих собой многочисленные эпицентры, вообще говоря, достаточно слабых землетрясений.

Как было показано в Главах 4–5, для картины сегодняшнего дня FCAZ выполнил достоверное распознавание искомым высокосейсмичных зон в целом ряде горных стран. В Главе 6 приведены обоснования такой достоверности для некоторого периода времени. Этот период не является достаточно продолжительным, не только в геологическом, но и в реальном времени. На практике это десятки, максимум – сотни лет. Период характеризуется тем, что на его протяжении множество объектов $w \in W$ кардинальным образом не меняется. Под кардинальными изменениями здесь имеются

в виду как возникновение на ранее асейсмичных площадях облаков новых эпицентров землетрясений с $M \geq M_R$, так и существенное изменение топологии распределения объектов.

Будем обозначать через Δt промежуток времени, в который с множеством W не произошло кардинальных изменений. Естественно предположить, что полученный в момент времени t_1 FCAZ-результат будет иметь место вплоть до момента $t_2 = t_1 + \Delta t$. Начиная с t_2 , множество W существенно изменило свою пространственную форму и / или топологию. Следовательно, в момент t_2 необходимо выполнить новое FCAZ-распознавание с учетом вновь поступивших исходных данных.

Рассматривая это рассуждение как первый шаг процесса индукции несложно определить $\Delta_i t$ и последовательность пар:

$$\{(t_i, \text{FCAZ}(t_i)): i = 1, 2, \dots\}, \quad (19)$$

где значения времени t_i – суть моменты, когда должны повторяться FCAZ-распознавания.

Отметим, что, вообще говоря, $\Delta_i t \neq \Delta_j t, \forall i, j = 1, 2, \dots, i \neq j$. Изучение зависимости $\Delta_i t$ от изменений множества W с течением времени представляет собой самостоятельную нетривиальную проблему системного анализа, выходящую за рамки настоящей диссертации.

Таким образом, в Главах 3 – 6 диссертации строится, по существу, аналитический подход к распознаванию потенциальных высокосейсмичных зон как к изменяющейся с течением времени сложной системе, стабильной, при этом, на достаточно протяженных локальных промежутках. Подход базируется на динамических изменениях основных параметров системы. Последнее обосновывает отнесение алгоритмической последовательности $T(i) \times \text{FCAZ}$, где $T = \{t_i; i = 1, 2, \dots\}$ определено формулой (19), к методам системного анализа. Общая схема этого метода иллюстрируется на рис. 13, где μ_i – мера качества распознавания в момент t_i .

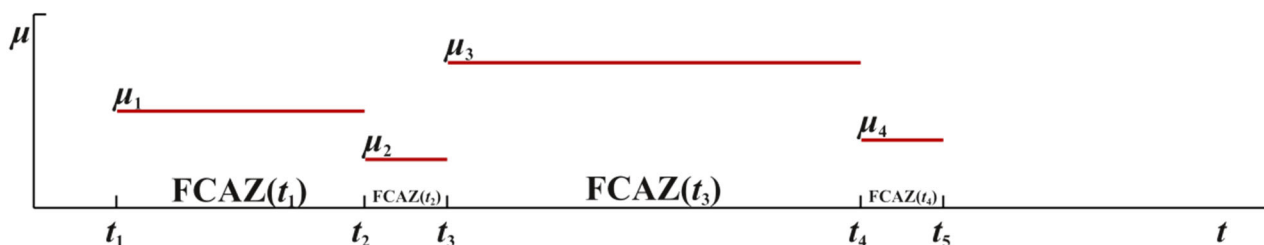


Рис. 13. Иллюстрация разработанного на основе FCAZ-распознавания метода системного анализа. Бордовым цветом показаны значения меры качества FCAZ-распознавания на различных временных промежутках.

Перейдем к точным формулировкам. Пусть $\text{FCAZ}_{\gamma_1}(W_{t_1}): G = B_{t_1} \amalg H_{t_1}$ – результат FCAZ-распознавания ($M \geq M_0$) в момент времени t_1 . При этом:

- $W_{t_1} = \{w\}$ – конечное множество объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq M_R$) в момент времени t_1 , $|W_{t_1}| = n_{t_1}$;
- $G = \{g\}$ – некоторое покрытие рассматриваемого региона квадратными объектами, на котором работает алгоритм E²XТ;
- $\gamma_1 = \{\delta, C, \omega, v, q, \beta\}$ – множество значений свободных параметров FCAZ, отобранных для оптимального распознавания в момент времени t_1 ;
- $B_{t_1} \subset G$ и $H_{t_1} \subset G$ – подмножества объектов $g \in G$, классифицированные как высоко- и низкосейсмичные, соответственно, т.е. объекты $g \in B_{t_1}$ находятся достаточно близко, а объекты $g \in H_{t_1}$ – достаточно далеко от известных и потенциальных мест возникновения сильных землетрясений, $B_{t_1} \cup H_{t_1} = G$, $B_{t_1} \cap H_{t_1} = \emptyset$.

Пусть B_{0,t_1} – множество эпицентров сильных землетрясений, произошедших к моменту времени t_1 . Очевидно, что FCAZ-распознавание в момент t_1 тем лучше, чем больше значение меры включения эпицентров B_{0,t_1} в подмножество высокосейсмичных объектов B_{t_1} :

$$\mu(B_{0,t_1} \subset B_{t_1}) = |B_{0,t_1} \cap B_{t_1}| / |B_{0,t_1}|. \quad (20)$$

Качество рассмотренной выше задачи FCAZ-распознавания определяется тем, что результаты будущих (после появления со временем новых объектов) разложений $FCAZ_{\gamma}(W_t): G = B_t \sqcup H_t$ стремятся к пределу, характеризующемуся условием:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(B_{0,t} \subset B_t) \rightarrow 1. \quad (21)$$

Пусть к наступлению момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$ произошло еще Z_{t_1,t_2} сильных землетрясений, $B_{0,t_2} = B_{0,t_1} \cup Z_{t_1,t_2}$, то есть общее их количество стало $|B_{0,t_2}| = |B_{0,t_1} \cup Z_{t_1,t_2}|$. При этом общее количество произошедших землетрясений с $M \geq M_R$ – объектов распознавания, увеличилось на Z_{t_1,t_2} и их количество стало $n_{t_2} = n_{t_1} + z_{t_1,t_2}$. Обозначим новое множество объектов $W_{t_2} = \{w\}$. В этой новой ситуации в момент времени $t_1 + \Delta t$ мы обладаем важной дополнительной информацией, которая не была нам доступна в момент t_1 . Соответственно, требуется провести FCAZ-распознавание уже на базе W_{t_2} – получить разложение $FCAZ_{\gamma_2}(W_{t_2}): G = B_{t_2} \sqcup H_{t_2}$ (рис. 13).

FCAZ-распознавание определяется выбором свободных параметров $\gamma = \{\delta, C, \omega, v, q, \beta\}$. Параметры алгоритма E²XТ, как и сам его результат, напрямую зависят от распознанных DPS-кластеров. В свою очередь β в DPS есть уровень максимальности плотности DPS-кластеров, зависящий от пространственного расположения объектов. В силу произошедших за время $\Delta t = t_2 - t_1$ землетрясений с $M \geq M_R$ пространственное распределение объектов $w \in W_{t_2}$ будет отличаться от распределения объектов $w \in W_{t_1}$. По этой причине выбор значений

$\gamma_2 = \{\delta, C, \omega, v, q, \beta\}$ для $FCAZ_{\gamma_2}(W_{t_2}): G = B_{t_2} \amalg H_{t_2}$ должен осуществляться упомянутыми выше блоками искусственного интеллекта (см. Главу 3). Эти блоки обеспечивают выбор оптимальных значений входных параметров с учетом пространственного распределения объектов распознавания в заданный момент времени.

Очевидно, что пространственное распределение множества объектов W_{t_2} может настолько кардинально отличаться от пространственного распределения W_{t_1} , что B_{t_1} не будет собственным подмножеством B_{t_2} . Другими словами, предел (21) может быть не достигнут. Для недопущения такой ситуации и создания последовательного монотонного возрастания FCAZ-зон в качестве высокосейсмичных зон, распознанных в момент t_2 , следует брать объединение зон B_{t_1} и B_{t_2} , т.е. $B_{t_2} = B_{t_2} \cup B_{t_1}$.

FCAZ-распознавание в последующие моменты времени $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 3, 4, \dots$ строится аналогичным образом, следуя процессу индукции.

Исходя из FCAZ-результатов, полученных в диссертации, возьмем, для любого из изученных регионов, в качестве t_1 момент времени, в который выполнялись контрольные эксперименты (например, «полная сейсмическая история»). В качестве t_2 рассмотрим момент, для которого получен основной результат FCAZ-распознавания (Главы 4 – 5). Тогда из сравнений в моменты t_1 и t_2 множеств объектов распознавания и FCAZ-зон можно заключить, что для всех рассмотренных в диссертации регионов за промежутки времени $\Delta t = t_2 - t_1$ множества объектов $w \in W$ не претерпели кардинальных изменений. Таким образом, при таких зафиксированных t_1 и t_2 в момент времени t_2 еще не наступило время для выполнения нового FCAZ-распознавания с учетом вновь поступивших исходных данных. В этой ситуации чистый экзамен и вычислительные контрольные эксперименты (см. Главы 4 – 6) приобретают особо важное значение.

Аналогично не наступило время и для нового FCAZ-распознавания, если в качестве t_1 взять моменты, для которых получены основные результаты FCAZ-распознаваний (Главы 4 – 5), а в качестве t_2 взять, например, 2020 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных ($c M \geq M_0$) землетрясений [Гвишиани и др., 1988; 2020; Соловьев и др., 2014; Gorshkov et al., 2003] в диссертации изучается двумя методами, созданными автором. Их фундаментальное различие заключается в выборе объектов распознавания.

В первом методе [Дзобоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019] объектами являются пересечения осей линеаментов, построенных по формализованной методике морфоструктурного районирования (МСР) [Алексеевская и др., 1977; Гвишиани и др., 1988]. Во втором методе объектами служат эпицентры всех землетрясений, удовлетворяющих условию $M \geq M_R$, где порог M_R существенно меньше, чем порог магнитуды распознаваемых мест землетрясений M_0 [Гвишиани и др., 2013; 2016; Дзобоев и др., 2018].

Методы отличаются также наборами характеристик описания объектов и используемыми алгоритмами распознавания образов. В первом случае – это геолого-геофизические и геоморфологические характеристики и оригинальный алгоритм «Барьер-3» [Дзобоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019]. Во втором – характеристики эпицентров слабых землетрясений и системно-аналитическая процедура объективного распознавания плотных сгущений FCAZ [Гвишиани и др., 2013; 2016; Дзобоев и др., 2018].

Несмотря на принципиальные различия этих двух оригинальных методов их результаты распознавания хорошо согласуются в регионах Алтай-Саяны-Прибайкалье и на Кавказе. Территории, отнесенные к высокосейсмичным обоими методами, следует рассматривать как наиболее опасные, так как они распознаны таковыми независимыми методами на базе различных объектов распознавания и их характеристик.

Первый из указанных методов [Гвишиани и др., 2017; Дзобоев и др., 2019; Dzeboev et al., 2019] позволяет, с точки зрения динамического системного анализа, многократно решать задачу классификации пересечений линеаментов на высоко- и низкосейсмичные. Основывается это на том, что обучение, каждый раз, проводится только по одному высокосейсмичному классу, который легко формируется с учетом произошедших новых сильных землетрясений (Глава 2). Это, в свою очередь, вносит существенный вклад и в развитие классического подхода ЕРА к распознаванию высокосейсмичных зон [Гвишиани и др., 2020].

Ранее оставалось проблемой определение обучающей выборки объектов, в окрестности которых сильные землетрясения произойти не могут. В диссертационной работе эта проблема решается путем разработки оригинального метода распознавания образов «Барьер-3» [Дзобоев и др., 2019].

Этот алгоритм позволяет классифицировать объекты на высоко- и низкосейсмичные на основе одного класса обучения. «Барьер-3», имея информацию об объектах, в окрестности которых известны эпицентры землетрясений с $M \geq M_0$, позволяет найти множество, так сказать, «похожих» на них объектов.

Распознавание мест возможного возникновения землетрясений первым из разработанных в диссертации методов базируется на гипотезе о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейментов, нашедшей свое подтверждение в [Гвишиани, Соловьев, 1980]. Таким образом, построение схемы МСР [Алексеевская и др., 1977] является важным этапом первого метода исследования проблемы. При этом несмотря на проведенную еще в 1977 году группой математиков под руководством И.М. Гельфанда логическую формализацию, процесс МСР остается неоднозначным. В связи с этим стоял вопрос: «А можно ли провести распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений без построения схемы МСР?» [Гвишиани и др., 2013]. В диссертации дается положительный ответ на этот вопрос на основе использования системно-аналитического метода FCAZ (рис. 6).

Применение в работе алгоритмов дискретного математического анализа, использующих в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений, обосновывает этот положительный ответ. Таким образом, системный FCAZ-подход (Главы 3 – 6) является принципиально новым шагом в исследовании проблемы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

Процесс распознавания зон повышенной сейсмической опасности в тектонически активных регионах представляет собой сложную систему. Состояние системы зависит как от пространственных координат объектов распознавания, так и от времени. В этой связи в диссертационной работе FCAZ-распознавание рассмотрено с точки зрения системного анализа (Глава 7). Построена системно-математическая модель FCAZ-распознавания как сложной динамической системы. Пространственно-временная модель $T(i) \times \text{FCAZ}$ распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений позволяет создать временной план дальнейших итераций по распознаванию зон повышенной сейсмической опасности для изученных в диссертации регионов.

Методами «Барьер-3» и FCAZ в диссертации изучены следующие регионы с различным уровнем сейсмичности:

- «Барьер-3» – регион Алтай-Саяны-Прибайкалье ($M \geq 6.0$) и Кавказ ($M \geq 6.0$).
- FCAZ – горный пояс Анд Южной Америки ($M \geq 7.75$), Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка ($M \geq 7.75$) и Курильских островов ($M \geq 7.75$); Калифорния ($M \geq 6.5$); регион Прибайкалье-Забайкалье ($M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$); регион Алтай-Саяны ($M \geq 5.5$); Кавказ ($M \geq 5.0$); Крымский полуостров и северо-запад Кавказа ($M \geq 4.5$, $M \geq 5.0$).

Отметим, что регионы Алтай-Саяны-Прибайкалье, Тихоокеанское побережье Курильских островов и Крымский полуостров впервые изучены с применением методов распознавания мест возможного возникновения землетрясений. Более того, на примере региона Прибайкалье-Забайкалье впервые выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений для конечной последовательности возрастающих магнитудных порогов $M_0^1 < M_0^2 < M_0^3$. Совместное представление результатов распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» на Кавказе на основе их композиции с нечетким множеством позволило вдвое уменьшить количество «пропусков цели».

На примере Калифорнии и Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка показано, что наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты FCAZ-распознавания. Совокупность проведенных в диссертационной работе контрольных экспериментов демонстрирует достоверность и воспроизводимость интерпретации FCAZ-зон как мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

В изученных регионах FCAZ-зоны занимают сравнительно небольшую площадь по сравнению с полем общей сейсмичности – 30% – 40% от площади всей сейсмичности и 50% – 65% от площади, где происходят землетрясения с $M \geq M_R$. Это иллюстрирует пространственную нетривиальность полученных в диссертации результатов.

Результаты диссертации показывают и то, что слабая сейсмичность на самом деле может «проявлять» свойства геофизических полей, которые в классическом подходе ЕРА используются непосредственно в виде характеристик объектов распознавания.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *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. Is. 1. P. 1–10. DOI: 10.30638/eemj.2013.001.
2. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзебоев Б.А.* Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // *Геоинформатика*. 2013. № 2. С. 44–57.
3. *Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Агаян С.М.* О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 3–19. DOI: 10.7868/S0002333713060045.
4. *Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А.* Оценка сейсмической опасности при выборе мест захоронения радиоактивных отходов // *Горный журнал*. 2015. № 10. С. 39–43. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.07.
5. *Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Агаян С.М.* Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // *Физика Земли*. 2016. № 4. С. 3–23. DOI: 10.7868/S0002333716040013.
6. *Дзебоев Б.А.* О новом подходе к мониторингу сейсмической активности (на примере Калифорнии) // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 473. № 2. С. 210–213. DOI: 10.7868/S0869565217080163.
7. *Гвишиани А.Д., Дзебоев 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*. 2017. № 3. С. 33–42. DOI: 10.7868/S0002333717030036.
8. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О.* Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92. DOI: 10.7868/S0869565217130175.
9. *Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Вавилин Е.В.* Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье-Забайкалье // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 477. № 6. С. 704–710. DOI: 10.7868/S0869565217360178.
10. *Дзебоев Б.А., Агаян С.М., Жарких Ю.И., Красноперов Р.И., Барыкина Ю.В.* Зоны

возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли. 2018. № 2. С. 96–103. DOI: 10.7868/S0002333718020084.

11. *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.
12. *Dzeboev B.A., Krasnoperov R.I.* On the monitoring of seismic activity using the algorithms of discrete mathematical analysis // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2018. Vol. 18. ES3003. DOI: 10.2205/2018ES000623.
13. *Дзобоев Б.А., Красноперов Р.И., Белов И.О., Барыкина Ю.В., Вавилин Е.В.* Модифицированная алгоритмическая система FCAZm и зоны возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2018. № 2. С. 2–8.
14. *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. DOI: 10.31857/S0002-33372019433-47.
15. *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 Journal of Earth Sciences (RJES). 2019. Vol. 19. ES6005. DOI: 10.2205/2019ES000691.
16. *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. DOI: 10.31857/S0002333720010044.
17. *Dzeboev B.A., Karapetyan J.K., Aronov G.A., Dzeranov B.V., Kudin D.V., Karapetyan R.K., Vavilin E.V.* FCAZ-recognition based on declustered earthquake catalogs // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2020. Vol. 20. ES6010. DOI: 10.2205/2020ES000754.
18. *Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М., Белов И.О., Николова Ю.И.* Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линейментов на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Вулканология и Сейсмология. 2021. № 2. С. 3–10. DOI: 10.31857/S0203030621020036.

Публикации в других изданиях:

1. *Gvishiani A., Dzeboev B., Nekhoroshev S.* Recognition of Earthquake-Prone Areas for Seismic Hazard Evaluation // In: *Yokomatsu M., Hochrainer-Stigler S.* (Eds.) Disaster Risk Reduction and Resilience. Disaster and Risk Research: GADRI Book Series. 2020. Springer, Singapore. P. 9–24. DOI: 10.1007/978-981-15-4320-3_2.

Зарегистрированные программы для ЭВМ и Базы Данных:

1. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н., Дзебоев Б.А.* DPS (Discrete Perfect Sets). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662959 от 08 декабря 2015 г.
2. *Дзебоев Б.А.* SARD (Seismic Activity monitoring by Discrete mathematical analysis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661961 от 25 октября 2017 г.
3. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Дзебоев Б.А.* A-DPS (Adaptive Discrete Perfect Set). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662818 от 17 ноября 2017 г.
4. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А.* FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662380 от 05 октября 2018 г.
5. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А.* FCAZm (Formalized Clustering And Zoning modified). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662143 от 27 сентября 2018 г.
6. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О.* SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662386 от 05 октября 2018 г.
7. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О.* Барьер. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662385 от 05 октября 2018 г.
8. *Николова Ю.И., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Дзебоев Б.А.* Веб-ориентированная геоинформационная система многокритериальной оценки сейсмической опасности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619516 от 18 июля 2019 г.
9. *Соловьев Ан.Ал., Соловьев Ал.Ан., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзебоев Б.А., Николов Б.П.* Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в

среде ArcGIS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619517 от 18 июля 2019 г.

10. *Соловьев Ан.Ал., Соловьев Ал.Ан., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзедоев Б.А., Николов Б.П.* ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки сейсмической опасности. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621466 от 16 августа 2019 г.
11. *Дзедоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М.* Барьер-3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661165 от 21 августа 2019 г.

Подписано в печать 20.02.2021 г.
Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.
Тираж 150 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242 г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.
Тел. / факс: (499) 254-90-88. E-mail: serg@tigra-press.ru