

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи



Дзэбоев Борис Аркадьевич

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

Специальность 25.00.10 — Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
академик РАН А.Д. Гвишиани

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОБЗОР	18
1.1. Метод ERA	21
1.1.1. Морфоструктурное районирование	23
1.1.2. Приуроченность эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов	27
1.1.3. Векторные объекты распознавания в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических данных	28
1.1.4. Семейство алгоритмов «Голосование по Набору Признаков».....	30
1.1.5. Алгоритмы распознавания образов, используемые в ERA	31
1.1.6. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений.....	35
1.2. Оценка достоверности результатов распознавания	53
1.2.1. Динамические и предельные задачи распознавания	54
1.2.2. Контрольные эксперименты	56
1.3. Обсуждение.....	58
1.4. Выводы.....	63
ГЛАВА 2. ВАРИАТИВНЫЙ МЕТОД ERA	64
2.1. Алгоритм «Барьер»	64
2.2. Алгоритм «Барьер-3»	69
2.3. Исходные данные	70
2.4. Информативность характеристик объектов распознавания...	72

2.5. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье.....	73
2.5.1. Регион.....	73
2.5.2. Исходные данные.....	74
2.5.3. Распознавание алгоритмом «Барьер-3».....	80
2.5.4. Сравнение классификаций, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3»	83
2.6. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе	91
2.6.1. Регион.....	91
2.6.2. Исходные данные.....	96
2.6.3. Распознавание алгоритмом «Барьер-3».....	103
2.6.4. Сравнение классификаций, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3»	106
2.7. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений линеаментов	112
2.8. Обсуждение.....	117
2.9. Выводы.....	122
ГЛАВА 3. РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА БАЗЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛОТНЫХ СГУЩЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ..	123
3.1. Общая постановка задачи и метод исследования.....	123
3.2. Элементы системного анализа в проблеме распознавания высокосейсмичных зон	127
3.3. Система распознавания образов FCAZ.....	129
3.3.1. Алгоритм DPS.....	131

3.3.2. Алгоритм E^2XT	133
3.3.3. Элементы искусственного интеллекта для автоматизации FCAZ. Версия системы FCAZm.....	135
3.3.4. Последовательное распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений для нескольких пороговых магнитуд	139
3.4. Обсуждение.....	143
3.5. Выводы.....	145
ГЛАВА 4. FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	146
4.1. Горный пояс Анд Южной Америки.....	146
4.1.1. Объекты распознавания.....	147
4.1.2. FCAZ-зоны	151
4.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка	156
4.2.1. Объекты распознавания.....	156
4.2.2. FCAZ-зоны	158
4.3. Тихоокеанское побережье Курильских островов.....	162
4.3.1. Объекты распознавания.....	162
4.3.2. FCAZ-зоны	164
4.4. Обсуждение.....	166
4.5. Выводы.....	168
ГЛАВА 5. FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ И ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ОДНОЙ И НЕСКОЛЬКИХ ПОРОГОВЫХ МАГНИТУД.....	169
5.1. Калифорния. $M \geq 6.5$	169

5.1.1. Объекты распознавания.....	170
5.1.2. FCAZ-зоны	173
5.2. Алтай-Саяны. $M \geq 5.5$	176
5.2.1. Объекты распознавания.....	179
5.2.2. FCAZ-зоны	182
5.3. Кавказ. $M \geq 5.0$	187
5.3.1. Объекты распознавания.....	187
5.3.2. FCAZ-зоны	191
5.4. Крым и северо-запад Кавказа. $M \geq 4.5$	194
5.4.1. Объекты распознавания.....	198
5.4.2. FCAZ-зоны	200
5.5. Прибайкалье-Забайкалье. Последовательное распознавание: $M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$	203
5.5.1. Объекты распознавания.....	205
5.5.2. FCAZ-зоны. $M \geq 5.5$	205
5.5.3. FCAZ-зоны. $M \geq 5.75$	208
5.5.4. FCAZ-зоны. $M \geq 6.0$	210
5.6. Обсуждение.....	211
5.7. Выводы.....	213
ГЛАВА 6. ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЯ	215
6.1. Контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история»	215
6.1.1. Горный пояс Анд Южной Америки.....	216
6.1.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка	222

6.1.3. Калифорния	224
6.1.4. Кавказ	229
6.2. Сопоставление с результатами распознавая методом ERA ...	233
6.2.1. Горный пояс Анд Южной Америки.....	233
6.2.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка	238
6.2.3. Калифорния	240
6.2.4. Кавказ	243
6.3. FSAZ-распознавание на базе декластеризованного каталога землетрясений.....	245
6.3.1. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка	245
6.3.2. Калифорния	250
6.4. Обсуждение.....	255
6.5. Выводы.....	257
ГЛАВА 7. FSAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ КАК ПРОБЛЕМА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	259
7.1. Системно-математическая модель FSAZ-распознавания	259
7.2. Выводы.....	263
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	265
ЛИТЕРАТУРА	269

ВВЕДЕНИЕ

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 $M \geq M_0$), как правило, возникают не на всей территории региона, подверженного сейсмическим воздействиям [54]. 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 [71].

Имеющиеся на сегодняшний день методы распознавания высокосейсмичных зон не позволяют многократно корректировать их результаты с течением времени в силу неизменности используемого множества объектов распознавания [90]. В диссертации создан новый системно-аналитический метод FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) к проблеме, который использует эпицентры слабых землетрясений (с $M \geq M_R$) в качестве объектов распознавания [126]. Это дает возможность развития результата распознавания зон повышенной сейсмической опасности вслед за появлением эпицентров новых землетрясений. Последнее делает FCAZ методом системного анализа [261, 327].

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 [90]. При этом, в частности, для классического метода определения мест возможного

возникновения сильных землетрясений ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [62, 90, 96, 97, 164 и др.] в диссертации создается новая схема распознавания высокосейсмичных дизъюнктивных узлов и пересечений линейментов с обучением лишь по одному высокосейсмичному классу [54, 127, 249].

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 ЕРА.

- 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» \leftrightarrow «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 целей 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 или является руководителем двух грантов РФФИ № 16-35-00603 «Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений» и № 20-35-70054 «Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности», гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-4555.2016.5 «Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа», ответственным исполнителем четырех грантов РФФИ № 15-17-30020 «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье», № 16-17-00093 «Создание информационной системы автоматической оценки сейсмической опасности после сильных землетрясений по данным геофизического мониторинга», № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов» и № 19-77-10075 «Системный анализ влияния

астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса».

Диссертационное исследование соответствует теме «Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных» государственного задания ФГБУН Геофизический центр Российской академии наук, руководителем которой является диссертант.

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. Кряжковского (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 (PCO-A, 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 ВНИИ 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 двух тематических сборниках, изданных издательством

Springer: «Disaster Risk Reduction and Resilience» книжной серии «Disaster and Risk Research: GADRI Book Series» и «Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere» книжной серии «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering».

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 ВНИЦ 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.М. 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.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОБЗОР

Задача оценки сейсмической опасности состоит в анализе и прогнозе параметров сейсмического воздействия от будущих сильных землетрясений. Первые методы поиска решений этой задачи были детерминистскими (Deterministic Seismic Hazard Analysis – DSHA) [290, 320]. В DSHA сейсмическая опасность оценивается для максимально возможной магнитуды землетрясения в каждой зоне возникновения сейсмических очагов по кратчайшему расстоянию. Недостаток DSHA заключается в том, что временными характеристиками (частотой возникновения землетрясений и связанной с ними неопределенностью) часто пренебрегают. Используется только один сценарий, описывающий максимально возможное землетрясение [178, 234, 278, 280, 290, 320].

В 70-х годах XX века началась разработка вероятностных карт сейсмической опасности в национальном [например, 173, 237, 317], региональном [например, 129, 143, 144, 172, 226] и городском (микрорайонирование) [например, 15, 120, 138, 139, 141, 142, 145] масштабах. В 90-х годах вероятностные методы стали преобладать над детерминистскими. В настоящее время существуют два основных направления в исследованиях по оценке сейсмической опасности – вероятностная (Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA) [243, 317] и недетерминистская (Neodeterministic Seismic Hazard Assessment – NDSHA) [294, 295].

В классическом подходе PSHA [243] определяется вероятность того, что в течение определенного периода времени будут превышены различные уровни сотрясаемости, вызванные землетрясениями. При этом сотрясаемость (повторяемость сотрясений) определяется как средняя частота повторения сейсмических воздействий заданной интенсивности на рассматриваемой

территории [193, 194, 204].

Основными элементами PSHA являются:

- сейсмогенные зоны, для которых сейсмический процесс часто предполагается однородным;
- характеристики повторяемости связанного с сейсмогенными зонами процесса возникновения землетрясений, который предполагается пуассоновским;
- законы затухания, которые позволяют оценить вероятностные параметры сотрясаемости на различных расстояниях от эпицентров землетрясений.

Аппроксимация этих элементов достигается путем вычисления вероятности возникновения землетрясений с определенным потенциалом разрушения и определения условной вероятности того, что данный уровень сотрясаемости будет превышен для каждого из воздействующих на рассматриваемую территорию землетрясений. Подход PSHA направлен на определение статистических характеристик сотрясаемости рассматриваемой территории. При этом для большинства характеристик имеющиеся данные не достаточны для проверки предположений об ограничениях на параметры статистической модели [161, 232, 236, 238, 241, 285, 293, 320].

Возможной альтернативой PSHA являются методы NDSHA [294, 295]. Последнее направление позволяет дать детерминистское описание сейсмического движения грунта, вызванного землетрясением с заданными эпицентральной / гипоцентральной расстоянием и магнитудой. Такие методы базируются на моделировании на основе детального знания очага землетрясения [17, 19, 250, 283, 303] и сценария распространения от него сейсмических волн [298].

Это делает возможным определение набора сценариев землетрясений и моделирование на их основе синтетических сейсмических сигналов, не дожидаясь появления реального сильного землетрясения. Такие синтетические сейсмограммы могут быть эффективно построены [282, 297]

для моделирования сотрясения в исследуемых районах на основе знания физических процессов генерации землетрясений и распространения волн в реалистичной трехмерной среде.

Беря за основу имеющуюся информацию о строении и структуре Земли (механические свойства), очагах землетрясений и уровне сейсмичности исследуемой области, оцениваются пиковые ускорения смещений, пиковые значения скоростей, пиковые значения смещений и многие другие параметры.

Одним из ключевых условий успешного применения NDSHA является наличие адекватной информации о возможных местах сильных землетрясений в исследуемом регионе. Гибкость NDSHA позволяет успешно инкорпорировать дополнительную информацию о возможных местах сильных землетрясений, полученную с помощью независимых методов и расчетов. Это сокращает существующие пробелы в знаниях о сейсмичности, получаемых из каталогов землетрясений.

В работах [300, 305] продемонстрировано, что использование в NDSHA дополнительных знаний о местах возможного возникновения сильных землетрясений, полученных путем применения методов распознавания образов к данным о морфоструктурном строении региона [62, 90, 164, 206], позволяет создавать эффективные превентивные карты сейсмической опасности.

Анализ морфоструктурных данных на базе распознавания образов позволяет получить количественные и качественные критерии для определения областей, подверженных сильным землетрясениям [305]. Развитию идейной, системно-математической и вычислительной базы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений посвящена диссертационная работа.

1.1. Метод ЕРА

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 [90].

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. [97, 251]. Разработанный ими подход в последующем получил название ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [62, 206]. Отметим, что в ЕРА, как правило, рассматриваются коровые землетрясения, но имеются примеры успешного применения метода и в случае глубоких землетрясений [90].

За прошедшие с момента его создания почти 50 лет метод ЕРА был применен для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в ряде горных стран мира. Апостериорные оценки достоверности результатов распознавания, полученные на базе анализа расположения эпицентров сильных землетрясений, которые произошли в рассмотренных регионах после получения для них этих результатов, стали подтверждением эффективности использования распознавания образов для выделения потенциально высокосейсмичных территорий [206].

Метод ЕРА получил развитие в фундаментальных работах академиков АН СССР И.М. Гельфанда и В.И. Кейлис-Борока [14, 57, 93, 97, 155, 231, 251 и др.], академика РАН А.Д. Гвишиани [58, 62, 78, 79, 84, 206, 267 и др.], чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьева [62, 112, 164, 206, 207, 253 и др.], 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.м. Е.Я. Ранцман, д.ф.-м.н. И.М. Ротвайн [57, 62, 65, 85, 95, 158, 160, 164,

190, 207, 253, 254 и др.] и др. Активное участие в развитии ЕРА приняли крупные иностранные геофизики, сейсмологи, геологи и математики: члены национальной академии наук США Ф. Пресс и Л. Кнопов [98, 252 и др.], французские ученые, профессора А. Систернас, Ж. Боннин, Э. Филип, К. Вебер и Ж. Саллантен [35, 36, 38, 61, 62, 86 и др.], члены национальной академии наук Италии М. Капуто и Дж. Панца [108, 240, 256, 258 и др.] и другие. Метод ЕРА создавался и совершенствовался в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, Объединенном институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (в настоящее время – Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН) [90].

В классической постановке Гельфанда – Кейлис-Борока задача ЕРА формулируется следующим образом. Определить в рассматриваемом сейсмоактивном регионе места возможного возникновения сильных (с магнитудой $M \geq M_0$, где M_0 – заданный порог) землетрясений. Причем поиск таких мест осуществляется среди выделенных в регионе объектов распознавания, в качестве которых рассматриваются морфоструктурные узлы или пересечения морфоструктурных линеаментов, полученные в результате морфоструктурного районирования региона. Множество объектов распознавания W необходимо разделить на два непересекающихся класса: 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, использующий определенную на основе информации о сейсмичности региона обучающую выборку W_0 , состоящую из двух непересекающихся подмножеств: B_0 , содержащего объекты, априорно 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 [90].

Как показала, выполненная в 2014 г. [206], апостериорная независимая проверка 87% эпицентров сильных ($M \geq M_0$) землетрясений возникших в исследованных методом ЕРА регионах после публикации соответствующих работ, произошли в местах распознанных как потенциально высокосейсмичные. При этом, 30% из них произошли в распознанных высокосейсмичных зонах, в которых ранее не были зафиксированы сильные сейсмические события.

1.1.1. Морфоструктурное районирование

В качестве объектов распознавания в методе ЕРА [96, 97] было предложено использовать морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов. Последние выделяются в рамках морфоструктурного районирования (МСР) территории. Авторство этого метода принадлежит видному геоморфологу Елизавете Яковлевне Ранцман [190, 191]. В сотрудничестве с математиками удалось превратить МСР в метод системного анализа, формализовав его приложение к конкретному региону и обеспечив воспроизводимость результатов [14, 39, 40, 107, 231].

Суть МСР состоит в разделении рассматриваемой территории на систему иерархически упорядоченных районов, обладающих определенной степенью однородности морфоструктур. МСР, как и любое районирование, подразумевает объединение объектов, обладающих схожими признаками и их численными показателями, и их отделение от объектов, характеризующихся иными признаками или их показателями [14, 231]. Под понятием «морфоструктура», введенным в геоморфологию академиком АН СССР И.П. Герасимовым [99, 190], понимается совокупность проявлений в рельефе тектонических движений земной коры (в том числе хребты, котловины и др.) [14, 231].

В ходе проведения МСР выделяются морфоструктуры трех рангов [62,

190, 191]:

- горная страна (I-й ранг) – территория с единым типом процесса горообразования и определенным обликом рельефа; соседние территории обладают или другим типом горообразования, или другим обликом рельефа (при том же типе горообразования);

- горные страны подразделяются на мегаблоки (II-й ранг) – области, в пределах которых все численные показатели изменяются закономерно, а при переходе через границу закономерность нарушается;

- мегаблоки подразделяются на блоки (III-й ранг) – области, в пределах которых все численные показатели изменяются без резких скачков, а при переходе за границы области происходит резкое значительное изменение хотя бы одного из численных показателей.

Морфоструктурными линеаментами объявляются линейные зоны, разграничивающие горные страны, мегаблоки и блоки. Линеаментам присваивается ранг равный наивысшему рангу разделяемых им морфоструктур [14, 231]:

- линеаменты I-го ранга – границы горных стран;
- линеаменты II-го ранга – границы мегаблоков;
- линеаменты III-го ранга – границы блоков.

Линеаменты подразделяются на продольные, поперечные и главные сдвиги [14, 231]:

- продольный линеамент – параллелен основному простиранию крупных элементов рельефа, в его зоне выражены вертикальные движения, все продольные линеаменты следуют вдоль границ крупных элементов рельефа;

- поперечный линеамент – ориентирован косо или вкрест основному простиранию крупных элементов рельефа, характер тектонических движений в его зоне трудно устанавливаем, все поперечные линеаменты выражены прерывистыми формами;

- главный сдвиг – ориентирован косо относительно крупных элементов

рельефа, но представляет собой зоны крупных разломов, в которых происходят крупномасштабные горизонтальные перемещения (выделяется только в случае, когда горизонтальные тектонические движения создают самостоятельные крупные элементы рельефа).

Морфоструктурным узлом называется область, возникшая вследствие пересечения или причленения двух или более линеаментов (как правило, продольных и поперечных линеаментов). В узлах формируется мелкоблоковая структура, отраженная на дневной поверхности мозаичным сочетанием различных ландшафтов, почвенного покрова, горных пород и др. [191]. Установление точных границ узлов является трудоемкой процедурой, реализуемой исключительно с использованием данных, являющихся результатом специальных полевых исследований.

В случае отсутствия таких данных в качестве узлов берутся некоторые окрестности пересечений линеаментов. Как правило, в качестве таких окрестностей рассматриваются круги с центрами в точке пересечения осей морфоструктурных линеаментов [14, 231]. При решении задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясений выбор радиуса таких кругов (окрестностей пересечений линеаментов) зависит от пороговой магнитуды M_0 распознаваемых землетрясений.

Развитие метода морфоструктурного районирования проходило в несколько этапов. Первоначально (70-е годы XX века) работы по МСР проводились исключительно в интересах метода ЕРА. Аргументом в пользу использования данных о рельефе при распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений является предположение о непосредственной связи расположения крупных элементов рельефа с горообразовательными тектоническими движениями, захватывающими глубины, на которых формируются очаги коровых землетрясений [62].

На втором этапе (80-е годы) схемы МСР также использовались для распознавания мест крупных залежей углеводородов. На третьем этапе (90-е годы) было установлено, что районы пересечений линеаментов

характеризуются повышенным числом аварийных событий [191].

Для построения схем МСР используются данные о рельефе, геологии, структуре и глубинном строении изучаемого региона, а также результаты дешифрирования космоснимков Земли. Принципы и методика морфоструктурного районирования подробно изложены в [14, 40, 62, 100, 190, 191, 231].

На рис. 1.1 показана схема МСР горной части полуострова Крым [112]. Многочисленные другие примеры МСР сейсмоопасных регионов будут показаны в следующих разделах диссертации.

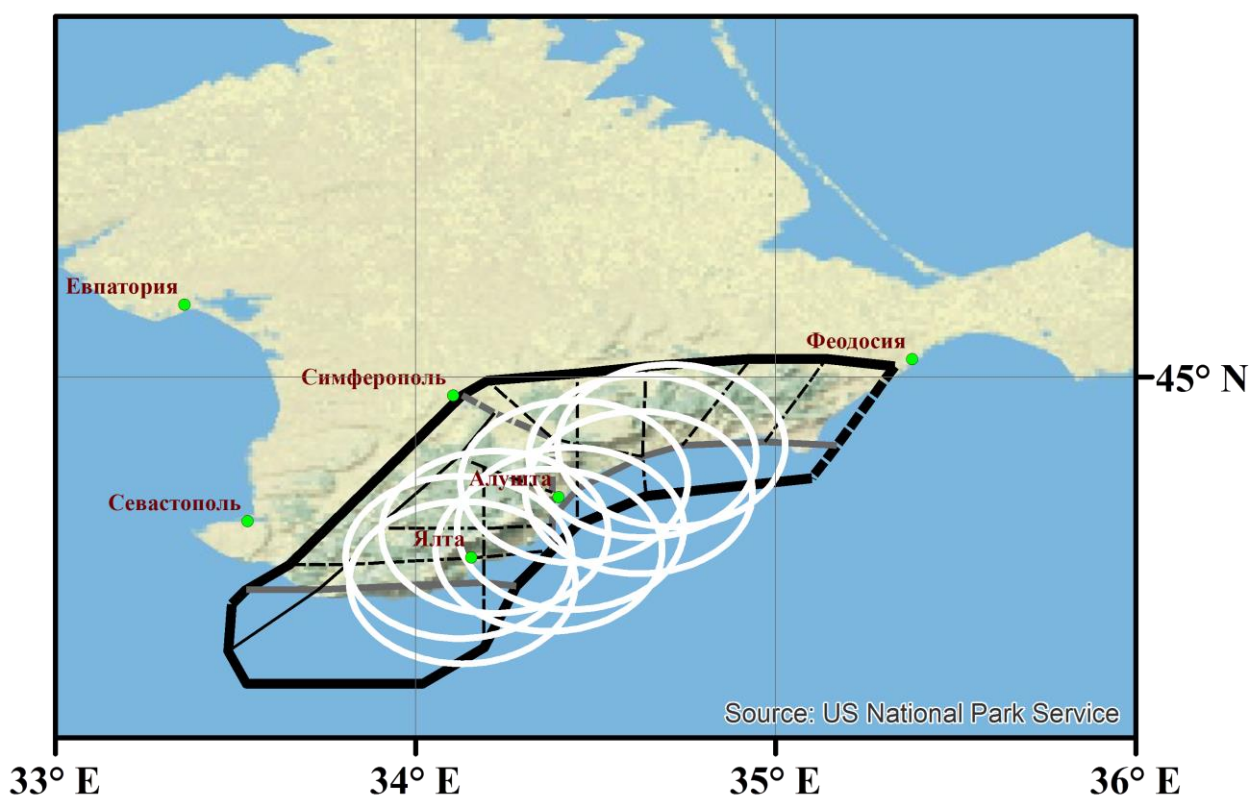


Рис. 1.1. Схема морфоструктурного районирования горной части полуострова Крым (толстые черные линии – линеаменты I-го ранга, средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга; сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные) и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (белые эллипсы) [112]

1.1.2. Приуроченность эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейментов

Подход ERA базируется на гипотезе о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейментов [96, 164]. При этом под приуроченностью понимаются достаточно малые расстояния между эпицентрами и пересечениями. Такая приуроченность выглядит вполне очевидной, когда эпицентры всех сильных землетрясений в регионе расположены внутри кругов некоторого радиуса с центрами в точках пересечений линейментов, а площадь, покрытая этими кругами является достаточно малой по сравнению с площадью всего изучаемого региона [62]. Так, например, приуроченность визуально очевидна в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье [113, 127]. В тоже время морфоструктурная сеть может быть настолько густой (например, Кавказ [207]), что объединение кругов, содержащих эпицентры сильных землетрясений, покрывает почти весь регион. Для проверки статистической значимости гипотезы о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям линейментов был разработан специальный алгоритм [89], впервые примененный для сравнительного анализа положений эпицентров сильных землетрясений и пересечений линейментов на территории Южной Америки.

Алгоритм заключается в следующем. Пусть N – число сильных землетрясений в регионе, $N(\rho)$ – процент эпицентров, расстояние от которых до ближайшего пересечения не превосходит ρ , ξ_i – случайные точки (пересечения), сгенерированные внутри кругов с центрами в N пересечениях, $N_\xi(\rho)$ – процент эпицентров, расстояние от которых до ближайшей точки ξ_i не превосходит ρ . Если найдется интервал значений ρ , на котором функция $N(\rho)$ статистически значимо превосходит математическое ожидание функции $N_\xi(\rho)$, то можно говорить, что эпицентры сильных землетрясений приурочены к пересечениям морфоструктурных линейментов [62]. Подробное описание алгоритма дано в [89].

1.1.3. Векторные объекты распознавания в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических данных

Алгоритмы распознавания образов, используемые в ЕРА [62, 104, 253], представляет собой дихотомию с обучением [29]. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений выполняется на базе векторного представления объектов распознавания в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических характеристик.

Выделенные в рамках МСР объекты распознавания описываются единым набором характеристик. Эти характеристики должны быть априорно связаны с принципиальной возможностью отражать специфику мест высокой сейсмичности. Для каждого региона подбираются и измеряются соответствующие наборы характеристик, которые также будем называть параметрами [55, 263]. Как правило, используемые характеристики отражают степень тектонической активности в окрестностях объектов распознавания. За годы развития ЕРА сформировался достаточно устойчивый список характеристик, используемых для распознавания в различных сейсмоактивных регионах [127]. Все характеристики можно условно разбить на три группы [62] (полный актуальный список характеристик будет приведен в п. 2.3 Главы 2):

- характеристики, описывающие контрастность и интенсивность тектонических движений – параметры, связанные с высотами рельефа, сочетаниями типов рельефа, площадью рыхлых толщ;
- характеристики, описывающие степень тектонической раздробленности – параметры, описывающие линеаментную структуру в окрестности объектов распознавания;
- характеристики, описывающие глубинную неоднородность – гравитационные и геомагнитные параметры.

Отметим, что идея использовать геомагнитные параметры в методе ЕРА принадлежит академику РАН А.Д. Гвишиани, а эффективность

использования литосферных магнитных аномалий впервые была показана в работе [207].

В окрестностях объектов распознавания измеряются значения используемых характеристик. Необходимо отметить, что в случае морфоструктурных узлов под окрестностью понимается область, ограниченная его границами, а в случае пересечений осей морфоструктурных линеаментов – область, ограниченная кругом заданного радиуса с центром в точке пересечения линеаментов. Очевидно, что узлы могут иметь различные размеры окрестностей и площадь окрестности может использоваться в качестве одной из характеристик.

После вычисления значений характеристик каждому объекту распознавания ставится в соответствие вектор с действительными компонентами, элементами которого являются значения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик, описывающих объект [90].

Алгоритмы дихотомии, реализующие блок распознавания в методе ЕРА, оперируют объектами, представленными векторами с двоичными компонентами. Преобразование исходных векторов, описывающих объекты, в бинарные векторы выполняется с помощью процедур дискретизации и кодировки [62, 104, 253].

Основополагающей частью распознавания в методе ЕРА является формирование и выполнение обучения. Обучаясь на векторах сформированного материала обучения, алгоритм дихотомии находит их характерные признаки (B - и H -признаки). Затем, все множество объектов W экзаменуется на основе этих признаков. Задается значение порога голосования Δ , и объекты, у которых разность между числом B -признаков и числом H -признаков, которыми они обладают, не меньше, чем порог Δ , относятся к классу B [62, 104, 253].

Подчеркнем, что в ЕРА ставится не только задача распознать дизъюнктивные морфоструктурные узлы или пересечения осей

морфоструктурных линеаментов, в окрестностях которых возможно возникновение сильных землетрясений, но и задача получения геолого-геоморфологического описания таких мест, т.е. выявление критериев высокой сейсмичности для рассматриваемого региона. Как это делается – описано ниже.

1.1.4. Семейство алгоритмов «Голосование по Набору Признаков»

В начале 1980-х возможности блока распознавания метода ЕРА были существенно расширены благодаря исследованиям А.Д. Гвишиани и В.А. Гурвича. Ими было введено понятие алгоритма ГНП (Голосование по Набору Признаков) [64, 65, 66 и др.], определенного как строгая математическая конструкция. Класс алгоритмов ГНП включает в себя достаточно широкое семейство алгоритмов классификации с обучением. Для алгоритмов класса ГНП является возможным вывести условия, позволяющие аналитически контролировать достоверность результата в предельной задаче распознавания [90].

При этом для некоторого подкласса (ГНП с нормальными весами) выполнение этих условий допускает конструктивную проверку. Таким образом, алгоритмы класса ГНП естественно использовать как блок распознавания образов при решении предельных задач распознавания. В частности для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений [65], т.к. последняя является именно такой предельной задачей [66].

Для определения класса алгоритмов ГНП введем следующие обозначения:

- $w \in W$ – множество объектов распознавания;
- B_0 и H_0 – материалы обучения классов B и H , соответственно;
- Ω_n – множество бинарных векторов длины n ;

- $\Phi: W \rightarrow \Omega_n$ – заданное отображение (кодировка объектов).

Пусть некоторый признак r , характерный для класса B , есть подмножество в Ω_n . Рассмотрим набор признаков $U = \{r_1, \dots, r_N\}$ и будем считать, что объект w обладает признаком r , если $\Phi(w) \in r$. Пусть $\Phi^{-1}(r) \subseteq W$ – множество объектов, обладающих признаком r , а $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_N) = (\sigma(r_1, W_0), \dots, \sigma(r_N, W_0))$ – числовой вектор весов признаков зависящих от материала обучения $W_0 = B_0 \sqcup H_0$.

Алгоритмы класса ГНП решают вопрос отнесения объекта $w \in W$ к классу B или H путем голосования по набору признаков U . Результат голосования $F(w)$ определяется как сумма весов всех признаков, которыми обладает объект w и зависит от $\Phi(w)$: $F(w) = \sum_{r \in U: \Phi(w) \in r} \sigma(r, W_0)$. Пусть Δ некоторый порог голосования. Объект w относится к классу B , если $F(w) \geq \Delta$ и к классу H , если $F(w) < \Delta$. Тем самым, для задания конкретного алгоритма класса ГНП необходимо задать набор признаков U и вектор весов $\sigma = \sigma(W_0)$. В таком случае Δ будет единственным свободным параметром алгоритма [65].

1.1.5. Алгоритмы распознавания образов, используемые в ЕРА

Как правило, в ЕРА в качестве блока распознавания используются алгоритмы «Кора-3» [34, 62, 133, 253 и др.], «Подклассы» [98, 162, 252 и др.] и «Правило Хемминга» [65, 84, 160 и др.]. Как показано в [65] эти алгоритмы входят в класс алгоритмов ГНП.

Наиболее простым из перечисленных алгоритмов является «Правило Хемминга». Его применение состоит из двух этапов. На первом этапе строится ядро класса B . Оно представляет собой двоичный вектор, компоненты которого более «типичны» соответствующим компонентам

двоичных векторов из обучающей выборки B_0 , чем из обучающей выборки H_0 . На этом завершается обучение алгоритма. На втором этапе вычисляется расстояние Хемминга ρ от каждого двоичного вектора, соответствующего объекту распознавания, до ядра класса B . В итоге к классу B относят объекты, для которых $\rho \leq \Delta$ (Δ – заданный порог). Все остальные объекты относят к классу H [62, 80, 160]. По сути, порог Δ является единственным свободным параметром алгоритма [90].

Наиболее часто используемым в ЕРА алгоритмом по-прежнему является алгоритм «Кора-3» [29], созданный М.М. Бонгардом с соавторами для решения задач медицинской диагностики еще в 60-х годах прошлого века. Этот алгоритм нашел применение также и в других прикладных задачах (классификация водоносных и нефтеносных пластов, поиск нефтяных и урановых месторождений) [29, 30, 34, 65, 191].

Алгоритм «Кора-3» так же как и алгоритм «Правило Хемминга» состоит из двух этапов. На первом этапе из них выполняется обучение. На базе объектов входящих в обучающие выборки B_0 и H_0 формируются наборы признаков характерных для этих выборок. Признак A определяется с помощью 6-ти чисел: три целых числа j, k, l ($1 \leq j \leq k \leq l \leq L$, где L – длина бинарных векторов, описывающих объекты распознавания) и три бинарных числа $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, принимающих значения 0 или 1. По определению, объект (бинарный вектор) $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L)$ обладает признаком A , если значение булевой функции $f(A, \omega^i) = (\delta_1 \equiv \omega_j^i) \& (\delta_2 \equiv \omega_k^i) \& (\delta_3 \equiv \omega_l^i)$ равно 1.

Для определения характерных признаков задаются четыре порога S_1, C_1, S_2 и C_2 , которые являются параметрами алгоритма. Признак называется характерным признаком класса B , если число объектов из обучающей выборки B_0 , которые им обладают, не меньше чем порог S_1 , а число объектов из обучающей выборки H_0 , которые им обладают, не больше чем порог C_1 . Соответственно, признак называется характерным признаком класса H , если число объектов из обучающей выборки H_0 , которые им обладают, не меньше чем порог S_2 , а число объектов из обучающей выборки B_0 , которые им

обладают, не больше чем порог C_2 .

Для характерных признаков вводятся отношения подчиненности и эквивалентности. Характерный признак A является подчиненным по отношению к другому характерному признаку D того же класса, если все объекты из множества обучения этого класса, которые обладают признаком A , обладают также признаком D и есть хотя бы один объект из множества обучения, который обладает признаком D , но не обладает признаком A . Два характерных признака эквивалентны, если ими обладают одни и те же объекты соответствующего множества обучения. При формировании окончательных наборов характерных признаков классов B и H (B -признаков и H -признаков) алгоритм исключает подчиненные признаки, а из группы эквивалентных оставляет только один признак [90].

На втором этапе выполняется классификация всех объектов из множества W на основе B - и H -признаков с помощью еще одного параметра алгоритма – порога голосования Δ . Объект распознавания относится к классу B , если разность между количествами B -признаков и H -признаков, которыми он обладает, не меньше порога Δ . В результате множество W разделяется на два класса B и H .

Алгоритм «Подклассы» является предложенной Ш.А. Губерманом модификацией алгоритма «Кора-3» и позволяет проводить распознавание в случае, когда материал обучения B_0 разбит на подмножества («подклассы»). Впервые этот алгоритм применялся в исследованиях [98, 252] при распознавании высокосейсмичных зон в Калифорнии, где в качестве объектов распознавания использовались точки на разломах, а подклассы, на которые было разбито B_0 , состояли из объектов, расположенных в окрестностях эпицентров уже известных сильных землетрясений. Другими словами, для каждого из эпицентров сильных землетрясений формируется подкласс, состоящий из объектов, находящихся в окрестности этого эпицентра, а затем объединение этих подклассов образует множество B_0 . Если какой-то объект попадает в несколько подклассов, то он входит во

множество B_0 несколько раз в составе тех подклассов, в которые он попал. По сравнению с алгоритмом «Кора-3» меняется определение характерного признака класса B : с порогом S_1 сравнивается не число объектов из B_0 , обладающих признаком, а число подклассов, обладающих им (по определению, подкласс обладает признаком, если хотя бы один входящий в него объект обладает этим признаком) [90].

На разных этапах развития метода ЕРА для распознавания использовались и другие алгоритмы: «Expert Communication (EC)» [308], «Правило Байеса» [84], различные версии алгоритма «Кора-3» [98] и др.

Особое место в блоке распознавания образов ЕРА занимает созданный в 1983 году известным французским математиком Жаном Саллантенем (Jean Sallantin) алгоритм «ЕС» [308]. В рамках советско-французского проекта «Распознавание сильных и значительных землетрясений в регионах умеренной сейсмичности – Альпы, Большой Кавказ, Пиренеи» [35, 36, 37, 61, 242, 266] французские участники предложили выполнить независимое изучение этих регионов методами распознавания образов. При этом использовались как различные принципы определения объектов распознавания (на основе МСР и отрезки разломов неотектонической схемы региона), так и принципиально отличные алгоритмические блоки ЕРА («Кора-3» и «ЕС»). Независимое распознавание (dual recognition) подтвердило достоверность обоих подходов, т.к. результаты оказались достаточно близки. По результатам советско-французского проекта в 1988 году была опубликована монография [62].

Отличием алгоритма «Правило Байеса» от описанных алгоритмов является то, что он не нуждается в двоичном представлении объектов распознавания, но остается необходимой процедура дискретизации, т.е. компоненты векторов, соответствующих объектам, должны принимать конечное число значений. Для построения решающего правила алгоритма необходимо задать априорную вероятность принадлежности объекта классу B и порог Δ [80]. Для векторов, представляющих объекты, на основе

обучающих выборок вычисляются оценки вероятностей их принадлежности к классам B и H . Объекты, у которых разность этих оценок не меньше Δ , относятся к классу B , а остальные объекты относятся к классу H .

1.1.6. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений

Алгоритмические основы метода ЕРА были разработаны в 1972 г. при решении задачи распознавания алгоритмом «Кора-3» дизъюнктивных узлов Востока Средней Азии (Тянь-Шань и Памир), в пределах которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.5$ [96, 97, 251]. В результате удалось определить ряд новых узлов, в которых землетрясения с $M \geq 6.5$ еще не происходили, но могут произойти в будущем [90].

Позже распознавание в этом же регионе было выполнено вновь алгоритмом «Кора-3» с использованием в качестве объектов распознавания пересечений линейментов [134, 135]. Результаты распознавания по узлам [96, 97] и по пересечениям [135] оказались хорошо согласованными. В последующем в этом регионе произошло 9 землетрясений с $M \geq 6.5$. Эпицентры восьми из них расположены в узлах отнесенных в классу B в 1972 – 1978 гг. Более того, два эпицентра расположены в узлах, в которых землетрясения с $M \geq 6.5$ ранее не были известны [114, 206, 254]. Отметим, что в [95, 97, 251] для региона впервые были определены критерии высокой сейсмичности на языке использовавшихся в исследовании геолого-геофизических и геоморфологических характеристик. На рис. 1.2 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ из работы [135].

Работы [96, 97, 251] положили начало уже почти 50-летнему циклу публикаций, посвященных решению методом ЕРА задач распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в различных горных странах мира. Результаты этих исследований опубликованы, в основном, в сборнике «Вычислительная сейсмология», советских и российских журналах

«Физика Земли» («Известия Академии наук СССР. Физика Земли»), «Доклады Академии наук» («ДАН СССР») и «Вулканология и сейсмология», а также ведущих иностранных журналах «Tectonophysics», «Physics of the Earth and Planetary Interiors», «Pure and Applied Geophysics», «Geophysics», «Annales Geophysicae», «International Journal of Geophysics», «Journal of Seismology and Earthquake Engineering» и др. Распознаванию методом ЕРА посвящен ряд монографий [62, 65, 104, 190, 191, 245, 264 и др.]. Результаты распознавания мест будущих сильных землетрясений опубликованы в виде глав в монографиях [246, 253, 265 и др.], вышедших в издательстве Springer. В разные годы исследователями задачи ЕРА защищены три докторские и восемь кандидатских диссертаций [90].

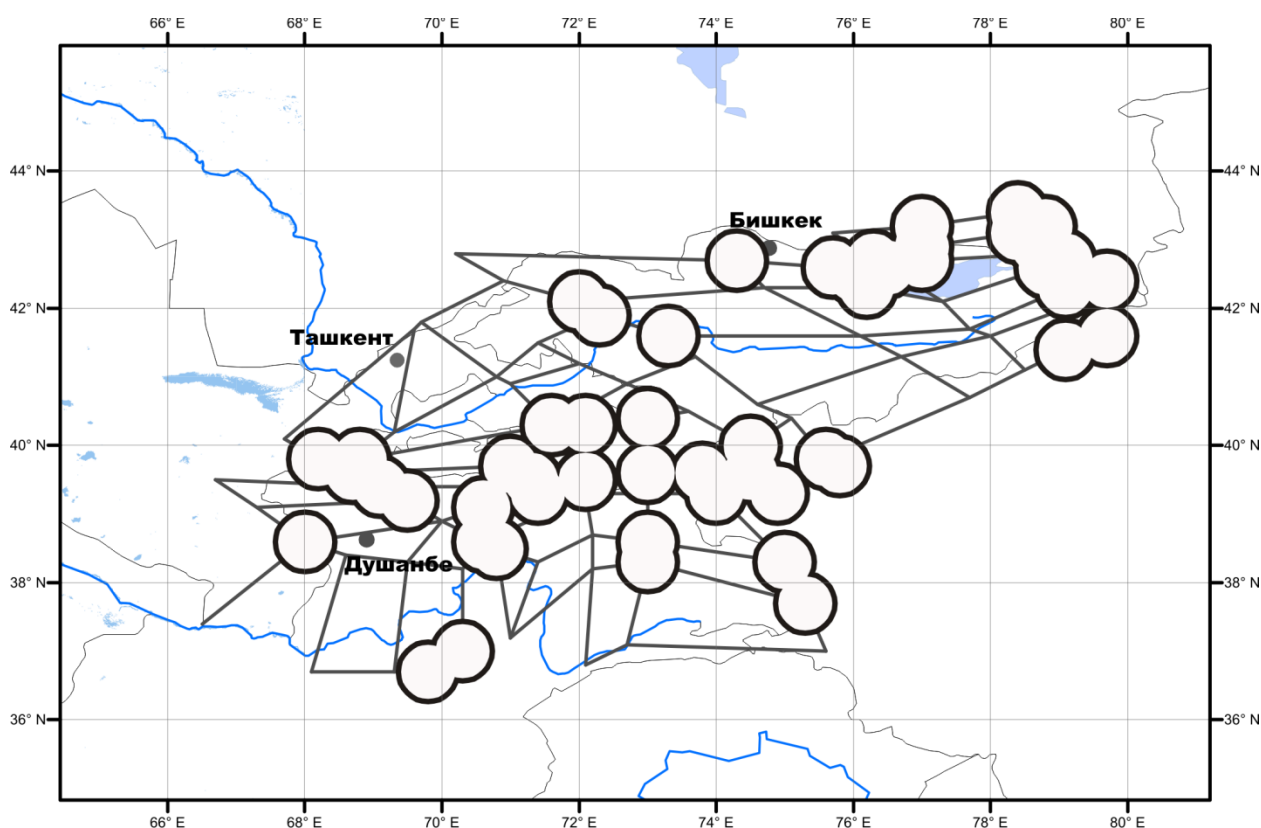


Рис. 1.2. Схема линейментов Тянь-Шаня и Памира и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ (окоптурены жирными линиями) [135, 206]

В 1973 г. с помощью алгоритма «Кора-3» было выполнено

распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в объединенном регионе Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья. В качестве объектов распознавания рассматривались морфоструктурные узлы [92]. В 1974 г. распознавание для этого региона было проведено с использованием других объектов распознавания – пересечений осей морфоструктурных линеаментов [94]. На рис. 1.3 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ из работы [94].

В 1975 г. в [136] результаты [92] и [94] были сопоставлены друг с другом. В результате были получены независимые классификации пересечений линеаментов в подрегионах объединенного региона. Отметим, что результаты [136] и [92] хорошо согласуются. В [136] наряду с алгоритмом «Кора-3» использовался и алгоритм «Подклассы».

В 1977 г. для рассматриваемого объединенного региона было выбрано новое значение магнитудного порога – $M_0 = 7.0$ [162]. В качестве объектов алгоритм «Подклассы» [162] использовал пересечения линеаментов отнесенные в [94] к классу *B* при пороге $M_0 = 6.5$.

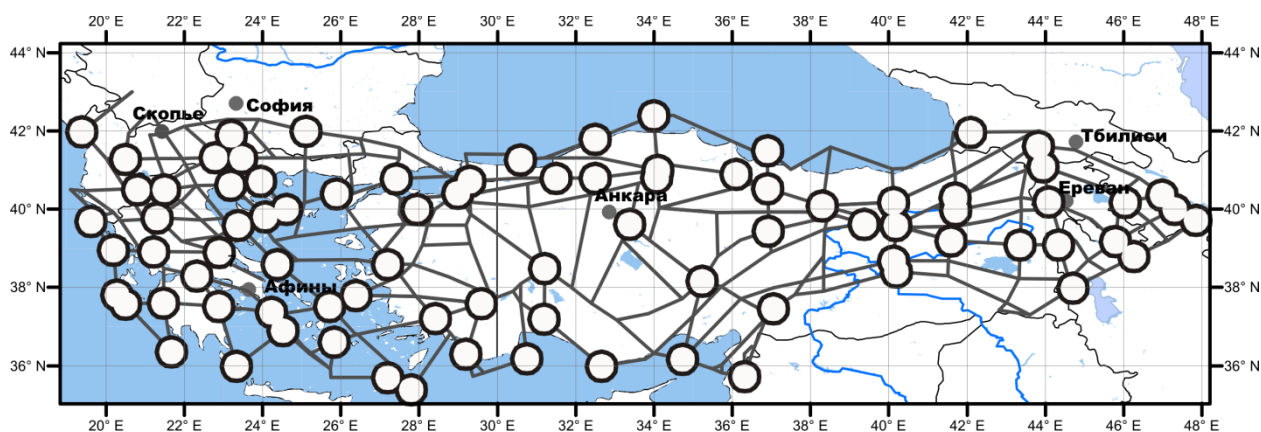


Рис. 1.3. Схема линеаментов и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ (окоптурены жирными линиями) в объединенном регионе Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья [94, 206]

Анализ, выполненный в [206, 254], показывает высокий уровень достоверности результата, полученного в [94]. После публикации [94] в

рассматриваемом регионе произошло 31 землетрясение с $M \geq 6.5$. Эпицентры 28 из них расположены в узлах, распознанных как высокосейсмичные. При этом 8 эпицентров расположены в узлах, в которых ранее землетрясения с $M \geq 6.5$ не происходили.

Во второй половине 70-х годов в рамках советско-американской геолого-геофизической программы, выполнявшейся АН СССР и Геологической службой США (USGS), к развитию ЕРА подключились известные американские геофизики Ф. Пресс (F. Press, в последующем президент Национальной академии наук США в 1981 – 1993 гг.) и Л. Кнопоф (L. Knoroff). Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии и на прилегающих территориях было выполнено советско-американской группой ученых в 1976 г. с использованием алгоритмов «Кора-3» и «Подклассы» [98, 252]. Со стороны АН СССР в проекте участвовал Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, а с американской – UCLA Университет Калифорнии в Лос-Анджелесе [90].

В этом исследовании независимо рассматривались два типа объектов распознавания: точки на крупных геологических разломах, взятые с равномерным шагом, и пересечения морфоструктурных линеаментов. В [98, 252] были подтверждены два важных факта: приуроченность эпицентров землетрясений с $M \geq 6.5$ к пересечениям морфоструктурных линеаментов и существование в Калифорнии поперечных линеаментов. Это удалось показать путем сопоставления результатов распознавания, полученных в [98, 252] с использованием объектов разного типа. На рис. 1.4 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ из работ [98, 252].

В 1977 г. для рассматриваемого региона было выполнено распознавание алгоритмом «Кора-3» с использованием гравитационных аномалий [20]. Результаты [20, 98, 252] хорошо согласуются.

В работе [162] критерии мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.0$, полученные алгоритмом «Подклассы» для объединенного региона Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья, были успешно

применены к определению высокосейсмичных зон на территории Калифорнии. Все известные на тот момент землетрясения с $M \geq 7.0$ были расположены в выявленных таким новым распознаванием окрестностях объектов. После опубликования в 1976 г. результатов [98, 252] в регионе произошло 15 землетрясений с $M \geq 6.5$. Эпицентры 13 расположены в окрестностях объектов отнесенных к классу *B*. При этом 4 землетрясения произошли в районе, где сильные землетрясения ранее не происходили [254].

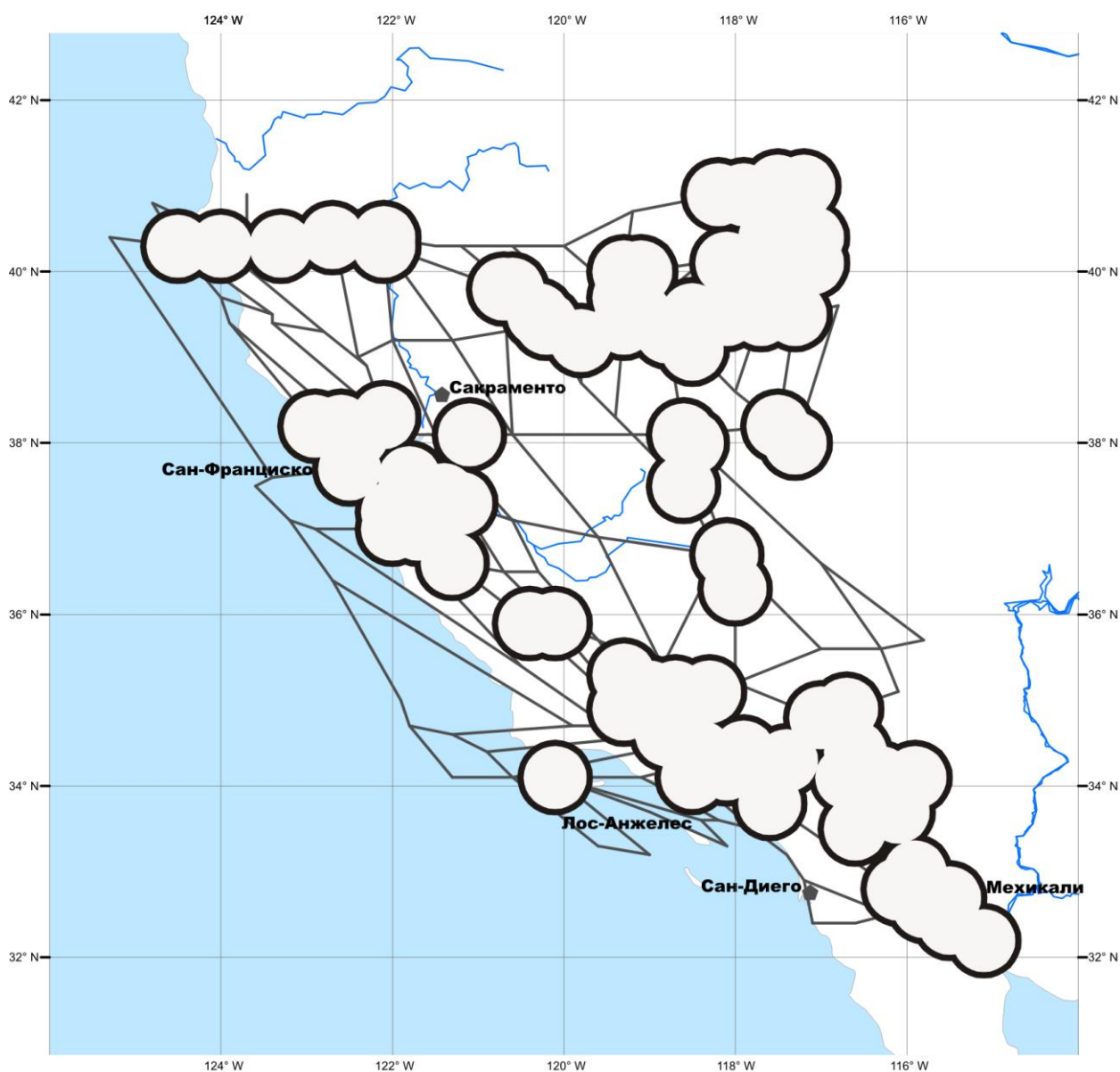


Рис. 1.4. Схема линеаментов Калифорнии и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ (оконтурены жирными линиями) [98, 206, 252]

В 1979 г. советско-итальянской группой ученых проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на территории Апеннинского полуострова [108, 240]. Для распознавания использовался алгоритм «Подклассы» и пересечения линеаментов в качестве объектов распознавания. На рис. 1.5 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ из работ [108, 240].

Результаты распознавания в Италии не столь хорошо подтвердились последующей сейсмичностью, как в других регионах. После опубликования результатов [108, 240] на территории изучаемого региона Италии произошло 11 землетрясений с $M \geq 6.0$. Эпицентры 7 из них расположены в окрестностях пересечений линеаментов, отнесенных к классу *B*. При этом в окрестности одного пересечения землетрясения с $M \geq 6.0$ ранее не происходили [206, 254]. Эпицентры 4 землетрясений оказались вне окрестностей высокосейсмичных пересечений. Это может быть объяснено недостатками схемы МСР, построенной совместно с итальянскими коллегами [206].

В 1980 – 1982 гг. было проведено формализованное морфоструктурное районирование горного пояса Анд (рис. 1.6) [39, 115]. При этом, приуроченность эпицентров землетрясений с $M \geq 7.0$ к пересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки оказалась неочевидной, и ее наличие было обосновано с использованием специально разработанного алгоритма [89]. На основе этого было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки [79, 87, 88, 270].

Для распознавания использовался алгоритм «Кора-3» и пересечения линеаментов, полученные методом МСР примененным с некоторыми дополнениями по сравнению с предыдущими работами. А именно, в дополнение к трем рангам линеаментов введены линеаменты высшего ранга – океанический желоб и материковый склон. В схему линеаментов включены линейные зоны, подходящие к горному поясу Анд со стороны океана и платформы, введен новый тип горообразования – современная геосинклиналь

[39]. На рис. 1.6 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ из работ [79, 270]. Позже в [137] было выполнено независимое распознавание для меньшего магнитудного порога $M_0 = 7.0$.

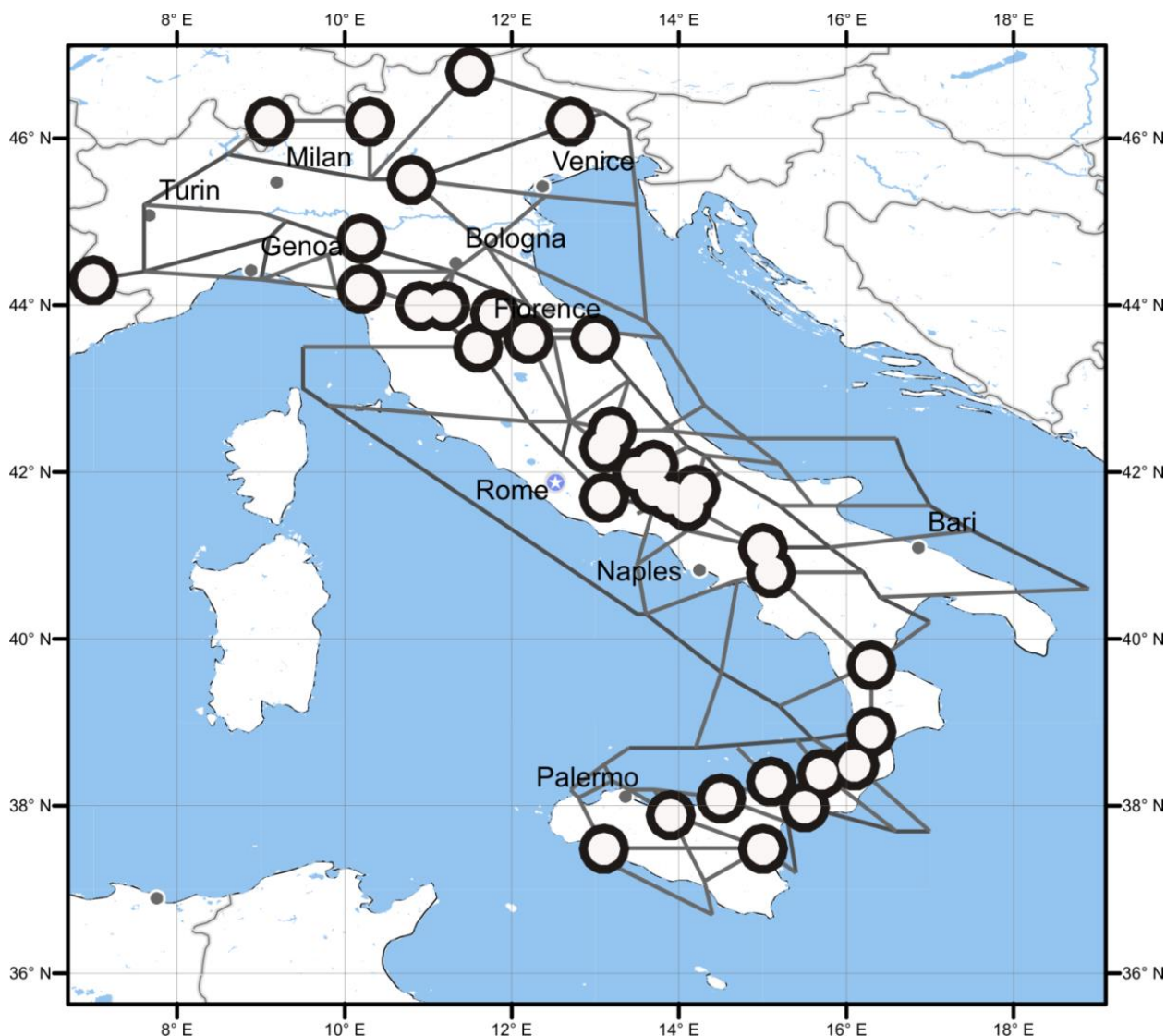


Рис. 1.5. Схема линеаментов Италии и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (окоптурены жирными линиями) [108, 206, 240]

После опубликования результатов [79, 270] в регионе произошло 7 землетрясений с $M \geq 7.75$. Положения их эпицентров дают аргументы в пользу достоверности полученного результата. Эпицентры пяти из них расположены в окрестностях пересечений линеаментов, распознанных как опасные, при этом два из них – в районах, где сильные землетрясения ранее не происходили [206, 254].

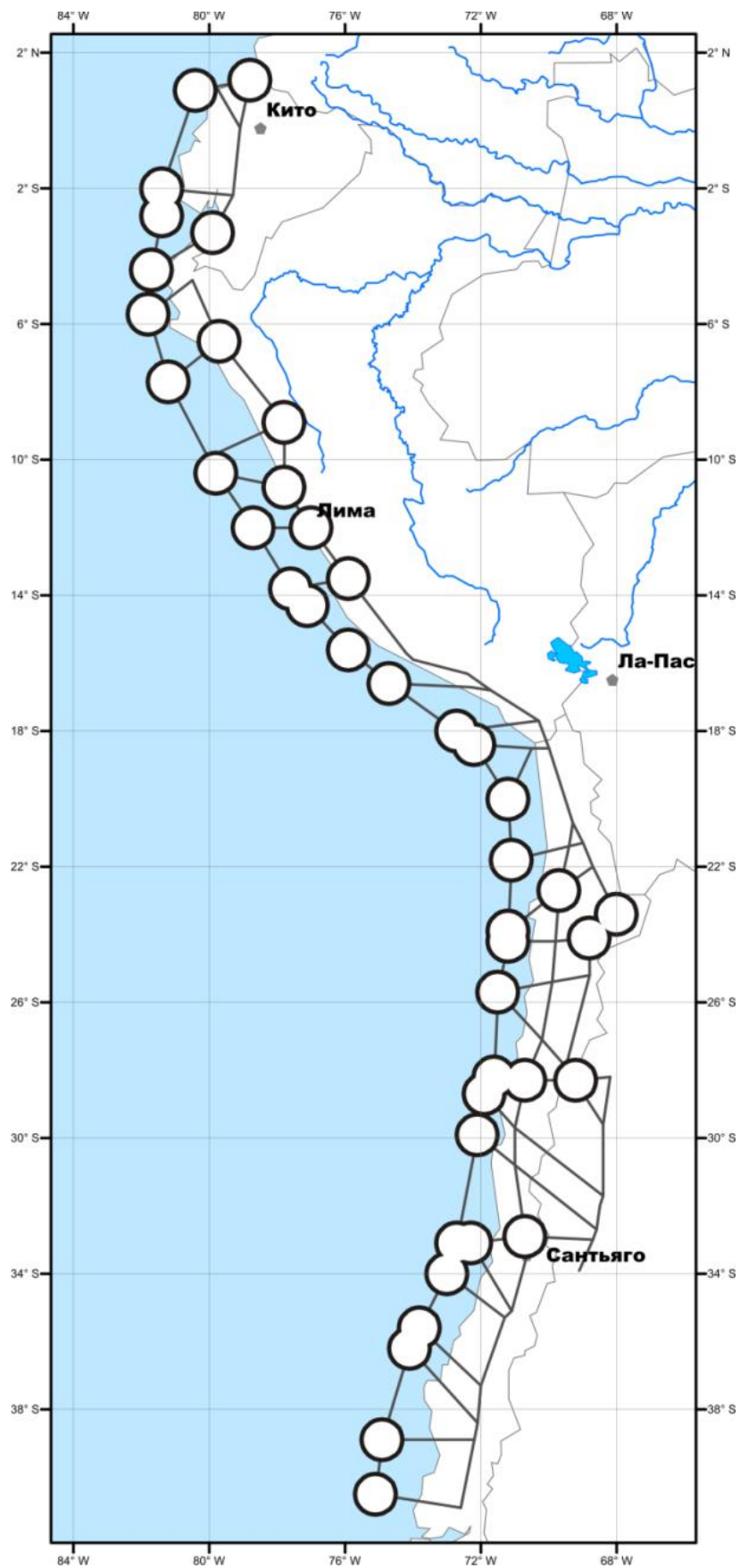


Рис. 1.6. Схема линеаментов горного пояса Анд Южной Америки и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ (окоптурены жирными линиями) [79, 206, 270]

В 1978 – 1980 гг. было выполнено распознавание мест возможного возникновения сильнейших ($M \geq 8.2$) землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса [80, 81, 82]. Аргументом в пользу выбора этого региона для исследований явились его масштаб и высочайший уровень сейсмической активности. Так, до выполнения распознавания за первые три четверти XX века в пределах Тихоокеанского сейсмического кольца произошло 80% от общего количества землетрясений мира с $M \geq 8.2$ [80]. Тихоокеанский сейсмический пояс включает несколько зон субдукции океанических плит под обрамляющие континенты.

Целью исследований [80, 81] являлось выявление в Тихоокеанском поясе сегментов, где могут возникать землетрясения с $M \geq 8.2$, и определение общих критериев таких сегментов. Следует заметить, что Тихоокеанский пояс неоднороден по характеру и истории основных разломов, а, следовательно, и по условиям возникновения землетрясений [80]. По этой причине у исследователей не было уверенности в существовании общих критериев мест сильнейших землетрясений всего региона. Однако аргументом в пользу их существования стала высказанная В.И. Кейлисом-Бороком гипотеза о том, что распознанные в различных регионах критерии высокой сейсмичности могут обладать универсальными инвариантами. Гипотеза базировалась на опыте переноса критериев сейсмичности между регионами [93, 162].

В качестве объектов распознавания в Тихоокеанском сейсмическом поясе брались точки на кривой, трассирующей оси глубоководных желобов и подножия континентальных склонов, образующих пояс. Распознавание проводилось алгоритмом «Кора-3» в [81], алгоритмами «Правило Хемминга», «Кора-3» и «Правило Байеса» в [80], алгоритмом «Гиперплоскость» в [116]. Достоверность результатов распознавания была подтверждена, в том числе, успешным переносом выявленных критериев высокой сейсмичности Тихоокеанского пояса на территорию Альпийского пояса и Южно-Антильского региона [159]. В работе [85] с помощью

специально разработанного математического аппарата обосновано, что для Тихоокеанского пояса наибольшей статистической значимостью обладает результат ЕРА для пороговой магнитуды $M_0 = 8.0$, полученный с помощью алгоритма распознавания «Правило Хемминга». На рис. 1.7 показан основной результат распознавания из работы [81].

В работе [78] построена схема МСР Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и выполнен перенос на этот регион критериев высокой сейсмичности ($M_0 = 7.75$), полученных для горного пояса Анд Южной Америки [79]. Объекты распознавания Камчатки, отнесенные к классу B на основе переноса критериев, содержат в своих окрестностях эпицентры всех ранее произошедших коровых инструментальных землетрясений с $M \geq 7.75$. После [78] на Камчатке произошло одно землетрясение с $M \geq 7.75$, и его эпицентр расположен в окрестности объекта из класса B .

В начале 80-х годов прошлого века в рамках соглашения о сотрудничестве между АН СССР и Национальным центром исследований Франции (CNRS) успешно развивалось советско-французское сотрудничество по исследованиям в области сейсмогенезиса [86], научное руководство которым осуществляли директора Московского и Парижского институтов физики Земли М.А. Садовский и Ж. Жобер. Ядром этого сотрудничества стал проект распознавания мест возможного возникновения землетрясений в трех областях Альпийского орогенного пояса Евразии, обладающих умеренным уровнем сейсмичности: на Большом Кавказе, в Западных Альпах и Пиренеях. По результатам этих исследований в 1988 году была опубликована монография [62].

Целью проекта был поиск общих признаков мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ в трех рассматриваемых регионах. В проекте участвовали Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, Институт географии АН СССР, Институты физики Земли Парижа и Страсбурга, Бюро по геологии и минералогии Франции, Университет

Монпелье. Французские ученые А. Систернас, К. Вебер, Э. Филип, Ж. Саллантен, П. Годфруа, работая в едином коллективе с возглавляемыми А.Д. Гвишиани советскими геофизиками, геоморфологами и математиками, сыграли важную роль в успешном выполнении проекта.

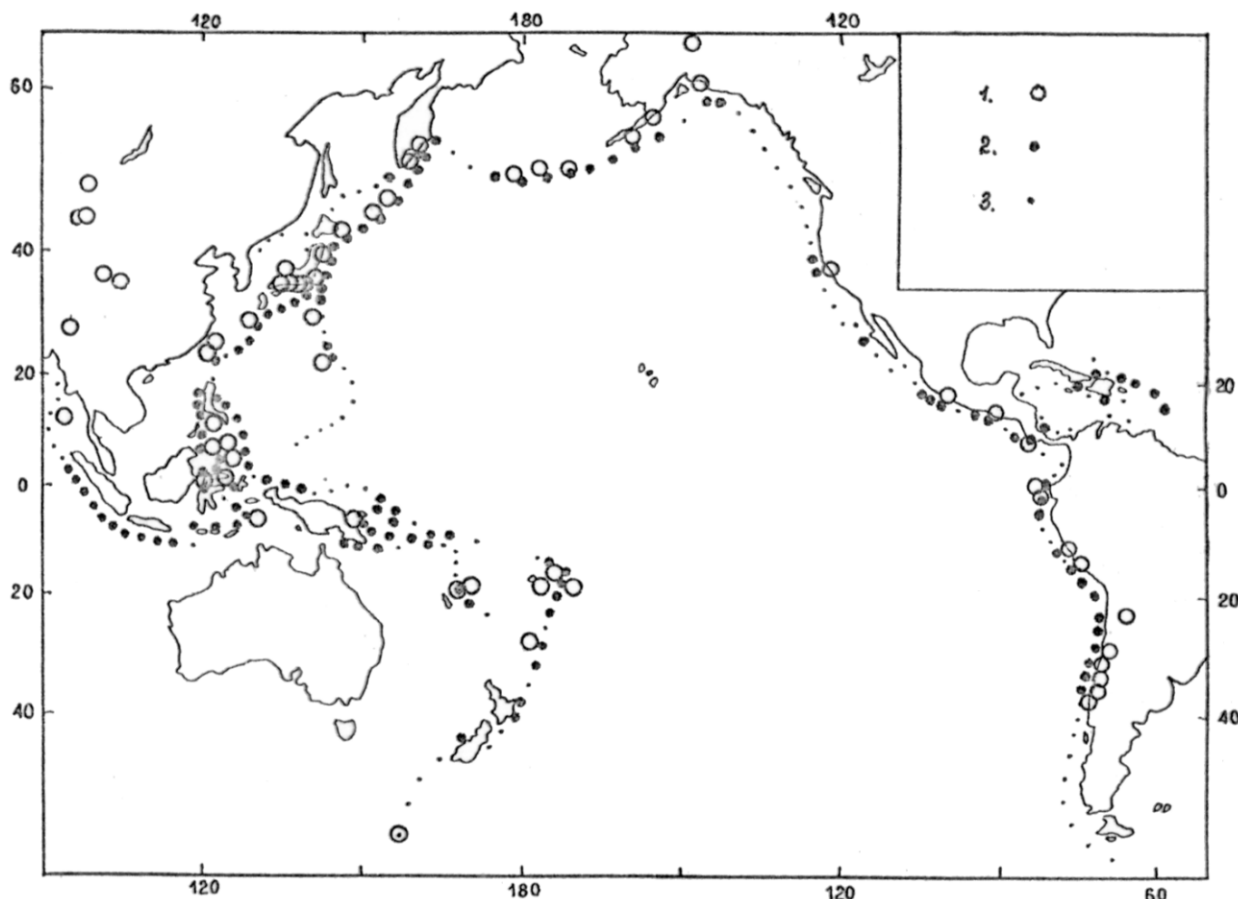


Рис. 1.7. Тихоокеанский сейсмический пояс. Основной вариант распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 8.2$ из работы [81]: 1 – эпицентры землетрясений с $M \geq 8.2$; 2 – объекты распознавания, отнесенные к классу *B*; 3 – объекты распознавания, отнесенные к классу *H*

В 1981 – 1986 гг. внимание исследователей было нацелено на распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ в Западных Альпах. В работе [38] по комплексу геолого-геофизических и геоморфологических данных была построена схема МСР, обоснована приуроченность эпицентров сильных землетрясений к окрестностям

пересечений морфоструктурных линеаментов. В [106] методом ЕРА было выполнено распознавание с помощью алгоритма «Кора-3» для пересечений осей линеаментов в качестве объектов распознавания. Результат согласовывался с расположением эпицентров исторических землетрясений.

В [35, 242] результат [106] был существенно уточнен. В этих работах был применен дуальный подход. Задача в Западных Альпах независимо решалась коллективами из СССР и Франции. Первые проводили ЕРА-распознавание используя те же объекты и алгоритм, что и в [106]. Набор характеристик, описывающих объекты, был несколько расширен.

Французская группа заменила МСР неотектонической схемой (НТС). Объекты распознавания определялись как равновеликие участки разломов НТС. Их векторное представление описывалось в основном значениями тектонических характеристик.

Несмотря на принципиальные различия в подходах результаты, полученные советской и французской группами, достаточно хорошо согласовывались. На рис. 1.8 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ из работ [35, 242], распознанные советскими учеными.

В работе [37] было продолжено развитие дуального подхода: выполнено распознавание алгоритмом «Кора-3» для определенных на основе НТС объектов, векторное описание которых состояло из характеристик, использованных ранее французскими учеными в [35]. Результат оказался близким к результату, ранее полученному советской группой [35, 242].

Результат распознавания в Альпах [35, 242] характеризуется высокой степенью достоверности. После его опубликования в Западных Альпах произошло 6 землетрясений с $M \geq 5.0$. Эпицентры 5 из них расположены в В-областях. В одной из них сильные землетрясения ранее не происходили [206, 254].

В 1987 г. в [59, 61, 266] с помощью алгоритма «Кора-3» на базе пересечений линеаментов было выполнено распознавание мест возможного

возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ в Пиренеях. Достоверность распознавания подтверждается путем переноса критериев высокой сейсмичности с Пиренеев на Западные Альпы и наоборот, а также результатами распознавания в объединенном регионе Пиренеи – Западные Альпы [61]. Согласно [206, 254] после 1987 г. на Пиренеях произошло 6 х землетрясений с $M \geq 5.0$. Эпицентры 5 расположены в окрестностях пересечений, отнесенных к классу *B*. Одно землетрясение произошло в районе, где землетрясения такой магнитуды ранее не наблюдались [206]. На рис. 1.9 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ из работ [61, 266].

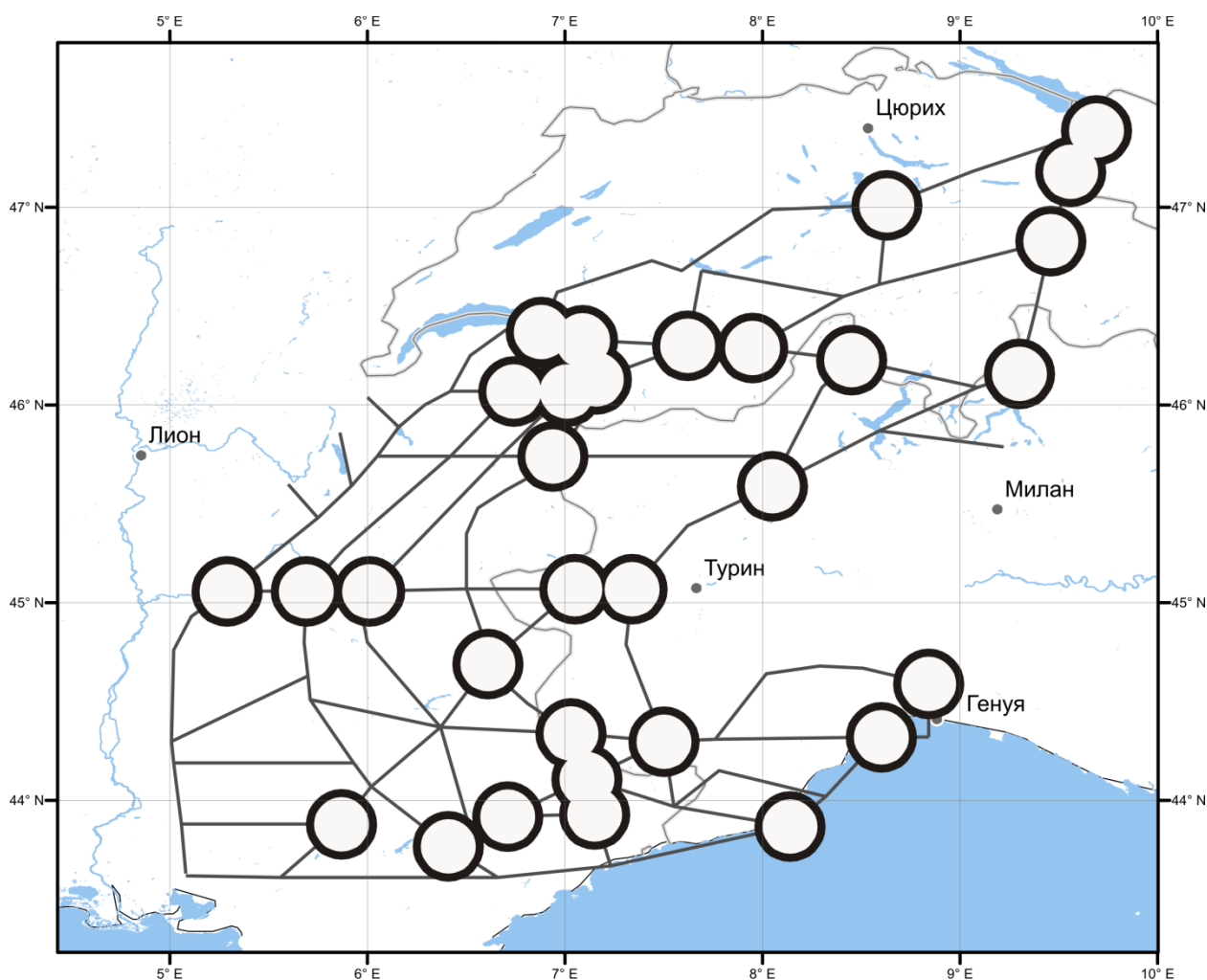


Рис. 1.8. Схема линейментов Западных Альп и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ (окоптурены жирными линиями) [35, 206, 242]

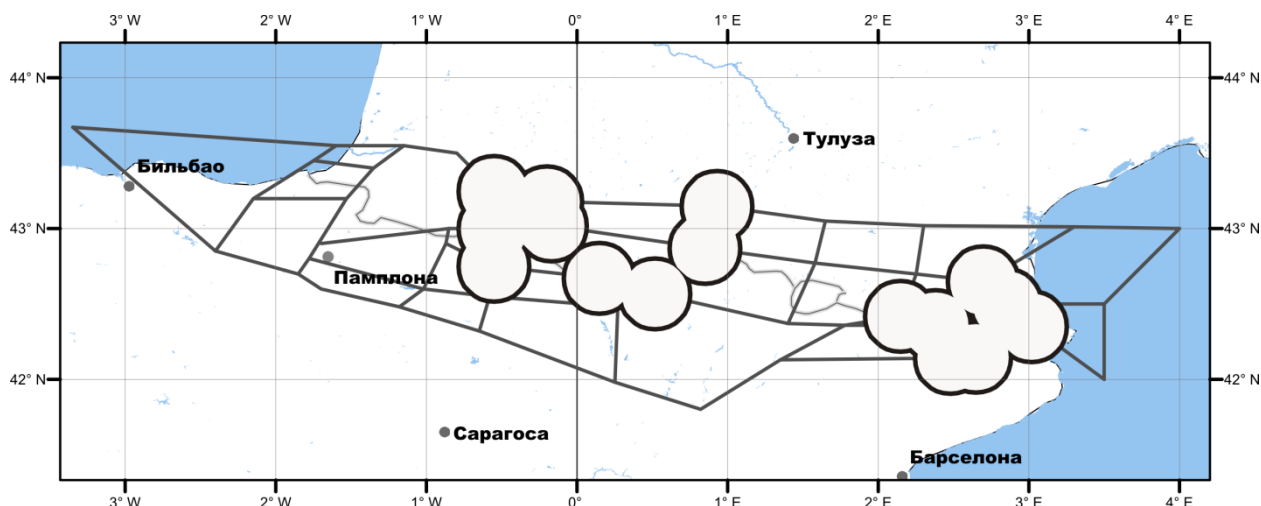


Рис. 1.9. Схема линеаментов Пиренеев и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ (окоптурены жирными линиями) [61, 206, 266]

В 1986 – 1988 гг. было проведено распознавание для территории Большого Кавказа. В этом регионе задача решалась алгоритмом «Кора-3» для трех магнитудных порогов и двух типов объектов распознавания. В 1986 году подход ЕРА применен к морфоструктурным узлам для пороговой магнитуды $M_0 = 6.5$ [60]. В 1987 г. классификация морфоструктурных узлов выполнена для $M_0 = 5.5$ [58]. Наконец в 1988 г. выполнена классификация пересечений осей морфоструктурных линеаментов для еще более низкой пороговой магнитуды $M_0 = 5.0$ [62]. В 2001, 2014 и 2018 годах в работах [114, 206, 254] был проведен детальный анализ результата распознавания из [62]. Оказалось, что эпицентры всех 13 землетрясений с $M \geq 5.0$, произошедших на Большом Кавказе после 1988 г., располагаются вблизи пересечений линеаментов, распознанных как опасные. При этом 9 землетрясений произошли в окрестности пересечений, в районе которых ранее такие землетрясения не были известны [206]. Таким образом, качество распознавания на Кавказе можно считать одним из самых высоких в истории применения ЕРА. На рис. 1.10 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ из работы [62].

В целом, результаты советского-французского проекта оказались впечатляющими. Удачным переносом сформированных в каждом из трех

регионов критериев сейсмичности на два других [62] и результатами распознавания в объединении четырех регионов Средиземноморской области [63] было показано, что в критериях сейсмичности, помимо региональной составляющей, содержатся и признаки, общие для всех рассмотренных регионов. В связи с этим в развитии ЕРА появилась надежда на возможность существования универсальных критериев повышенной сейсмичности.

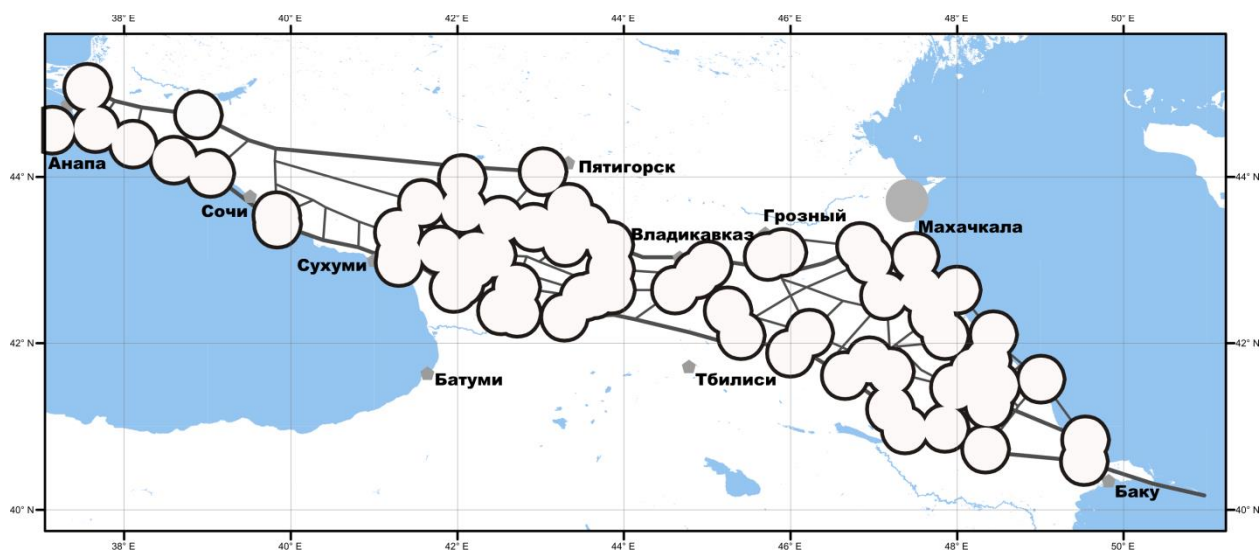


Рис. 1.10. Схема линеаментов Большого Кавказа и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ (оконтурены жирными линиями) [62, 206]

Начиная с 1990 г. в блоке распознавания ЕРА стал применяться только алгоритм «Кора-3», а в случае малого материала обучения выполнялся перенос критериев, полученных в сходном регионе. В качестве объектов распознавания, в основном, использовались пересечения осей морфоструктурных линеаментов.

В 1991 г. в [105] построена МСР схема для Малого Кавказа и выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$.

Начиная с 1992 г. исследования ЕРА продолжились силами Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Ключевую роль в этих исследованиях

играют А.И. Горшков и Ал.Ан. Соловьев.

В 1992 – 1994 гг. амбициозной целью применения ЕРА стал регион Гималаев, который изучался российско-индийской группой ученых [32]. Была построена схема МСР и распознаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$. Достоверность полученного результата изучалась в работе [255], где был сделан вывод о целесообразности использования результатов распознавания при оценке сейсмической опасности. Согласно [206, 254] в Гималаях после публикации [32] до 2018 г. произошло 5 землетрясений с $M \geq 6.5$. Эпицентры трех из них расположены в окрестностях пересечений, распознанных как высокосейсмичные. При этом один эпицентр находится в окрестности пересечения, где ранее не было землетрясений с $M \geq 6.5$ [206, 254]. На рис. 1.11 показаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ из работы [32].

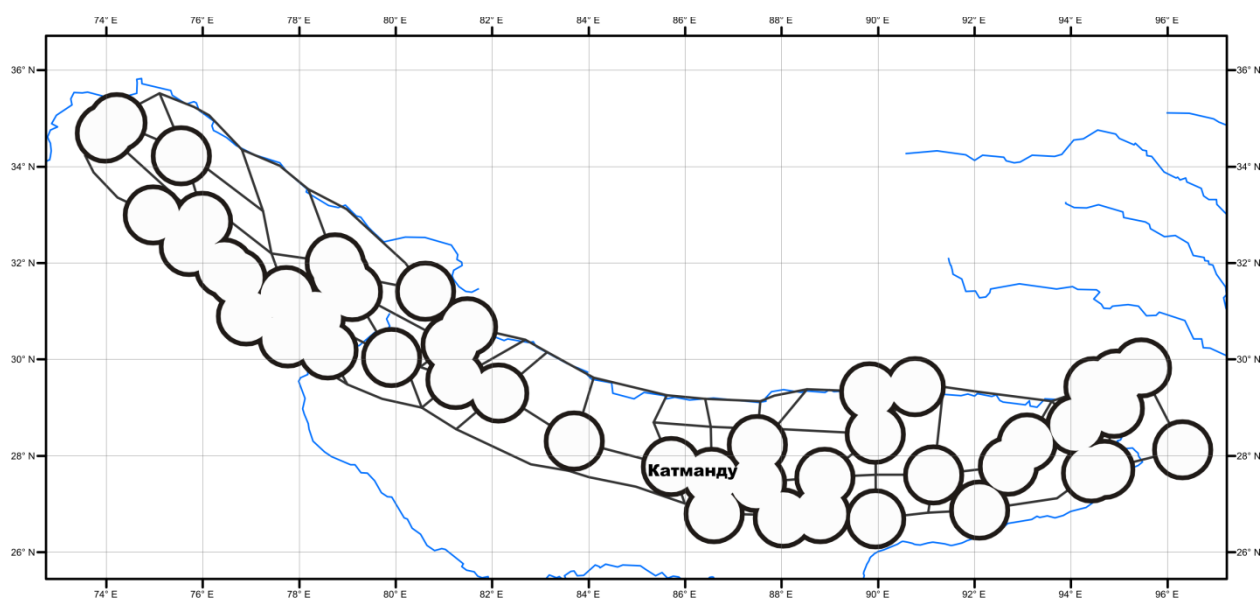


Рис. 1.11. Схема линейментов Гималаев и места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ (оконтурены жирными линиями) [32, 206]

В [33] метод ЕРА применен в Гималаях для пороговой магнитуды $M_0 = 7.0$. Из-за невозможности проведения обучения в силу малого количества землетрясений с $M \geq 7.0$ в Гималаях классификация объектов на высоко- и низкосейсмичные была выполнена путем переноса критериев

высокой сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки, полученных для такой же пороговой магнитуды в 1990 г. в [137]. Результаты распознавания [32, 33] достаточно хорошо согласуются.

В 2000 г. российско-итальянская группа ученых применила метод ЕРА в Карпато-Балканском горном поясе для пороговой магнитуды $M_0 = 6.5$ [256]. Как и в Гималаях [32], из-за малого количества землетрясений с $M \geq 6.5$ и, соответственно, невозможности проведения обучения классификация объектов осуществлялась путем переноса критериев высокой сейсмичности региона Памир – Тянь-Шань, определенных для $M \geq 6.5$ алгоритмом «Правило Хемминга» [160]. Эти же критерии были использованы для классификации объектов распознавания (пересечений линеаментов) в Туркмено-Хоранских горах (Копетдаг, Кучано-Мешхедская межгорная впадина, Эльбурс, Аладаг и Биналуд) для пороговой магнитуды $M_0 = 6.5$ [110]. Позже в этом регионе (Копетдаг-Аладаг-Биналуд) методом ЕРА было выполнено полномасштабное распознавание для $M_0 = 6.0$ [109].

В 2002 – 2003 гг. в результате российско-итальянского сотрудничества метод ЕРА был применен для магнитудного порога $M_0 = 6.0$ в регионах: Альпы, полуостровная Италия, Балканы, Карпаты и Динариды [257, 258], а затем в 2004 г. в Альпах и Динаридах [260]. В работе [260] также выполнено распознавание в Динаридах для $M_0 = 6.5$ путем переноса критериев высокой сейсмичности из региона Памир – Тянь-Шань [160].

В истории ЕРА несомненный интерес представляет работа [111], в которой были распознаны места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в огромном регионе, включающем в себя четыре горных пояса Средиземноморья: Альпы, Динариды и северная часть Сербо-Македонского массива, Апенины и Сицилия (распознавание здесь было выполнено ранее [257]), Карпаты и Балканиды. Распознавание проводилось отдельно для каждой горной страны. При этом в Карпатах и Балканидах по отмеченным выше причинам классификация объектов осуществлялась переносом критериев сейсмичности из Динарид [111].

В 2010 г. в [104] обобщены результаты многолетних исследований по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском подвижном поясе от Пиренеев и Бетской Кордильеры на западе до Гималаев на востоке, а именно: Альпы и Динариды, Карпато-Балканский горный пояс, Апенины и Сицилия, Иберийская плита [259], Туркмено-Хоранские горы, Эльбурс, Малый Кавказ, Гималаи.

На примере центральной части Русской платформы показана принципиальная возможность применения ЕРА для распознавания сейсмоопасных районов на платформенных территориях и намечены возможности использования метода ЕРА для распознавания рудоносных узлов [104].

Метод ЕРА был применен для пороговой магнитуды $M_0 = 7.0$ в Черноморско-Каспийском регионе, включающем в себя Кавказ, Эльбурс и Копетдаг, межгорные Рионскую и Куринскую впадины, глубоководную Южно-Каспийскую котловину [182]. Важным для сейсморайонирования результатом стал тот факт, что в пределах Южно-Каспийской глубоководной котловины, характеризующейся более тонкой океанической корой, не было распознано мест, способных генерировать землетрясения с $M \geq 7.0$.

В 2015 – 2017 гг. дальнейшее развитие ЕРА было стимулировано проектом Российского научного фонда (РНФ) № 15-17-30020 «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье», выполненного на базе Геофизического центра Российской академии наук. На примере Кавказа было впервые показано, что данные по литосферным магнитным аномалиям обладают высокой информативностью для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений [207].

В работе [112] построена схема МСР горной части полуострова Крым и определены места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ путем переноса критериев этого уровня сейсмичности с Кавказа [205, 207]. В регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье построена схема МСР и проведено

полноценное применение метода ЕРА для $M_0 = 6.0$ [113]. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в горной части полуострова Крым показаны на рис. 1.1, а в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье – на рис. 2.5 в Главе 2.

До 2015 г. значения используемых характеристик объектов распознавания измерялись вручную с бумажных карт. В 2015 г. в рамках реализации проекта РНФ создана автоматизированная система для измерения геолого-геофизических характеристик объектов. Для этого был разработан инструмент геообработки для ГИС-системы компании Esri – ArcGIS. Основными достоинствами инструмента являются: автоматизация процесса, который раньше выполнялся вручную, большая точность измерений характеристик, удобство работы с цифровыми картами формата ГИС [214].

С точки зрения анализа успехов и неудач метода ЕРА представляет интерес работа [254], в которой для всех регионов, где применялся метод ЕРА, выполнен полный анализ расположения эпицентров землетрясений с $M \geq M_0$, произошедших после опубликования результатов распознавания. А этой работе показано, что 86% таких землетрясений произошло в достаточно малых окрестностях пересечений осей морфоструктурных линейментов (или в морфоструктурных узлах), распознанных как высокосейсмичные. Это является одним из аргументов в пользу приводимых в [300] положений о существенности вклада ЕРА в оценку сейсмической опасности территории [90].

1.2. Оценка достоверности результатов распознавания

В период широкого развития метода ЕРА в 80-е годы XX века на первый план выступила проблема обоснования достоверности распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Был предложен ряд контрольных экспериментов (например, [62, 75, 98, 104, 108, 240, 252]), а также создана содержательная математическая теория построения системы

необходимых условий достоверности результата ЕРА [41, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 245, 264] на основе разработанной А.Д. Гвишиани дискретно-математической конструкции динамических и предельных задач распознавания. Отметим, что из самой постановки проблемы очевидна невозможность построения достаточных условий достоверности результата ЕРА. Проверка выполнения необходимых условий показала высокую степень достоверности результатов ЕРА, полученных ранее для многих регионов мира [90].

1.2.1. Динамические и предельные задачи распознавания

Динамичность задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений заключается в том, что в ней классификация объектов распознавания $w \in W$ на классы B и H – есть процесс, разворачивающийся во времени, т.е. $B = B(t)$ и $H = H(t)$.

Дадим определение динамической задачи. Пусть $t \in [T_0, T_1]$ – время ($T_1 \leq \infty$), и в каждый момент времени t имеется разбиение $W(t) = B(t) \amalg H(t)$, т.е. существует отображение $F(w, t): W \times [T_0, T_1] \rightarrow \{B(t), H(t)\}$. С течением времени объекты могут переходить из $H(t)$ в $B(t)$. Если момент времени t фиксирован, то исходные данные динамической задачи составляет информация о поведении системы на отрезке времени $[T_0, t]$. Эта информация определяет материал обучения на момент времени t .

Пусть теперь фиксирован другой момент времени t' , причем $t < t' < T_1$. Тогда под решением динамической задачи для момента t' понимается распознавание классификации $W(t') = B(t') \amalg H(t')$, которая должна соответствовать функции F на множествах $W \times [t', t']$ и $W \times [T_0, t']$ [65, 66].

Для переноса сделанного определения на случай $t' \rightarrow \infty$ необходимо

существование предела $\lim_{t \rightarrow \infty} F(w, t) = F(w, \infty)$ (или $\lim_{t \rightarrow \infty} (B(t) \coprod H(t))$). В этом случае $W(t) = B(t) \coprod H(t)$ является прогнозом предельного состояния рассматриваемой системы при $t \rightarrow \infty$. Это приводит к классификации объектов распознавания, не зависящей от времени, что и является решением задачи прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений. Такая динамическая задача распознавания называется предельной [65, 66]. В [65] построены строгие достаточные условия корректности постановки предельной задачи распознавания.

В работах [41, 68] введено условие стабильности классификации объектов (устойчивости во времени). Пусть, как и прежде, W и $W_0 = B_0 \coprod H_0$ множество объектов распознавания и материал обучения, а $W = B \coprod H$ – результат классификации объектов на высоко- и низкосейсмичные, полученный некоторым алгоритмом. Эта классификация называется стабильной, если для каждого множества $B' : B_0 \subseteq B' \subseteq B$ существуют свободные параметры алгоритма такие, что новая классификация $W(B', H') = B_1 \coprod H_1$ совпадает с $W = B \coprod H$.

Сформулированное условие стабильности использовано для обоснования независимости от времени классификации пересечений линеаментов в регионах Малой Азии и Эгейского бассейна ($M_0 = 7.0$) [41], полученных в [84, 162], а также востока Средней Азии ($M_0 = 6.5$) [68], полученного в [84]. В работе [66] сформулированы необходимые и достаточные условия для стабильности классификации, полученной алгоритмом класса ГНП [69].

Выполнение условия стабильности, очевидно, говорит в пользу достоверности классификации. В работе [67] показано, что классификация, неустойчивая в момент получения, может стать устойчивой в будущем. Такая ситуация имеет место в случае, когда достаточно мало объектов, распознанных как высокосейсмичные, уже проявили себя таковыми [69]. В

работе [67] вводятся понятия локальной стабильности классификации и системы стабилизирующих множеств. С их помощью на примере Востока Средней Азии [84, 97] построены условия стабилизации классификации со временем.

В работе [69] с помощью алгоритма «Кора-3» получена корректная $(B_0 \subseteq B)$ классификация объектов восточной части Тихоокеанского подвижного пояса [80, 81] для $M_0 = 8.2$ и сформулированы строгие условия стабилизации этой классификации.

1.2.2. Контрольные эксперименты

Наилучшим обоснованием достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений является апостериорная проверка на основе данных о сильных землетрясениях рассматриваемого региона, то есть сравнение результата с расположением эпицентров землетрясений, произошедших после его получения. Но такая проверка может быть выполнена лишь по прошествии достаточно длительного времени после получения результата. Оценка достоверности классификации объектов на высоко- и низкосейсмичные непосредственно после ее получения осуществляется с помощью контрольных вычислительных экспериментов [62, 75, 92, 98, 104, 108, 240, 252]. В ЕРА применяются следующие основные контрольные эксперименты [90].

- **Эксперимент «Сейсмическое будущее» (СБ)** [62, 98, 252] состоит в повторении полученной классификации объектов $W = B \sqcup H$, используя в качестве обучающих выборок B_0 и H_0 множества B и H . Эксперимент считается удачным, если не более 5% от общего количества объектов распознавания меняют свою принадлежность по сравнению с исходной классификацией. Эксперимент проверяет стабильность классификации по отношению к сильным землетрясениям, которые могут произойти в

будущем. В соответствии с [67] эксперимент СБ выполняет проверку классификации на локальную стабильность, и, следовательно, его удачный исход есть необходимое условие для принятия полученного результата классификации в качестве решения задачи ЕРА [62, 104].

- **Эксперимент «Сейсмическая история» (СИ)** [62, 98, 252] выполняется путем отбрасывания эпицентров сильных землетрясений за последние t лет и исключения из B_0 объектов, связанных с отброшенными землетрясениями. Эксперимент считается успешным, если в новой классификации исключенные объекты будут отнесены к классу B .

- **Эксперимент «Проверка устойчивости»** [62, 104] есть обобщение эксперимента СБ. В нем делается попытка повторить классификацию $W = B \amalg H$, используя в качестве обучающих выборок B_0 и H_0 подмножества $B'_0 \subseteq B$ и $H'_0 \subseteq H$. Эксперимент считается удачным, если не более 10% от общего количества объектов меняют свою первоначальную классификацию.

- **Эксперимент «Скользкий контроль»** [62, 104] состоит в получении классификаций объектов распознавания обучаясь на материалах обучения B_0 и H_0 в которых поочередно исключается по одному объекту. В получаемых в эксперименте классификациях все объекты из B_0 (кроме, возможно, объекта исключенного в данном варианте распознавания) должны быть отнесены к классу B . Эксперимент считается удачным, если не более 20% объектов из обучающей выборки W_0 изменили свою классификацию при их исключении из обучения.

- **Эксперимент «Голосование по совокупности эквивалентных признаков»** выполняется только в случае использования алгоритмов «Кораз-3» или «Подклассы» [62, 104]. При их использовании результат классификации может зависеть от того, какие признаки из групп эквивалентных будут отобраны в наборы характерных признаков B и H . Эксперимент выполняется с целью выявления такой зависимости и считается успешным, если не более 5% объектов меняют классификацию при отборе

других представителей групп эквивалентных признаков.

- **Эксперименты на рандомизированных данных** [62, 84] предназначены для оценки вероятности ошибки классификации и проверки ее неслучайности. В экспериментах выполняется последовательность классификаций, в которых материалы обучения B_0 и H_0 формируются случайным образом из всего множества объектов распознавания. Результат эксперимента считается тем лучше, чем в большем количестве классификаций со случайным материалом обучения имеет место отнесение к классу H объектов из B_0 .

- **Эксперименты повторения результата** [62, 104] состоят в повторении результата классификации после изменения хода решения задачи, начиная с какого-либо этапа. Например, использование другого алгоритма классификации, других объектов распознавания, дополнительных характеристик объектов, информации об исторических сильных землетрясениях и т.д. Эксперимент считается удачным, если не более 20% объектов меняют свою классификацию.

1.3. Обсуждение

На основе анализа полувекового развития и применения подхода ЕРА приходим к выводу, что он является эффективным инструментом для определения мест возможного возникновения будущих сильных землетрясений. Это подтверждается анализом данных о сильных землетрясениях, которые произошли в изученных регионах после получения соответствующих результатов.

Дополнительными аргументами в пользу достоверности ЕРА служит успех многочисленных контрольных экспериментов, эффективное применение теории динамических и предельных задач распознавания, а также устойчивость результатов относительно варьирования алгоритмов распознавания.

Подытоживая обзорную часть необходимо подчеркнуть, что в течение 50 лет развития метода ЕРА была создана эффективная методика распознавания мест возможного возникновения землетрясений для различных пороговых магнитуд в горных странах и на платформенных территориях. Полученные путем применения метода ЕРА результаты вносят существенный вклад в проведение сейсмического районирования, которое, в свою очередь, является одним из основных этапов оценки сейсмической опасности [103, 296, 300, 301].

Говоря о недостатках метода ЕРА отметим следующее. В результате распознавания изучаемая территория (а фактически конечное множество объектов распознавания W) алгоритмически разделяется на две непересекающиеся части: B , в которой возможно возникновение сильного ($M \geq M_0$) землетрясения, и H , где возникновение такого землетрясения невозможно. При этом множество обучения $W_0 \subset W$ состоит из двух непересекающихся подмножеств: B_0 – объекты обучения высокосейсмического класса B и H_0 – объекты обучения низкосейсмического класса H .

Формирование материала обучения является основополагающим этапом распознавания методом ЕРА. В обучающую выборку высокосейсмического класса включаются объекты, в окрестностях которых известны эпицентры сильных ($M \geq M_0$) землетрясений. В случае использования в качестве объектов распознавания морфоструктурных узлов – это объекты, содержащие эпицентры сильных землетрясений, а в случае пересечений линеаментов – объекты, в некоторых окрестностях которых расположены эпицентры сильных землетрясений [62, 206]. Логично предположить, что сформированная таким образом обучающая выборка B_0 с большой вероятностью не содержит априорных ошибок или их количество так мало, что не может оказать существенного влияния на результат распознавания [54, 127].

Формирование аналогичного «чистого» материала обучения класса H затруднительно. В обучающую 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 $\delta > 0$ и, как правило, имеет значение 0.5 или 1 [54, 62, 127, 206].

Очевидно, что такое определение выборки H_0 не гарантирует невозможности возникновения сильных землетрясений в окрестностях входящих в нее объектов, и часть объектов из H_0 в результате классификации может быть отнесена к классу B . Заметим, что выделение таких объектов наряду с отнесенными к классу B объектами, не входившими во множество обучения W_0 , и является целью применения метода ЕРА. Использование H_0 в качестве обучающей выборки класса H основано на предположении, что процент объектов из H_0 , которые на самом деле принадлежат классу B сравнительно мал. Это предположение подтверждалось во всех случаях применения метода ЕРА, но невозможность получения «чистой» обучающей выборки класса H остается недостатком метода [90].

По сути самой задачи ЕРА, являющейся предельной проблемой распознавания [65, 68, 245, 264], низкосейсмичный класс обучения содержит в себе потенциальные ошибки. Таковыми являются объекты, которые перейдут в высокосейсмичный класс в результате решения задачи. Более того, если такого перехода не произойдет, то распознавание даст тривиальный результат.

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 высоко- и низкосейсмичных классов оказываются неравноправными [54, 127], а процедурой ЕРА это игнорируется. Действительно обучение происходит по потенциально пересекающимся обучающим выборкам разного качества.

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 [73]. Разработка такого алгоритма распознавания является одной из целей диссертационного исследования.

Другим недостатком метода ЕРА является то, что определение объектов распознавания и измерение их геолого-геофизических и геоморфологических характеристик представляет собой трудоемкую задачу. Для ее решения необходимо использовать данные, которые не всегда доступны для рассматриваемого региона, или ограничиваться характеристиками, для которых возможно единообразное определение их значений для каждого объекта. Работа по составлению схемы МСР является творческой и выполняется высококвалифицированными специалистами в большей степени вручную. Возможность использования выбранных объектов распознавания 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 целью диссертационного исследования является создание и развитие такого рода системы.

Процесс определения потенциальных зон высокой сейсмической опасности представляет собой сложную систему. По этой причине новый метод распознавания высокосейсмичных районов необходимо должен быть инструментом современного системного анализа. С его помощью должна четко определяться граница, разделяющая высоко- и низкосейсмичные классы объектов.

Ввиду описанной выше сложности формирования «чистого» материала обучения создаваемая алгоритмическая система должна являться методом распознавания образов без учителя. Другими словами, она должна

базироваться на классификации объектов путем кластеризации. В этой связи естественным становится использование эпицентров слабых землетрясений в качестве объектов распознавания.

Такой подход выведет задачу распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на принципиально новый уровень ее решения. Появление с течением времени дополнительных (новых) объектов распознавания позволяет осуществлять систематическую корректировку получаемых результатов.

Отметим, что кластеризация является важным инструментом в интеллектуальном анализе геофизических данных [318]. Кластеризационные исследования эпицентров землетрясений [например, 1, 2, 18, 23, 171, 224, 299, 304, 316, 325, 326] активно развиваются с начала 1990-х [309]. Как правило, они направлены для достижения двух целей: выявление характеристик кластеров и их связи с физическими свойствами земной коры [например, 230, 233, 284, 315], и декластеризация [например, 318, 326] каталогов землетрясений [299].

Анализ эпицентров землетрясений классическими алгоритмами кластеризации сопряжен с трудностями [309, 318]. Оказывается, что алгоритмы, учитывающие «плотность» расположения объектов, эффективны из-за их способности находить кластеры произвольной формы даже при значительной зашумленности данных [318].

Развиваемое в Геофизическом центре РАН направление системного анализа – Дискретный математический анализ (ДМА) [6, 208] имеет необходимые инструменты для генерации алгоритмов топологической фильтрации / классификации без учителя. Базируясь на нечетких множествах и нечеткой логике ДМА обладает возможностями для передачи экспертных представлений о пространственных распределениях объектов [11]. Таким образом, ДМА позволяет реализовать системный подход к анализу геолого-геофизических данных в изучаемой в диссертации проблеме [6, 11, 26, 42, 43, 49, 56, 71, 77].

1.4. Выводы

- Показана роль решения задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в оценке сейсмической опасности территории.
- Дан исторический экскурс используемых в подходе ЕРА алгоритмов распознавания образов, методов оценки достоверности получаемых результатов. Описана последовательность этапов решения задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Приведен подробный обзор результатов ЕРА-распознавания в многочисленных сейсмоопасных регионах мира.
- Определены цели и задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. ВАРИАТИВНЫЙ МЕТОД ЕРА

В рамках диссертационной работы метод ЕРА [62, 206] получил развитие в виде создания нового алгоритма, примененного в блоке распознавания. Первоначальная версия алгоритма получила название «Барьер» [52, 54].

Принципиальным отличием алгоритма «Барьер» от используемых ранее в ЕРА алгоритмов, является то, что обучение в нем ведется только по одной обучающей выборке высокосейсмичного класса. Диссертант надеется, что это позволит усилить достоверность искомого распознавания потенциальных высокосейсмичных зон.

Алгоритм «Барьер», обучаясь только по одному высокосейсмичному классу, не является, вообще говоря, алгоритмом дихотомии. Однако он может эффективно использоваться в методе ЕРА заменяя собой классические алгоритмы дихотомии [62, 206]. «Барьер» также делит территорию на две непересекающиеся области, где соответственно могут или нет возникать сильные ($M \geq M_0$) землетрясения [54, 127].

2.1. Алгоритм «Барьер»

Как было отмечено, в алгоритме «Барьер» обучение осуществляется исключительно по высокосейсмичному классу B_0 . Таким образом, исключается ситуация, когда при формировании обучающей выборки H_0 в нее входят потенциально высокосейсмичные объекты, представляющие собой заведомые ошибки. Ожидается, что улучшение качества обучения приведет к повышению достоверности распознавания. Задача алгоритма «Барьер» – изучить характеристики обучающей выборки единственного «чистого» высокосейсмичного класса и на базе полученных знаний выявить объекты «похожие» на объекты обучения. Последние объявляются

алгоритмом «Барьер» высокосейсмичными.

Говоря языком теории множеств, «Барьер» решает задачу построения в конечном множестве объектов его подмножества B , расширяющего единственный класс обучения B_0 . Для этого по каждой характеристике строится мера различия между двумя произвольными объектами распознавания. Таким образом, находится и количественно оценивается «барьер», разделяющий эти объекты рассматриваемой характеристикой. Эта оценка играет роль меры близости на исходном множестве W , позволяющей придать точный смысл понятию близости к B_0 на основе совокупности рассматриваемых характеристик [54, 127]. Перейдем к строгой формулировке задачи и построению алгоритма «Барьер».

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

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:

$$B_{\pi}(w_1, w_2) = \{w \in W : \min(\pi(w_1), \pi(w_2)) \leq \pi(w) \leq \max(\pi(w_1), \pi(w_2))\}. \quad (2.1)$$

Легко увидеть, 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 «Барьер».

Отношение

$$\rho_{\pi}(w_1, w_2) = \frac{|B_{\pi}(w_1, w_2)|}{|W|} \quad (2.2)$$

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» осуществляет в три этапа [54, 127].

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

$$P_{\pi}(v) = \{w \in W : \rho_{\pi}(w, v) \leq \alpha_{\pi}(v)\}. \quad (2.3)$$

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

$$\alpha_{\pi}(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} \rho_{\pi}(\bar{w}, v)^s}{|W|} \right)^{1/s}. \quad (2.4)$$

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

$$p_{\Pi}(w|v) = |\{\pi \in \Pi : w \in P_{\pi}(v)\}|. \quad (2.5)$$

Здесь $P_{\pi}(v)$ определяется формулой (2.3), а введенный формулой (2.5) целочисленный показатель $p_{\Pi}(w|v)$ изменяется от 0 до $|\Pi|$.

Этап третий: формирование в W подмножества $P_{\Pi}(v)$ близких к v точек на основе всех характеристик Π с помощью порога максимальности $\beta_{\Pi}(v)$:

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

Порог $\beta_{\Pi}(v)$ играет роль гибкой верхней границы множества показателей $\{p_{\Pi}(w|v), w \in W\}$. Аналогично (2.4) $\beta_{\Pi}(v)$ может быть построен с помощью колмогоровского усреднения с показателем $q > 0$:

$$\beta_{\Pi}(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} p_{\Pi}(\bar{w}|v)^q}{|W|} \right)^{1/q}. \quad (2.6)$$

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

$$P_{\Pi}(B_0) = \bigcup_{v \in B_0} P_{\Pi}(v). \quad (2.7)$$

Описанный алгоритм «Барьер» обучается только по высокосейсмичному классу. Множество объектов распознавания он представляет в виде разложения $W = B \amalg H$ на высоко- и низкосейсмичные классы объектов. Очевидно, что $B = P_{\Pi}(B_0) \supseteq B_0$, а $H = W \setminus B$ [54, 127].

Результат применения алгоритма «Барьер» однозначно определяется его свободными параметрами s и q . Параметр s используется для вычисления порога α , параметр q отвечает за вычисление порога β [54, 127]. Из формул (2.4) и (2.6) очевидно, что области определения свободных параметров s и q есть $(-\infty, 0)$ и $(0, +\infty)$, соответственно.

Отметим, что итог распознавания алгоритмом «Барьер» – множество $P_{\Pi}(B_0)$ собирается из множеств $P_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$. Другими словами, общее распознавание $W \rightarrow P_{\Pi}(B_0)$ распадается на совокупность v -распознаваний $W \rightarrow P_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$.

В каждом v -распознавании приветствуется включение $B_0 \subseteq P_{\Pi}(v)$. Это позволяет определить вес $\omega(\pi | v)$ каждой характеристики $\pi \in \Pi$ в v -распознавании, согласно следующей логике: чем характеристика π больше поможет при v -распознавании на B_0 его (B_0) получить, тем она (характеристика π) лучше.

Формализовать это можно так. Обозначим через $\rho_{\pi}(B_0, v | B_0)$ совокупность мер барьера между элементами $\bar{v} \in B_0$ и $v \in B_0$:

$$\rho_{\pi}(B_0, v | B_0) = \left\{ \rho_{\pi}(\bar{v}, v | B_0), \bar{v} \in B_0 \right\}, \quad \rho_{\pi}(\bar{v}, v | B_0) = \frac{B_{\pi}(\bar{v}, v | B_0)}{|B_0|}. \quad (2.8)$$

Пусть *mes min* какая-либо конструкция меры минимальности из ДМА [6, 26,

27, 42, 45, 46, 49]. С ее помощью возникает сравнение участия любых двух характеристик π_1 и π_2 из Π в ν -распознавании на B_0 , основанное на следующей логике: характеристика π_2 в такой степени эффективнее характеристики π_1 в ν -распознавании на B_0 в какой числовое множество $\rho_{\pi_2}(B_0, \nu | B_0)$ меньше числового множества $\rho_{\pi_1}(B_0, \nu | B_0)$:

$$mes(\pi_1 < \pi_2 | \nu, B_0) = mes \min(\rho_{\pi_1}(B_0, \nu | B_0), \rho_{\pi_2}(B_0, \nu | B_0)). \quad (2.9)$$

Тогда в качестве $\omega(\pi | \nu)$ можно взять среднее:

$$\omega(\pi | \nu) = \frac{\sum_{\bar{\pi} \in \Pi} mes(\bar{\pi} < \pi | \nu, B_0)}{|\Pi|}. \quad (2.10)$$

Возвращаемся к алгоритму «Барьер» на W . Веса $\omega(\pi | \nu)$ позволяют определить качество распознавания $w \in P_{\Pi}(\nu)$ как среднее качество характеристик, участвующих в ν -распознавании w . Пусть $\Pi(w | \nu) = \{\pi \in \Pi: w \in P_{\pi}(\nu)\}$ – характеристики из Π , участвующие в ν -распознавании w . Порядок этого множества – $p_{\Pi}(w | \nu)$ (из формулы 2.5).

Положим

$$\omega(w | \nu) = \frac{\sum \omega(\pi | \nu): \pi \in \Pi(w | \nu)}{p_{\Pi}(w | \nu)}. \quad (2.11)$$

Теперь общее качество распознавания объекта w алгоритмом «Барьер»:

$$\omega(w | \text{Барьер}) = \max_{\nu \in B_0} \omega(w | \nu).$$

Общее качество алгоритма «Барьер» – соединение по $w \in P_{\Pi}(B_0)$:

$$\omega(\text{Барьер}) = * \omega(w | \text{Барьер})_{w \in P_{\Pi}(B_0)}. \quad (2.13)$$

Все последнее зависит от алгоритма «Барьер», а потому от его параметров s и q . Если параметры «добрые», то $\Pi(w | \nu) = \Pi$ для $w \in P_{\Pi}(\nu)$ и, наоборот, если s и q «злые», $P_{\Pi}(\nu) = \nu$, а потому опять для $w \in P_{\Pi}(\nu)$ $\Pi(w | \nu) = \Pi$. Следовательно на концах s и q веса $\omega(w | \nu)$ и все остальные за ними оказываются равными. Искать надо внутри.

2.2. Алгоритм «Барьер-3»

Алгоритм «Барьер», обладая несомненным преимуществом, состоящим в отсутствии необходимости обучающей выборки низкосейсмичного класса H , тем не менее, уступает классическим алгоритмам дихотомии метода ЕРА, так как не выявляет критерии высокой сейсмичности изучаемого региона [62, 127, 206].

Для количественной оценки вклада каждой из используемых геолого-геофизических и геоморфологических характеристик в формирование искомого подмножества высокосейсмичных объектов конструкция алгоритма «Барьер» дополнена несколькими вычислительными блоками [122, 127].

Эти блоки алгоритма заключаются в следующем. Параллельно с вычислением $p_{\Pi}(w|v)$ формируется бинарная матрица $M_{\Pi}(w|v)$:

$$M_{\Pi}(w|v)_{i,j} = \begin{cases} 1, & w_i \in P_{\pi_j}(v) \\ 0, & w_i \notin P_{\pi_j}(v) \end{cases}, \quad i=1, \dots, |W|, \quad j=1, \dots, |\Pi|. \quad (2.14)$$

Каждый элемент матрицы (2.14) 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 $W_{\Pi}(v)$:

$$W_{\Pi}(v)_j = \sum_k M_{\Pi}(w|v)_{k,j}, \quad w_k \in P_{\Pi}(v), \quad j=1, \dots, |\Pi|, \quad (2.15)$$

элементы которого показывают вклад характеристики $\pi_j \in \Pi$ в формирование подмножества $P_{\Pi}(v)$ объектов, близких к объекту обучения $v \in B_0$. Количественные оценки вклада характеристик в формирование подмножества $P_{\Pi}(B_0)$ 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 всех векторов $W_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$ и выбор для каждого из них

трех характеристик с наибольшими значениями, суммирование количества попаданий характеристик в сформированные таким образом тройки позволяет оценить вклад характеристик через их попадание в класс «сильнейших». Такой класс будем называть рейтингом Топ 3.

С учетом п. 2 модифицированная таким образом версия алгоритма «Барьер» получает название «Барьер-3» [122, 127]. Также как и «Барьер» алгоритм «Барьер-3» имеет два свободных параметра: s и q .

Конструкция алгоритмов «Барьер» и «Барьер-3» устроена таким образом, что объекты обучения в конечной классификации всегда попадают в высокосейсмичный класс [54, 127]. В свою очередь при распознавании алгоритмами дихотомии метода ЕРА объекты обучения как высоко-, так и низкосейсмичного классов, вообще говоря, не обязаны сохранять свою принадлежность соответствующему классу [62].

2.3. Исходные данные

Алгоритмами «Барьер» и «Барьер-3», также как и алгоритмами дихотомии, используемыми в классическом варианте метода ЕРА [62], в качестве объектов распознавания рассматриваются дизъюнктивные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов, выделяемые в рамках МСР изучаемого региона [14, 62, 190, 191, 231]. Подробно про МСР было сказано в п. 1.1.1 Главы 1.

Более чем 40-летний опыт использования МСР в задачах ЕРА в самых разных сейсмоактивных регионах земного шара при различных пороговых магнитудах показал отсутствие априорных предпочтений для отнесения к высокосейсмичным пересечений линеаментов высших рангов. Таким образом, все выделяемые в рамках МСР пересечения линеаментов априорно равноценны и в задаче множество объектов W – однородно. С другой стороны, а posteriori, ранг линеаментов может оказаться одной из существенных характеристик $\pi \in \Pi$.

Распознавание в задаче ЕРА выполняется на базе векторного представления объектов в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических характеристик. Эти характеристики должны быть априорно связаны с возможностью охарактеризовать с их помощью места высокой сейсмичности. Используемые характеристики, как правило, отражают контрастность и интенсивность новейших тектонических движений, степень тектонической раздробленности окрестностей пересечений, глубинную неоднородность и др.

Опыт исследований многочисленных регионов мира методом ЕРА сформировал список часто используемых для распознавания характеристик [62, 207]:

- максимальная и минимальная высоты, их градиент и размах;
- сочетание типов рельефа;
- площадь рыхлых толщ;
- максимальное и минимальное значения аномалии Буге, их размах и среднее значение;
- аномалия в свободном воздухе;
- максимальное и минимальное значения литосферной магнитной аномалии и их размах;
- высший ранг линеамента и число линеаментов в пересечении и в круге;
- минимальное расстояние до линеаментов первого и второго ранга,

а также другие характеристики, связанные с перечисленными.

Таким образом, объект распознавания можно трактовать двояко – как морфоструктурный узел или точку пересечения осей линеаментов или как вектор, каждая компонента которого соответствует значению одной из используемых характеристик для данного объекта.

Настоящая диссертация является одной из первых работ, в которых для описания объектов используются значения литосферных магнитных аномалий в окрестности объекта. Полученные в ней алгоритмом «Барьер-3» результаты подтверждают информативность площадных магнитных

аномалий для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

В диссертационной работе для воспроизводимости результата и усиления его достоверности значения характеристик объектов распознавания вычисляются в автоматическом режиме с помощью интеллектуальной ГИС [181, 210, 211, 214, 291], разработанной в Геофизическом центре РАН.

2.4. Информативность характеристик объектов распознавания

Перед использованием той или иной характеристики объектов необходимо убедиться в ее информативности в контексте решаемой задачи распознавания. Для этого следует оценить возможность отделить только по этой характеристике высокосейсмичные объекты от низкосейсмичных. В работе [207] приводится описание методики оценки информативности для случая с двумя классами обучения: V_0 и H_0 .

Оценка осуществляется следующим образом. Интервал изменения характеристики делится на сегменты (2 или 3) так, чтобы количество объектов распознавания в каждом сегменте было одинаковым. Затем вычисляется процент объектов из V_0 и H_0 в каждом из сегментов. Показателем информативности P рассматриваемой характеристики для разделения объектов распознавания на два класса является максимум модулей разностей этих процентов по всем сегментам. В работах по распознаванию методом ЕРА, как правило, характеристика считалась информативной, если $P \geq 15\%$.

В диссертационной работе этот прием оценки информативности модифицируется на случай одного класса обучения. Для каждой из характеристик $\pi \in \Pi$ в качестве V_0 берутся объекты распознавания, в окрестности которых известны эпицентры сильных ($M \geq M_0$) землетрясений. В силу отсутствия в алгоритмах «Барьер» и «Барьер-3» низкосейсмичного класса обучения в качестве второго множества оценки информативности π

берется множество $W \setminus B_0$ всех объектов, не вошедших в B_0 . Таким образом, разбиение осуществляется на два сегмента. В качестве информативных характеристик берутся те, для которых $P \geq 10\%$.

2.5. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье

2.5.1. Регион

Рассматриваемая здесь сейсмически активная зона Алтай-Саяны-Прибайкалье лежит в пределах $49^\circ - 56^\circ$ с.ш., $82^\circ - 111^\circ$ в.д. Она включает в себя северо-восточную часть сейсмического региона Северной Евразии «Алтай и Саяны» и западную часть сейсмического региона «Прибайкалье и Забайкалье» [149].

Алтае-Саянская складчатая область занимает среднюю часть Урало-Монгольского пояса гор, относящихся к новейшему орогеническому поясу Внутренней Азии, расположенному между Сибирской и Индостанской платформами [117]. Территория Алтае-Саянской складчатой области характеризуется сложным горно-котловинным рельефом. Ее границы определены разломами и смещениями блоковых структур в результате многократных тектонических движений. В Алтае-Саянской области сложно сочетаются разновозрастные складчатые сооружения – добайкальские срединные массивы, салаирские (на северо-востоке), каледонские (в средней части), ранне- и позднегерцинские (на западе и юго-западе) складчатые системы самых различных простираний, а также наложенные сингерцинские впадины и прогибы.

Формирование тектонических структур фундамента завершилось здесь в герцинскую эпоху складчатости, современный горный рельеф оформился в позднем кайнозое (олигоцен-четвертичное время) в результате

тектонической активизации [31, 174]. Землетрясения, происходящие регулярно в этой зоне, свидетельствуют об активном процессе разрушения земной коры и горообразования [131].

Прибайкалье – горная область на юге Восточной Сибири, включающая южную часть Сибирской платформы и Байкальскую рифтовую зону. Территория Прибайкалья характеризуется разнородным геологическим строением. Структурные элементы Прибайкалья относятся к системам байкальской и каледонской эпох складчатости (~ 650 – 350 млн. лет) [174]. Главной структурой региона является Байкальская рифтовая зона протяженностью около 2 500 км – дивергентная граница между Евразийской плитой и Амурской микроплитой, расположенная в районе озера Байкал и Восточных Саян. Байкальской рифтовой зоне свойственна высокая сейсмическая активность: здесь происходит наибольшее количество землетрясений Прибайкалья.

Подробное описание геологии, тектоники и сейсмичности изучаемого региона Алтай-Саяны-Прибайкалье приведено в [31, 131, 151, 169, 185, 192, 195, 199, 200, 244] и разделах 5.2 и 5.5 Главы 5 диссертации.

2.5.2. Исходные данные

В работе [113] построена схема МСР региона Алтай-Саяны-Прибайкалье. На схеме выделено 97 пересечений морфоструктурных линеаменов трех рангов (рис. 2.1).

Ранее в [113] с помощью алгоритма «Кора-3» (см. п. 1.1.5) было выполнено независимое от настоящего диссертационного исследования распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье.

Как в алгоритме «Кора-3» [113], так и в настоящем диссертационном исследовании с помощью алгоритма «Барьер-3» обучающая выборка высокосейсмического класса формировалась на основе каталогов коровых

землетрясений [113, 157, 183, 274] исследуемого региона с $M \geq 6.0$ с 1900 г. по настоящее время (табл. 2.1). Эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ показаны на рис. 2.2.

Таблица 2.1

Землетрясения с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	09.07.1905	49.71	98.48	8.3
2.	23.07.1905	49.37	96.61	8.3
3.	25.08.1922	50.00	91.00	6.6
4.	19.10.1938	49.50	90.30	7.1
5.	04.04.1950	51.77	101.00	6.9
6.	06.02.1957	50.00	105.50	6.3
7.	29.08.1959	52.68	106.98	6.1
8.	15.05.1970	50.18	91.27	6.3
9.	27.12.1991	51.12	98.15	6.4
10.	27.09.2003	50.04	87.81	7.3
11.	27.09.2003	50.09	87.76	6.4
12.	01.10.2003	50.21	87.72	6.7
13.	27.08.2008	51.61	104.16	6.3
14.	27.12.2011	51.84	95.91	6.6
15.	26.02.2012	51.71	95.99	6.7

Был выполнен анализ приуроченности эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ к пересечениям осей морфоструктурных линеаментов [113], который показал, что в рассматриваемом регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ расположены в достаточно малых окрестностях пересечений линеаментов.

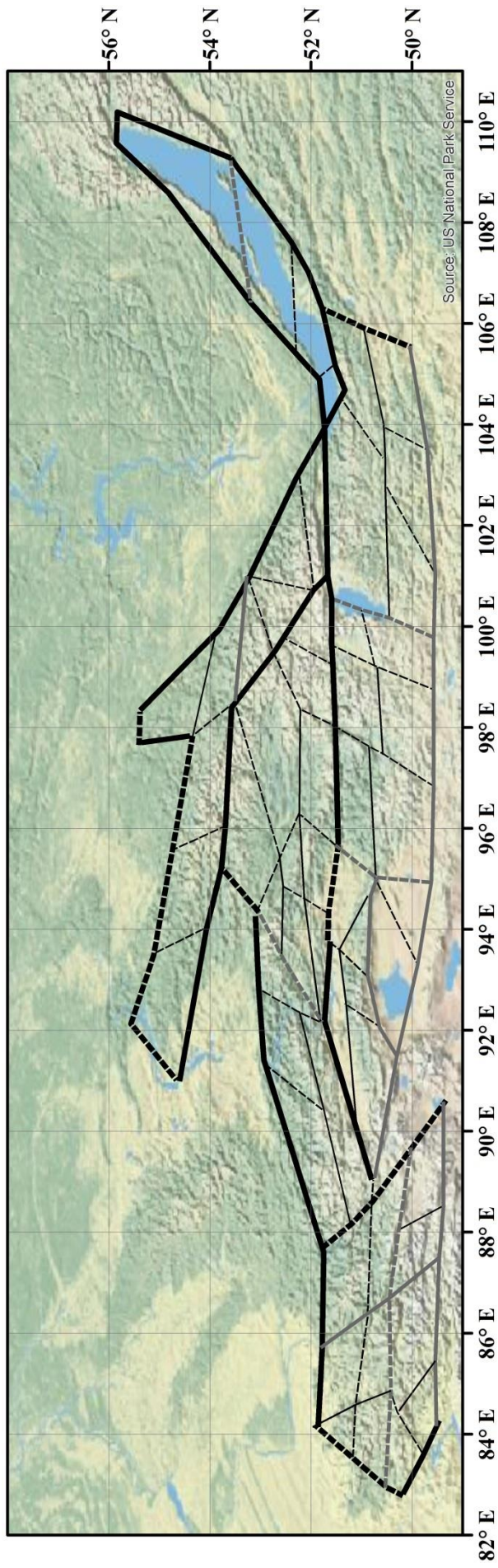


Рис. 2.1. Схема морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье. Толстые черные линии –
 линеаменты I-го ранга, средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга [113]. Сплошными линиями
 показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные

В итоге, как в алгоритме «Барьер-3» в диссертационном исследовании, так и в алгоритме «Кора-3» в [113] в качестве обучающей выборки высокосейсмичного класса использовались 16 пересечений осей морфоструктурных линеаментов, в 50-км окрестности которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$. Эти пересечения показаны на рис. 2.2 сиреневыми кругами.

В алгоритме «Кора-3» [113] обучающая выборка низкосейсмичного класса была составлена из 51 объекта, в 50-км окрестности которых не известны эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$ (зеленые круги на рис. 2.2). Остальные 30 объектов распознавания (черные круги на рис. 2.2) составили материал экзамена алгоритма «Кора-3» [113].

Радиус окрестности объектов распознавания $w \in W$, где вычисляются значения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик, зависит от магнитуды распознаваемых землетрясений [62, 206]. При распознавании в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье для порога магнитуды $M_0 = 6.0$ использовались круги радиусом 25 км.

Исходный перечень рассматриваемых характеристик объектов распознавания приведен в табл. 2.2. По итогам оценки информативности характеристик для случая одного класса обучения было принято решение использовать при распознавании алгоритмом «Барьер-3» 7 характеристик $\pi \in \Pi$ (выделены в табл. 2.2 жирным шрифтом). Отметим, что для всех этих характеристик показатель информативности $P \geq 15\%$. Для характеристики площадь четвертичных пород (табл. 2.2) $P = 9.3\%$. Для всех остальных характеристик $P \leq 8.1\%$.

В работе [113] при распознавании алгоритмом «Кора-3» использовались 9 характеристик (выделены в табл. 2.2 курсивом), отобранные авторами по итогам оценки информативности характеристик для случая с двумя классами обучения.

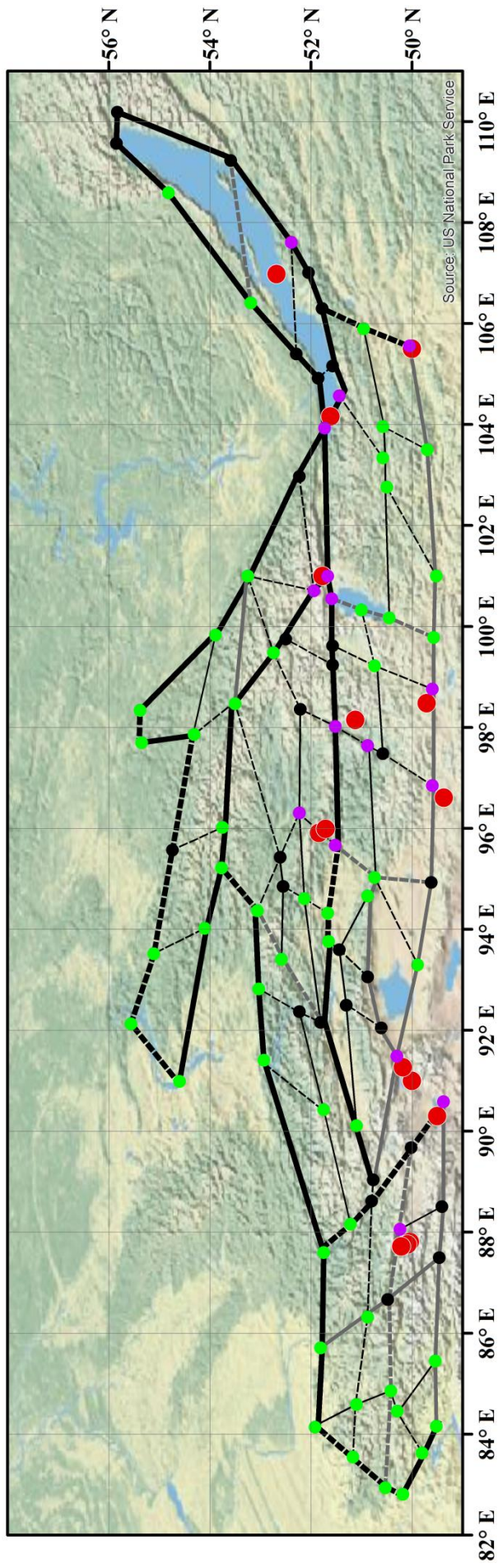


Рис. 2.2. Схема МСР региона Алтай-Саяны-Прибайкалье. Сиреневые круги – обучающая выборка (пересечения осей
 линеаментов) высокосейсмичного класса алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3», зеленые – обучающая выборка
 низкосейсмичного класса алгоритма «Кора-3», черные – объекты распознавания, не вошедшие в обучающие
 выборки алгоритма «Кора-3» (материал экзамена). Красные круги – эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$

Из табл. 2.2 легко заметить, что 5 характеристик использовались при распознавании обоими алгоритмами. Это – минимальная высота (H_{min}), сочетание типов рельефа (Top), максимальное (B_{max}) и минимальное (B_{min}) значения аномалии Буге и их размах (dB).

Таблица 2.2

Полный перечень характеристик объектов распознавания в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Жирным шрифтом выделены 7 информативных характеристик для алгоритма «Барьер-3». Курсивом – 9 информативных характеристик для алгоритма «Кора-3»

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

2.5.3. Распознавание алгоритмом «Барьер-3»

Результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученные с помощью алгоритма «Барьер-3», показаны эллипсами на рис. 2.3.

По итогам распознавания со значениями свободных параметров $s = -3.1$ и $q = 5.3$ (см. формулы 2.4 и 2.6) 32 объекта из рассматриваемых 97 были отнесены к высокосейсмичному классу (рис. 2.3). Совокупность этих 32-х объектов интерпретируется нами, согласно постулату метода ЕРА, как определяющая зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье.

Из интерпретации результатов модуля распознавания алгоритмом «Барьер-3» как блока ЕРА [62] следует, что собственно искомые высокосейсмичные зоны есть объединение кругов радиуса 25 км с центрами в соответственных точках 32 пересечений осей линеаментов (рис. 2.3). Заметим, что помимо 16 объектов распознавания, входящих в обучающую выборку и объявленных тем самым, а priori, высокосейсмичными (на рис. 2.3 показаны сплошными эллипсами), 16 объектов экзамена из 81 были распознаны как высокосейсмичные.

На рис. 2.4а представлена гистограмма, характеризующая средний вклад характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» искомого высокосейсмичного множества пересечений. На рис. 2.4б показан их вклад, выраженный через попадание в рейтинги Топ 3 (см. п. 2.2). По оси ординат на рис. 2.4а показано среднее количество «срабатываний» характеристик при распознавании искомого множества $P_{II}(B_0)$ (см. выше), на рис. 2.4б – количество попаданий в тройки «сильнейших» характеристик.

Из рис. 2.4 видно, что при распознавании высокосейсмичных зон алгоритмом «Барьер-3» наиболее значимыми характеристиками объектов оказались гравитационные аномалии (V_{max} и V_{min}), сочетание типов рельефа (Тор) и расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга (R2).

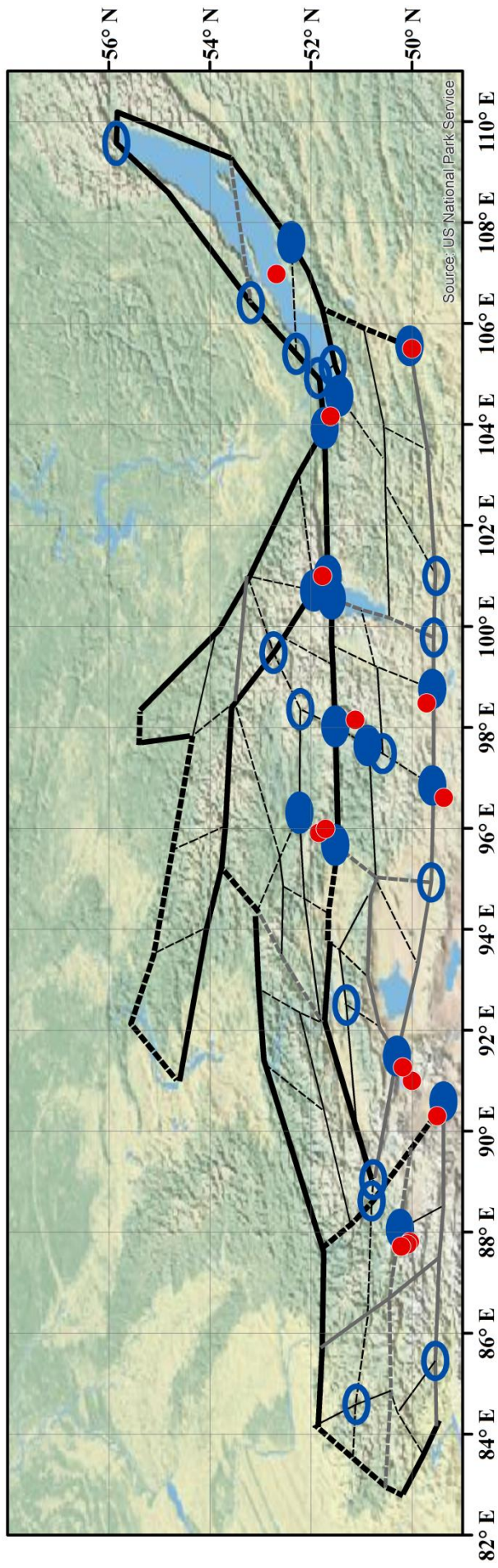


Рис. 2.3. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, распознанные алгоритмом «Барьер-3», и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$. Сплошными эллипсами показано множество обучения единственного высокосейсмичного класса

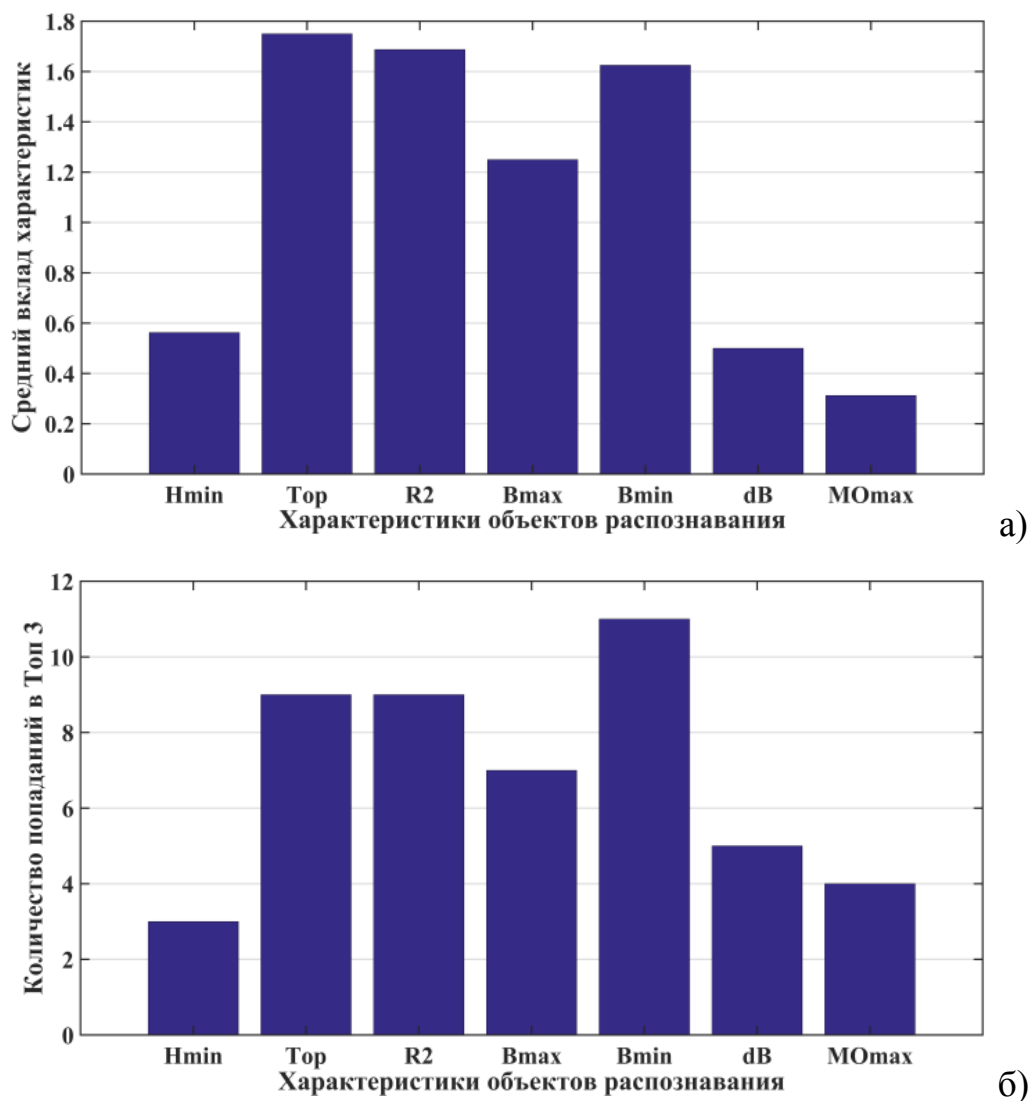


Рис. 2.4. Вклад характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» высокосейсмичного множества пересечений линеаментов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье: а) средний вклад характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших»

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 $B_{max} \leq -160$ мГал и $B_{min} \leq -220$ мГал), контрастными сочетаниями типов рельефа – горы / предгорье и горы / горы. Для них характерны высокие значения магнитной аномалии (MO_{max}), концентрация

dB вокруг 60 мГал и 120 мГал, концентрация N_{min} менее -1 000 м и более 1 000 м.

Из рис. 2.4 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.

2.5.4. Сравнение классификаций, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3»

Как уже отмечалось, распознавание алгоритмом «Кора-3» мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье было выполнено в 2018 г. чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьевым и д.ф.-м.н. А.И. Горшковым в [113]. На рис. 2.5 представлен результат распознавания алгоритмом «Кора-3».

В результате применения сформированных алгоритмом «Кора-3» решающих правил (см. п. 1.1) все 16 объектов обучения высокосейсмичного класса были распознаны как высокосейсмичные [113]. Отметим, что в отличие от алгоритма «Барьер-3» в алгоритме «Кора-3» это не гарантировано и говорит в пользу достоверности полученного в [113] результата. Кроме того, к высокосейсмичным отнесены 3 объекта из обучающей выборки низкосейсмичного класса и 14 объектов, которые составляли материал экзамена. Тридцать три пересечения линеаментов (34% от общего числа объектов), распознанные как высокосейсмичные в [113], показаны на рис. 2.5 эллипсами белого цвета.

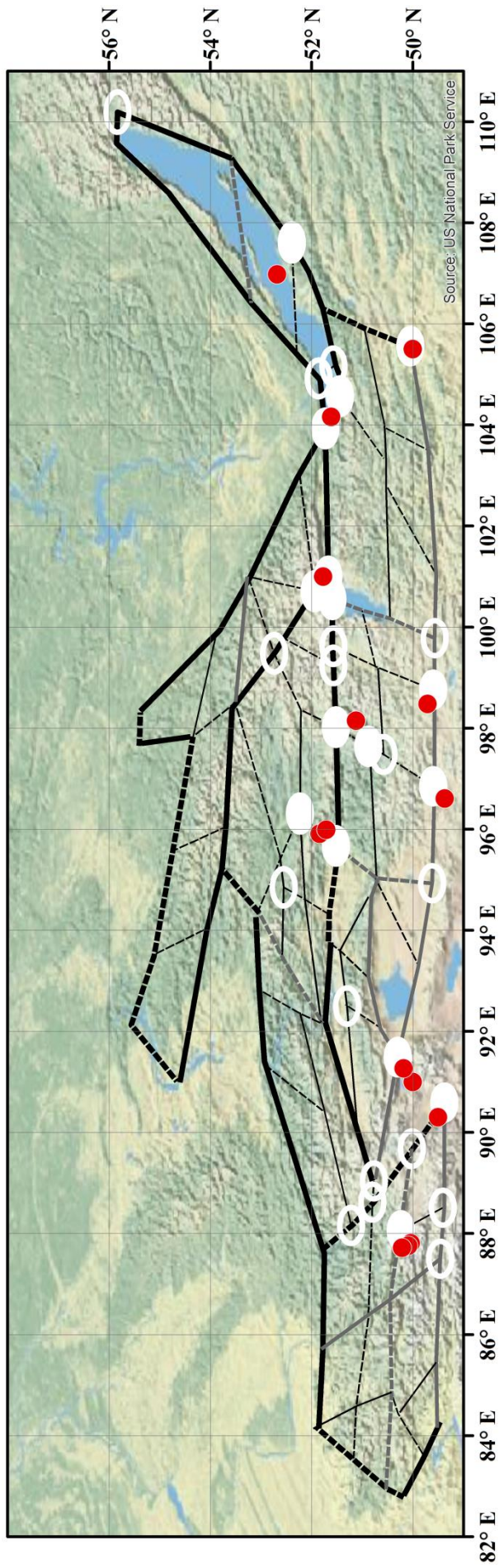


Рис. 2.5. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, распознанные алгоритмом «Кора-3», и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$. Сплошными эллипсами показано множество объектов обучения высокосейсмичного класса

Характеристики объектов, вошедшие в сформированные алгоритмом «Кора-3» решающие правила для формирования высоко- и низкосейсмичных классов, указывают на повышенную контрастность новейших тектонических движений и существенную тектоническую раздробленность в окрестности высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линеаментов [113].

На рис. 2.6 показано сравнение результатов распознавания, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Пересечения морфоструктурных линеаментов, распознанные алгоритмом «Барьер-3» как опасные для $M \geq 6.0$, обозначены пустыми эллипсами с синими границами, а алгоритмом «Кора-3» – белыми эллипсами. Таким образом, объекты, распознанные обоими алгоритмами, показаны белыми эллипсами с синими границами.

Напомним, что алгоритм «Барьер-3» распознал как высокосейсмичные 32 пересечения, а «Кора-3» – 33. При этом 25 одних и тех же объектов отнесены к высокосейсмичному классу обоими алгоритмами. Заметим также, что оба алгоритма распознали как высокосейсмичные все объекты из обучающей выборки этого класса (для алгоритма «Барьер-3» это автоматически следует из его математической конструкции).

Отметим, «Барьер-3» классифицировал как опасные 6 из 51 объекта обучающей выборки низкосейсмичного класса «Коры», алгоритм «Кора-3» – лишь 3 из 51. При этом два из них отнесены к опасным обоими алгоритмами. Следовательно, 44 объекта обучения низкосейсмичного класса оба алгоритма распознали как неопасные для магнитуды $M \geq 6.0$. Это означает, что почти все различия в классификации алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» приходится на множество объектов распознавания изначально не отнесенных к обучающим выборкам и составившим экзамен алгоритма «Кора-3» (20 объектов классифицированы одинаково обоими алгоритмами и 10 – различно).

Из рис. 2.3, 2.5 и 2.6 видно, что различия в классификации объектов алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» наблюдаются в Чуйской степи и

предгорьях Курайского и Чулышманского хребтов на Восточном Алтае. Здесь «Кора-3» распознал на 4 пересечения линеаментов больше. Различия также наблюдаются на Окинском плоскогорье, ограниченном Окинским хребтом и южной частью Восточных Саян, и на северном и западном побережьях озера Байкал.

Если в качестве итогового результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье рассматривать объединение подмножеств пересечений линеаментов, классифицированных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как опасные, то из рис. 2.6 можно заключить, что они группируются вдоль границ горных систем [113]. Так высокосейсмичным является продольный линеамент II-го ранга, отделяющий изучаемый регион от Монгольского Алтая. 4 из 5 находящихся на нем пересечений распознаны как опасные. Аналогично высокосейсмичным является поперечный линеамент I-го ранга (4 из 5 пересечений), отделяющий Восточный Алтай от Западного Саяна. На продольном линеаменте I-го ранга, отделяющем Западный и Восточный Саяны от горных хребтов Хангая распознаны как высокосейсмичные все 7 пересечений.

На юге рассматриваемого региона классифицированы как высокосейсмичные 8 из 10 объектов на продольном линеаменте II-го ранга. 6 из 7 объектов объявлены опасными на поперечном линеаменте III-го ранга в центральном сегменте изучаемого региона. Результатами алгоритма «Барьер-3» сейсмоопасным признан продольный линеамент I-го ранга, обрамляющий западное побережье озера Байкал [113].

На рис. 2.6 красной звездой показан эпицентр корового землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г. с $M = 6.7$ [276]. Это землетрясение произошло после выполнения описанных здесь независимых распознаваний алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» и, тем самым, является материалом чистого экзамена для обоих алгоритмов. Из рис. 2.6 видно, что эпицентр располагается вне окрестностей (круги радиусом 25 км) пересечений

линеаментов, распознанных как высокосейсмичные обоими алгоритмами. То есть эпицентр этого землетрясения является ошибкой типа «пропуск цели» для обоих алгоритмов.

В то же время он расположен на расстоянии 42 км от ближайшего к нему пересечения линеаментов, распознанного как высокосейсмичное обоими алгоритмами. Напомним, что при формировании материала обучения высокосейсмичного класса (п. 2.5.2) считалось, что эпицентр приурочен к пересечению, если находится на расстоянии не более 50 км от него. С этой точки зрения можно сделать вывод, что эпицентр землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г., приурочен к пересечению линеаментов, распознанному как высокосейсмичное, но располагается за пределами, показанной на рис. 2.6, его 25-км окрестности, используемой для вычисления значений геолого-геофизических и геоморфологических характеристик.

Из рис. 2.4 и работы [113] можно заключить, что критерии высокой сейсмичности, выявленные алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», достаточно хорошо согласуются. В обоих случаях они говорят о наличии сложной структуры разрывных нарушений вблизи пересечений линеаментов, а также об общей высокой интенсивности тектонических движений.

Из вышесказанного следует, что результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений ($M \geq 6.0$) в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученные алгоритмами «Барьер-3» (один класс обучения) и «Кора-3» (два класса обучения), достаточно хорошо согласуются. С одной стороны это говорит в пользу достоверности обоих результатов, т.к. распознавание производилось независимо. С другой стороны, при интерпретации различий (15.5% от общего числа объектов распознавания) в результатах возможно следует отдавать предпочтение классификации алгоритмом «Барьер-3». Действительно, в этом варианте распознавание было выполнено на основе обучения, не содержащего явных ошибок.

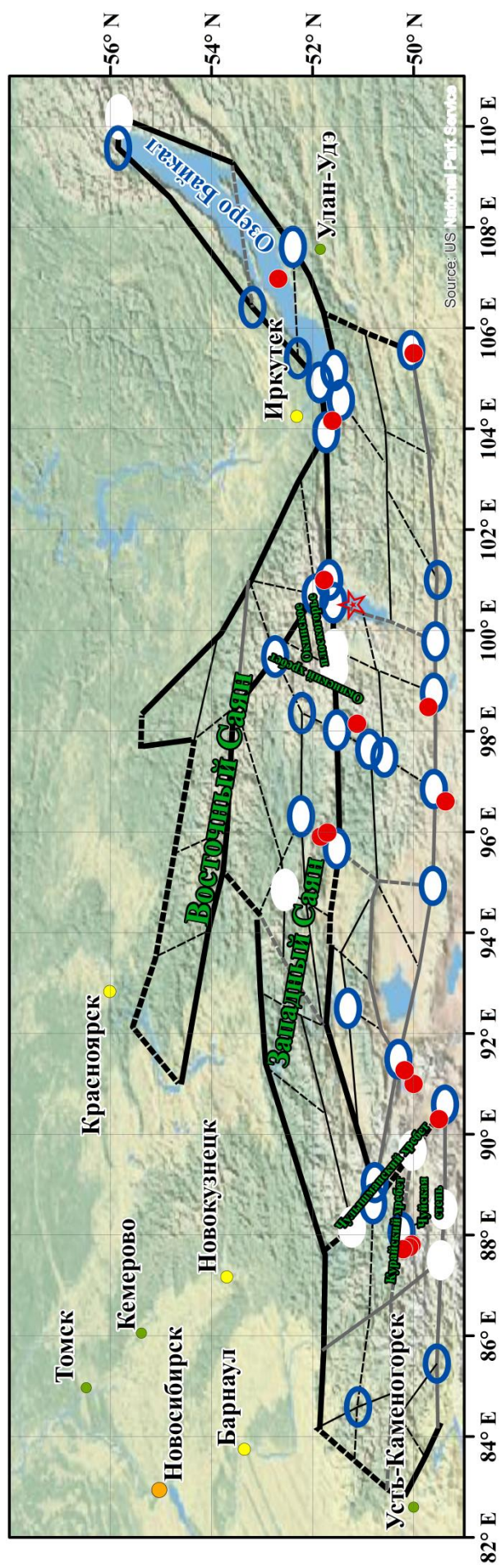


Рис. 2.6. Схема сравнения результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Пустыми эллипсами с синими границами показаны пересечения линейментов, распознанные как высокосейсмичные алгоритмом «Барьер-3», белыми эллипсами – алгоритмом «Кора-3», красными эллипсами с синими границами – обоими алгоритмами. Красные круги – эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ (табл. 2.1). Красная звезда – эпицентр корового землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г. с $M = 6.7$ [276]

Полученные здесь результаты распознавания использованы, в частности, для оценки влияния возможных землетрясений с $M \geq 6.0$ Алтае-Саянской орогенной области на сейсмическую опасность зоны контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты (Нижне-Канский гранитоидный массив). В отсутствие достоверных исторических и современных инструментальных данных о сейсмичности Нижне-Канского массива такая оценка его сейсмической опасности имеет существенное геозоологическое значение в связи с проектированием и строительством в его пределах пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ПГЗРО) [16, 56, 314, 289]. Участок «Енисейский» (рис. 2.7) в пределах которого планируется строительство ПГЗРО располагается на западной границе Нижне-Канского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов [16, 56, 179].

Анализ результатов, полученных с помощью алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3» показал следующее. Места возможного возникновения землетрясения с $M \geq 6.0$, приуроченные к пересечениям линеаментов Алтае-Саянского орогенного пояса, находятся на расстоянии более 400 км (рис. 2.7) от ПГЗРО. Если воспользоваться классической формулой связи интенсивности сотрясений I с магнитудой M и эпицентральной расстоянием R землетрясения [225]:

$$I = 1.5 M - 3.5 \lg R + 3.0,$$

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

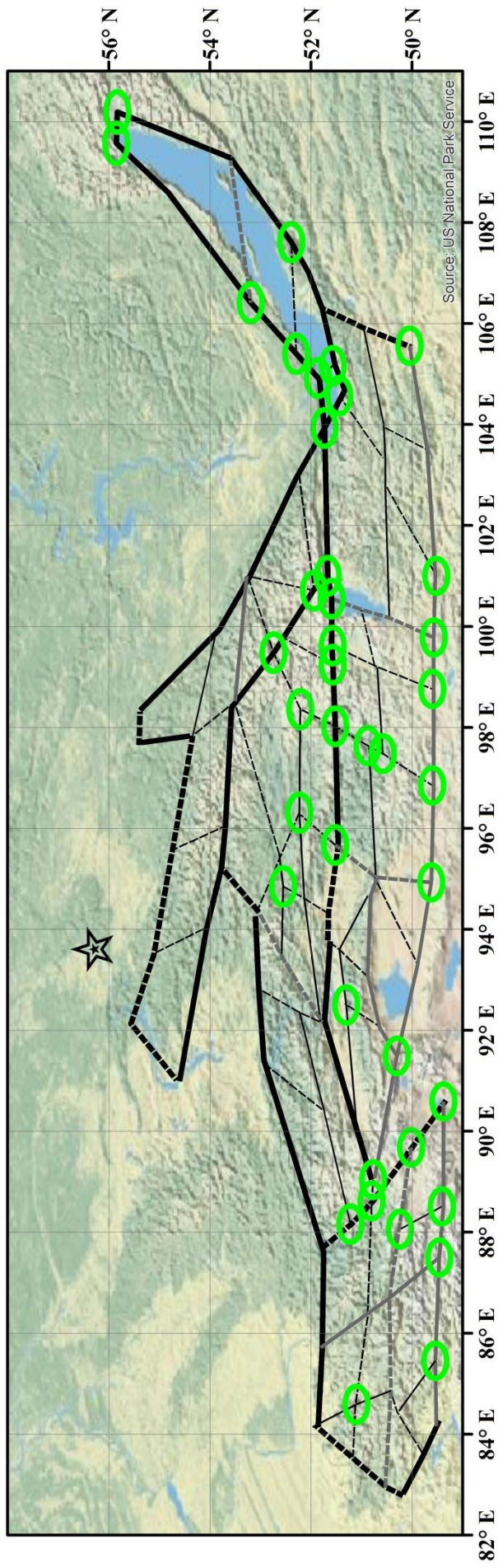


Рис. 2.7. Объединенный результат распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье (эллипсы с зелеными границами).

Звездой отмечено расположение участка «Енисейский»

Таким образом, места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, распознанные в диссертационной работе 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.

2.6. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе

2.6.1. Регион

Кавказ является частью Альпийско-Гималайского складчатого пояса расположенной между Черным и Каспийским морями и представляет собой сложно построенную систему альпийских складчатых сооружений с активными новейшими тектоническими движениями. Современная структура, геодинамика и сейсмичность Кавказского региона определяются субмеридиональным сжатием, связанным с продолжающимся сближением Африкано-Аравийской и Евразийской плит литосферы [196].

В тектонической структуре Кавказа выделяется ряд продольных зон: зона Предкавказских краевых прогибов, структура Большого Кавказа, Закавказская зона межгорных прогибов, структура Малого Кавказа и Среднеараксинский межгорный прогиб. Поперечная зональность выражена в наличии субмеридиональной зоны Транскавказского поперечного поднятия, пересекающего все продольные зоны, и параллельных ей ступеней, понижающихся к западу и к востоку от нее [174, 221].

Предкавказье занимает обширную территорию, в основе которой лежит Скифская эпигерцинская плита. В южной части Предкавказья расположены два передовых прогиба – Индоло-Кубанский и Терско-Каспийский, разделенные Минераловодской седловиной. Прогибы заполнены

кайнозойскими отложениями, мощность осадочного чехла доходит до 12 км, фундамент сложен байкальскими массивами и палеозойскими складчатыми системами. В осевой зоне Терско-Каспийского прогиба выделяются две крупные антиклинали Терская и Сунженская. Минераловодская седловина лежит на оси Транскавказского поперечного поднятия [174]. Терско-Каспийский краевой прогиб характеризуется значительной сейсмичностью с мелкими очагами землетрясений (2 – 10 км).

Большой Кавказ представляет собой горное сооружение альпийского возраста, простирающееся в северо-западном–юго-восточном направлении от Тамани почти до Баку. Протяженность Большого Кавказа 1 300 км при ширине до 150 км [221]. В главном хребте высоты достигают 4 – 5 км, самая высокая точка – вулкан Эльбрус (5 642 м).

Складчатая система Большого Кавказа отличается асимметричностью строения с отчетливо выраженным осевым поднятием. Выделяются ядро, широкое северное крыло, относительно просто построенное, смятое в крупные складки и осложненное поперечными поднятиями, и более узкое и более сложно построенное южное крыло – для него характерны сжатые складки с тенденцией надвигания и опрокидывания на юг [174]. Асимметрия Большого Кавказа также связана с наличием очень узкой и крутой зоны южного склона, ограниченной со стороны межгорных впадин активным в настоящее время поясом надвигов, а со стороны Черного моря зоной сбросов, вдоль которой отмечается активное проявление сейсмичности. Северный склон более пологий и также ограничивается зоной глубинных разломов весьма активной в новейшее время, что проявляется в повышенной сейсмичности [196].

Большой Кавказ имеет ярко выраженную поперечную зональность. Субмеридиональные разломы делят его на три крупных поперечных сегмента – Северо-Западный, Центральный и Юго-Восточный. Наиболее высокоподнятое положение занимает Центральный сегмент, а два других ступенчато погружаются от него в стороны Азово-Черноморской и

Каспийской депрессий [176, 221]. Поперечные нарушения в структуре Большого Кавказа, как правило, являются высокоамплитудными сбросами, нередко имеющими сдвиговую компоненту [196].

На Центральном Кавказе находится отчетливо выраженное осевое поднятие, сложенное дислоцированными и сильно метаморфизованными породами протерозоя и нижнего палеозоя. Этот сегмент лежит в полосе Транскавказского поперечного поднятия.

Северо-западный сегмент, отделенный от Центрального системой Пшехско-Адлерских поперечных глубинных разломов, более узкий и менее приподнятый по сравнению с Центральным, он переходит в Таманско-Керченскую зону поперечного погружения с длительно проявляющимся грязевым вулканизмом.

Юго-восточный сегмент отделен от Центрального Транскавказским глубинным разломом, характеризуется быстрым погружением в восточном направлении структур и осевой зоны сооружения. Сегмент переходит в Апшеронскую зону поперечного погружения, схожую во многом с Таманско-Керченской. Здесь также широко распространены грязевые вулканы [176, 177].

Закавказье – межгорная зона, расположенная между сооружениями Большого и Малого Кавказа. Кахетино-Лечхумский глубинный разлом отделяет Большой Кавказ от этой зоны, где выделяются Рионский и Куринский межгорные прогибы, выполненные мощной толщей (3 – 8 км) плиоцен-четвертичных орогенных образований и разделенные Дзирульским выступом, в котором обнажается древний байкальский и палеозойский фундамент. Прогибы, расширяясь и углубляясь к западу и востоку, переходят в Черноморскую и Южно-Каспийскую глубоководные впадины [176, 177]. Межгорные прогибы характеризуются сложной новейшей структурой, наличием молодой складчатости и молодых сдвиговых нарушений [196].

Малый Кавказ представляет собой внутреннее складчатое сооружение альпийской области. Это сложная система хребтов, вулканических нагорий и

плато. Протяженность Малого Кавказа около 600 км, высота вершин до 4-х километров, высочайшая вершина – гора Арагац (4 090 м). В плане Малый Кавказ представлен широкой (150 – 200 км) выпуклой к северу дугой с перегибом к югу от Дзирульского выступа, т.е. в зоне Транскавказского поперечного поднятия. По тектоническому строению Малый Кавказ отличается от Большого Кавказа отсутствием главного осевого хребта, выделяется несколько антиклинориев и синклинориев с относительно простой складчатой структурой [176]. Для этой складчатой системы характерны кулисообразно подставляющие друг друга поднятия с амплитудой воздымания до 3.5 км, хотя в среднем они меньше. На Малом Кавказе новейшие движения наиболее проявились в западной и северо-западной частях, в пределах озера Севан и западнее. Этот район характеризуется повышенной сейсмичностью [196].

С юга Малый Кавказ ограничен узким Среднеараксинским межгорным прогибом. Фундамент впадины погружен на глубину до 5 км, чехол сложен эоцен-неогеновой молассой с прослоями молодых лав.

Современный облик Кавказа сформировался на новейшей (позднеорогенной) стадии тектонического развития, охватывающей период около последних 10 млн. лет. Этот период характеризуется значительной активизацией тектонических движений и вулканической деятельности. На этой стадии благодаря возрастанию роли восходящих движений возникли мощные горные сооружения, происходило углубление и расширение краевых прогибов и межгорных впадин. К областям, испытавшим устойчивые новейшие поднятия, относятся две крупные продольные зоны – сооружения Большого и Малого Кавказа. К зонам устойчивых погружений принадлежат Азовская и Черноморская депрессии на западе и Южно-Каспийская депрессия и западная часть Среднекаспийской на востоке. На остальной части территории Кавказа происходили существенные изменения направленности вертикальных тектонических движений; в ряде случаев знак движений менялся несколько раз. Процессы складкообразования

происходили в зонах краевых и межгорных депрессий и в некоторых участках Большого и Малого Кавказа. Поднятие сопровождалось активными движениями в зонах глубинных разломов и значительной вспышкой вулканизма преимущественно в зоне Транскавказского поперечного разлома и оперяющих его разрывов [175].

В современную эпоху тектоническое развитие Кавказа продолжается. Поднятие Большого и Малого Кавказа, погружение впадин, рост складок и движения по глубинным разломам продолжаются, о чем свидетельствуют значительный размах современных движений и значительная сейсмичность Кавказа.

Повторные нивелировки на территории Кавказа позволили установить не только направление, но и скорость тектонических движений. В Большом и Малом Кавказе скорости поднятия составляют до 10 мм/год и более и скорости опускания (в прогибах) до 6 мм/год, но характер распределения скоростей различен. Платформенные области в целом более стабильны – средние скорости редко превышают 2 мм/год [146, 154].

В целом для горных сооружений Кавказа характерно нарастание интенсивности и контрастности современных вертикальных движений с запада на восток. Скорости поднятий, достигающие на Западном Кавказе 0 – 2 мм/год, увеличиваются в осевой зоне Центрального Кавказа до 10 – 13 мм/год. С запада на восток, в сторону активизированных областей, нарастают также градиенты современных вертикальных движений, интенсивность, плотность, частота и глубина землетрясений [168].

Для центрального сектора Большого Кавказа отмечается различие направления современных горизонтальных движений поверхности по данным измерений методами спутниковой геодезии (GPS) [188]. При общей тенденции смещений пунктов измерений в северном направлении в Закавказье и на северном склоне горно-складчатого сооружения Большого Кавказа, на южном склоне имеется ряд мест, где фиксируются движения на юг [197].

Результаты геодинимических исследований на территории Кавказского региона с использованием GPS-технологии в 1991 – 1994 гг. показали существование быстрого горизонтального перемещения Мисхано-Зангезурского срединного массива Малого Кавказа относительно неподвижного Северо-Кавказского краевого массива к северу. Установлено также, что скорости смещений подвижной системы Малого Кавказа относительно Северо-Кавказского краевого массива уменьшаются с юга на север и с востока на запад, что можно трактовать как неравномерное горизонтальное сокращение горной области Кавказа в различных ее частях [196].

Характер современных движений на территории Кавказского региона в значительной мере определяет его сейсмическую активность и размещение очагов сильных землетрясений. Наибольшее сгущение эпицентров землетрясений и максимальная их интенсивность соответствуют участкам сопряжения новейших структур с движениями различных знаков (поднятиями и опусканиями). Эпицентры землетрясений приурочены к границе областей поднятий и относительных опусканий (предгорий, межгорных и предгорных прогибов) и имеют как общекавказское, так и меридиональное направления. Транскавказское поперечное поднятие является зоной повышенной сейсмической активности. В его пределах концентрируются главные сильные землетрясения Закавказья [249].

2.6.2. Исходные данные

В работе [205] была построена схема МСР Кавказа. На ней выделено 237 пересечений осей морфоструктурных линеаменов трех рангов (рис. 2.8).

Ранее в работах [205, 207] с помощью алгоритма «Кора-3» было выполнено независимое от настоящего диссертационного исследования распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе. В [207] представлены результат распознавания как с

использованием литосферных магнитных аномалий в качестве характеристик объектов распознавания, так и результат без их использования. В [205] представлен только результат распознавания без использования литосферных магнитных аномалий.

В силу несомненной важности площадных магнитных характеристик для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в качестве основного результата распознавания алгоритмом «Кора-3» на Кавказе будем использовать высокосейсмичные зоны, полученные в [207] с использованием геомагнитных характеристик.

Как в алгоритме «Кора-3» [207], так и в настоящем диссертационном исследовании с помощью алгоритма «Барьер-3» обучающая выборка высокосейсмичного класса формировалась на основе каталога коровых землетрясений [22, 157, 183, 310] Кавказа с $M \geq 6.0$ (табл. 2.3). Эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ показаны на рис. 2.9.

По аналогии с регионом Алтай-Саяны-Прибайкалье для Кавказа был выполнен анализ приуроченности эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ к пересечениям морфоструктурных линеаментов [205, 207]. Он показал, что на Кавказе все 59 эпицентров рассматриваемых землетрясений с $M \geq 6.0$ (табл. 2.3) расположены в окрестностях пересечений линеаментов.

Как в алгоритме «Барьер-3» в настоящем исследовании, так и в алгоритме «Кора-3» в [207] в качестве обучающей выборки высокосейсмичного класса использовались лишь 16 пересечений морфоструктурных линеаментов, в 25-км окрестности которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ за период 1900 – 1992 гг. (рис. 2.9). Уместность такого подхода к формированию обучения обусловлена тем, что более ранние события из табл. 2.3 произошли, когда инструментальная регистрация эпицентров не проводилась. Тем самым их эпицентры определены заведомо не точно и не могут быть источником данных для формирования множества обучения [249].

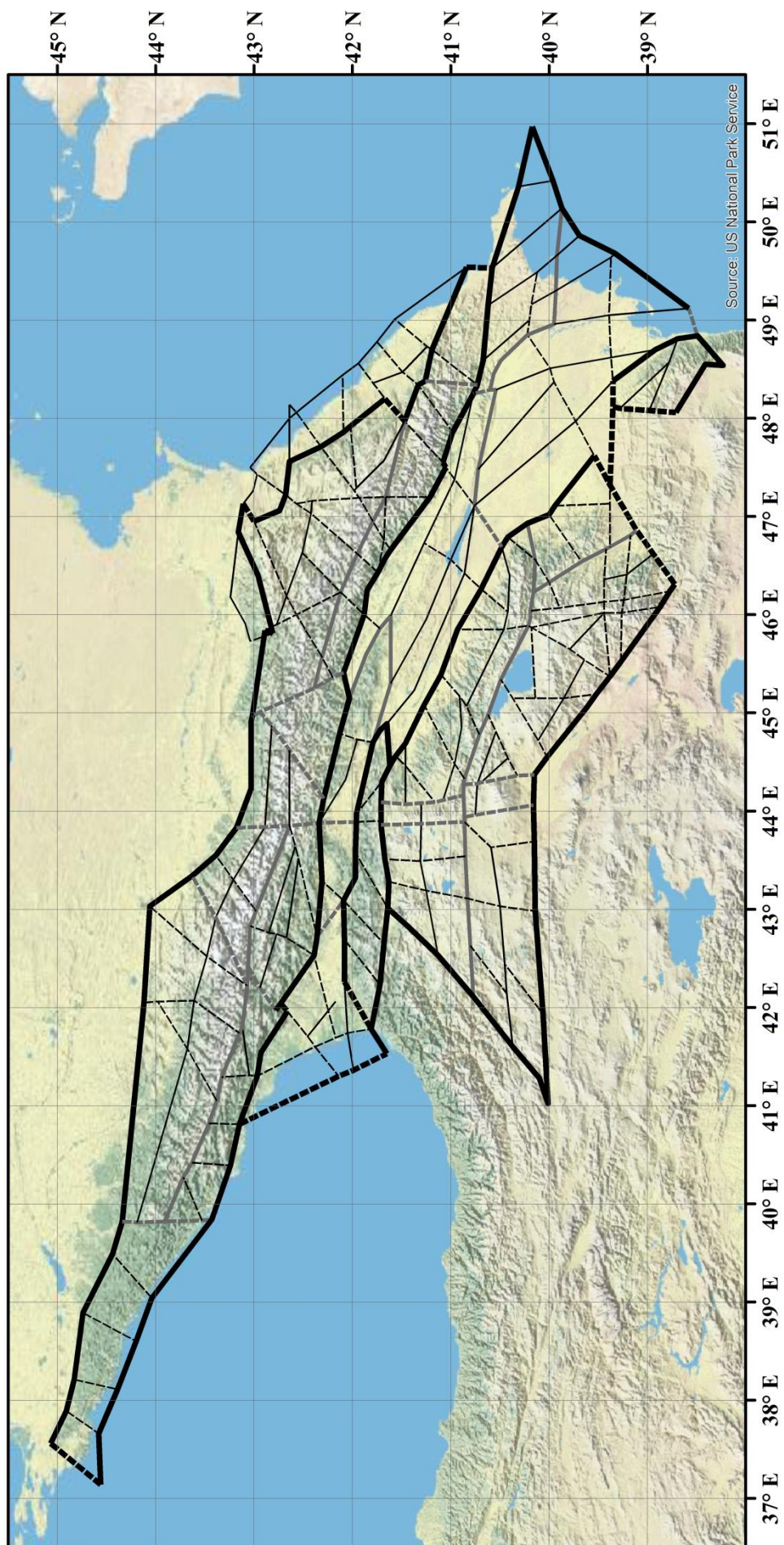


Рис. 2.8. Схема морфоструктурного районирования Кавказа. Толстые черные линии – линеаменты I-го ранга, средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга [205]. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные

Землетрясения с $M \geq 6.0$ на Кавказе [22, 157, 183, 310]

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M	№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	427	40.5	46.5	6.5	31.	11.06.1859	40.7	48.5	6.1
2.	21.07.735	39.5	45.4	7.0	32.	24.05.1861	40.0	46.6	6.6
3.	742	42.4	44.9	6.4	33.	19.12.1862	39.7	47.9	6.0
4.	27.12.893	40.0	44.6	6.4	34.	30.12.1863	38.2	48.6	6.1
5.	23.04.1088	41.4	43.2	6.0	35.	23.07.1867	40.0	47.0	6.3
6.	1122	40.3	46.3	6.1	36.	25.02.1868	41.0	43.0	6.2
7.	28.11.1132	40.5	43.5	6.0	37.	18.03.1868	40.2	46.8	6.3
8.	30.09.1139	40.3	46.2	7.7	38.	28.01.1872	40.6	48.7	6.0
9.	07.1192	40.7	48.6	6.1	39.	01.11.1875	39.8	41.1	6.1
10.	10.1235	40.4	47.0	6.3	40.	26.06.1889	42.5	48.0	6.1
11.	17.04.1283	41.6	43.3	6.8	41.	22.09.1896	41.6	45.0	6.3
12.	1308	39.4	46.2	6.1	42.	31.12.1899	41.55	43.6	6.3
13.	1350	42.9	43.1	6.5	43.	13.02.1902	40.7	48.5	6.9
14.	29.11.1406	39.7	46.5	7.0	44.	21.10.1905	43.3	41.7	6.4
15.	1605	40.5	43.3	6.1	45.	12.10.1912	41.5	44.2	6.3
16.	1622	38.5	46.2	6.2	46.	20.02.1920	41.9	44.0	6.2
17.	1660	40.0	41.3	6.5	47.	19.02.1924	39.4	48.6	6.6
18.	14.01.1668	41.0	48.0	7.8	48.	27.04.1931	39.4	46.1	6.2
19.	11.01.1671	41.5	48.7	6.2	49.	01.05.1935	40.6	43.7	6.2
20.	04.06.1679	40.2	44.7	6.4	50.	07.05.1940	41.7	43.8	6.0
21.	1688	40.3	41.5	6.5	51.	29.06.1948	41.9	46.8	6.1
22.	08.07.1718	40.3	41.5	6.5	52.	16.07.1963	43.2	41.7	6.4
23.	05.08.1742	42.1	45.6	6.8	53.	14.05.1970	43.0	47.09	6.6
24.	10.1779	40.3	41.5	6.5	54.	28.07.1976	43.17	45.6	6.2
25.	20.10.1827	40.7	44.9	6.5	55.	30.10.1983	40.35	42.18	6.8
26.	09.03.1830	43.1	46.7	6.8	56.	07.12.1988	40.86	44.17	6.9
27.	09.04.1851	40.0	47.3	6.1	57.	29.04.1991	42.45	43.67	7.0
28.	24.07.1852	39.9	41.3	6.0	58.	15.06.1991	42.46	44.01	6.1
29.	21.01.1859	40.0	41.7	6.0	59.	23.10.1992	42.59	45.1	6.5
30.	02.06.1859	40.0	41.3	6.4					

Пересечения линеаментов в окрестностях которых известны эпицентры землетрясений с $5.5 \leq M < 6.0$ начиная с 1900 г. или эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших до 1900 г. (показаны на рис. 2.9), не были включены в материал обучения алгоритма «Кора-3» и составили материал экзамена алгоритма. Таких пересечений – 150 (рис. 2.9). Остальные 71 пересечение составили материал обучения низкосейсмичного класса (рис. 2.9) алгоритма «Кора-3» [249].

В табл. 2.4 приведен исходный перечень геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания на Кавказе. По итогам оценки информативности характеристик для случая одного класса обучения было принято решение использовать в алгоритме «Барьер-3» 11 характеристик (выделены в табл. 2.4 жирным шрифтом). При распознавании алгоритмом «Кора-3» [207] использовались 14 характеристик (выделены в табл. 2.4 курсивом), отобранные по итогам оценки информативности для двух классов обучения.

Исходя из порога магнитуды распознаваемых мест землетрясений ($M \geq 6.0$) в качестве окрестностей внутри которых вычислялись значения характеристик на Кавказе (также как и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье) брались круги радиусом 25 км [54, 205, 207, 249].

Из табл. 2.4 легко заметить, что 8 характеристик использовались при распознавании обоими алгоритмами. Это – максимальная (H_{\max}), минимальная (H_{\min}) высота и их размах (dH), сочетание типов рельефа (Top), площадь четвертичных пород (Q), число линеаментов в окрестности пересечения (NLC), расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга ($R2$) и размах значений аномалий Буге (dB). Необходимо отметить, что из всего множества гравитационных и магнитных характеристик объектов распознавания только dB была отобрана для использования при распознавании алгоритмом «Барьер-3» [249].

Из табл. 2.2 и 2.4 видно, что исходные перечни характеристик объектов распознавания на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье совпадают.

Заметим, что для использования при распознавании в обоих регионах алгоритмом «Барьер-3» были отобраны 4 характеристики (H_{min} , Top , $R2$, dB), а алгоритмом «Кора-3» – 8 (H_{max} , H_{min} , dH , Top , V_{max} , V_{min} , dB , MO_{min}).

Таблица 2.4

Исходный перечень геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания на Кавказе. Жирным шрифтом выделены 11 информативных характеристик для алгоритма «Барьер-3», курсивом – 14 информативных характеристик для алгоритма «Кора-3»

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

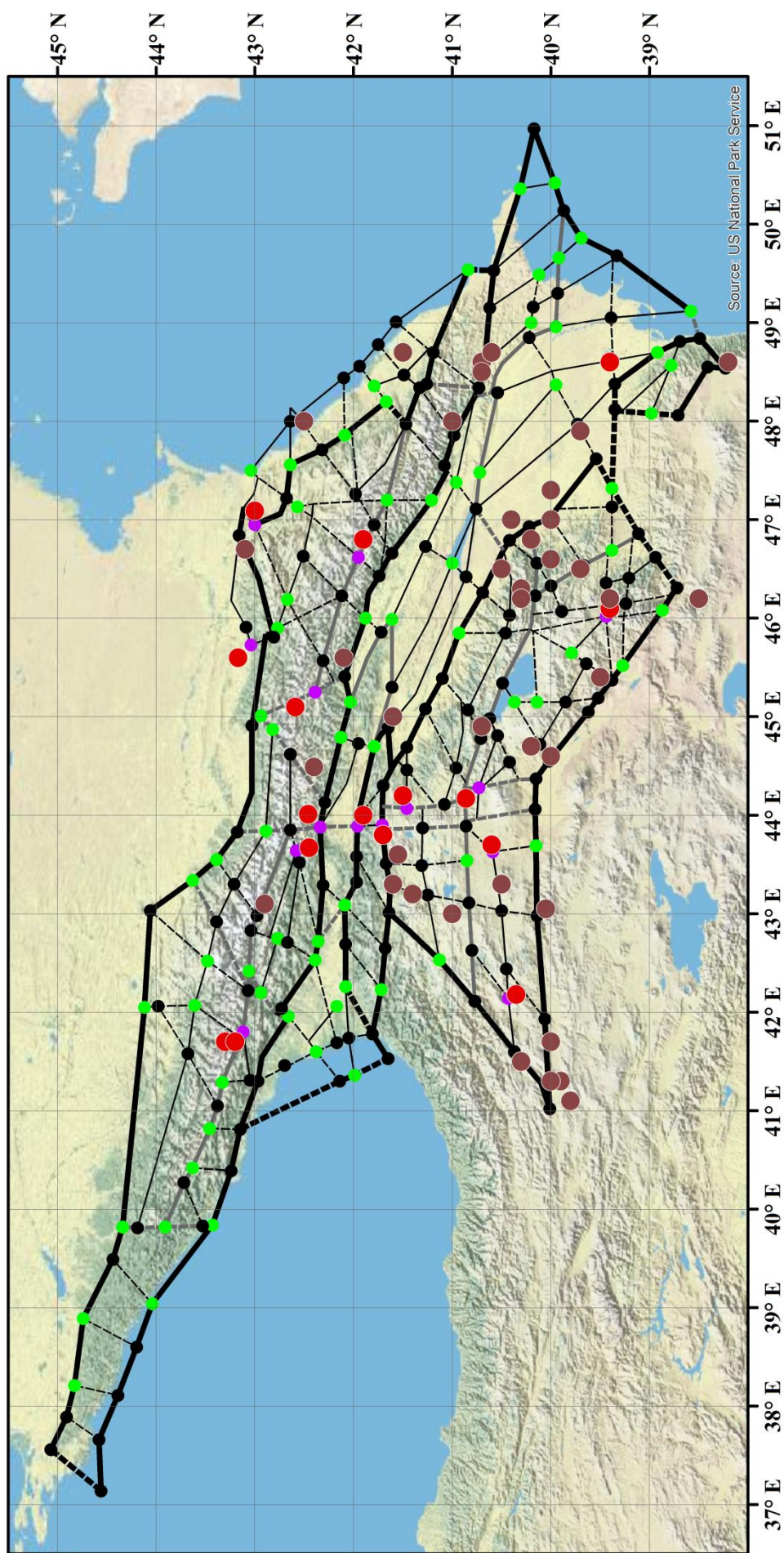


Рис. 2.9. Схема МСР Кавказа. Сиреневые круги – обучающая выборка (пересечения линеаментов)

высокосейсмичного класса алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3», зеленые – обучающая выборка низкосейсмичного класса алгоритма «Кора-3», черные – объекты распознавания, не вошедшие в обучающие выборки алгоритма «Кора-3» (материал экзамена). Красные круги – эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ за период 1900 – 1992 гг., коричневые – эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших до 1900 г.

2.6.3. Распознавание алгоритмом «Барьер-3»

На рис. 2.10 эллипсами показан результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, полученный с помощью алгоритма «Барьер-3». Сплошными эллипсами показаны объекты единственного класса обучения алгоритма.

По итогам распознавания к высокосейсмичному множеству пересечений линеаментов отнесено 108 из 237 рассматриваемых объектов распознавания. При этом входные параметры алгоритма имели следующие значения: $s = -1.3$ и $q = 8.6$ (см. формулы 2.4 и 2.6). Из рассмотрения модуля распознавания алгоритмом «Барьер-3» как блока ЕРА [62] по аналогии с распознаванием в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье следует, что совокупность приведенных на рис. 2.10 эллипсов (кругов радиусом 25 км) с центрами в соответствующих 108 пересечениях линеаментов может быть интерпретирована как искомые места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе.

Следует отметить, что помимо 16 объектов из обучающей выборки высокосейсмичными объявлены 92 пересечения из 221, составлявших материал экзамена алгоритма. «Барьер-3» распознал как опасные 45.5% от общего числа объектов.

На рис. 2.11 представлены гистограммы, характеризующие вклад используемых 11-ти геолого-геофизических характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» подмножества пересечений линеаментов в окрестности которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.0$. По оси ординат на рис. 2.11а показано среднее количество «срабатываний» характеристик при распознавании, на рис. 2.11б – количество попаданий характеристик в тройки «сильнейших» (рейтинг Топ 3) характеристик.

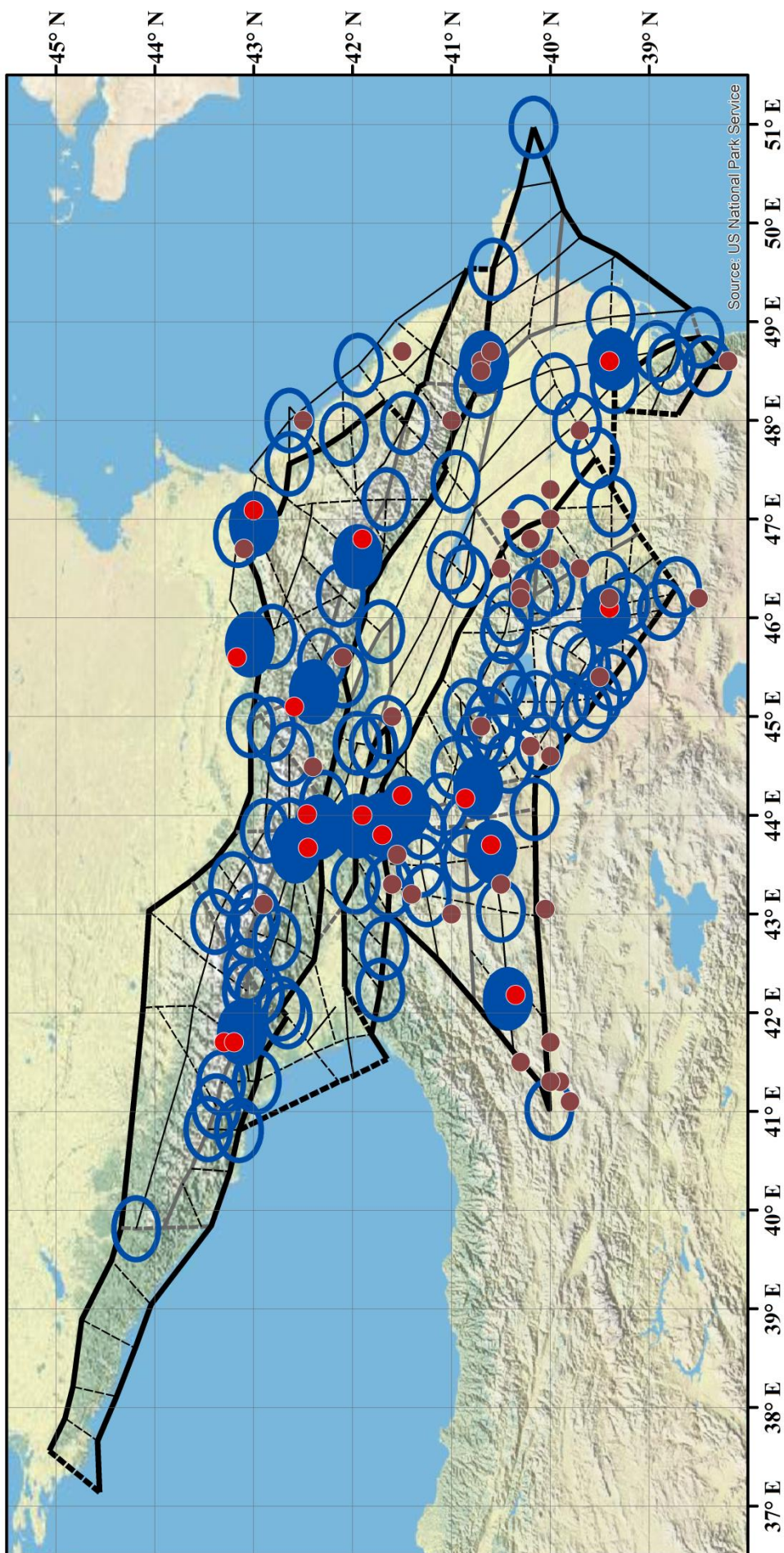


Рис. 2.10. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, распознанные алгоритмом «Барьер-3», и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: красные точки – за период 1900 – 1992 гг., коричневые точки – до 1900 г.

Сплошными эллипсами показано множество обучения единственного высокосейсмичного класса

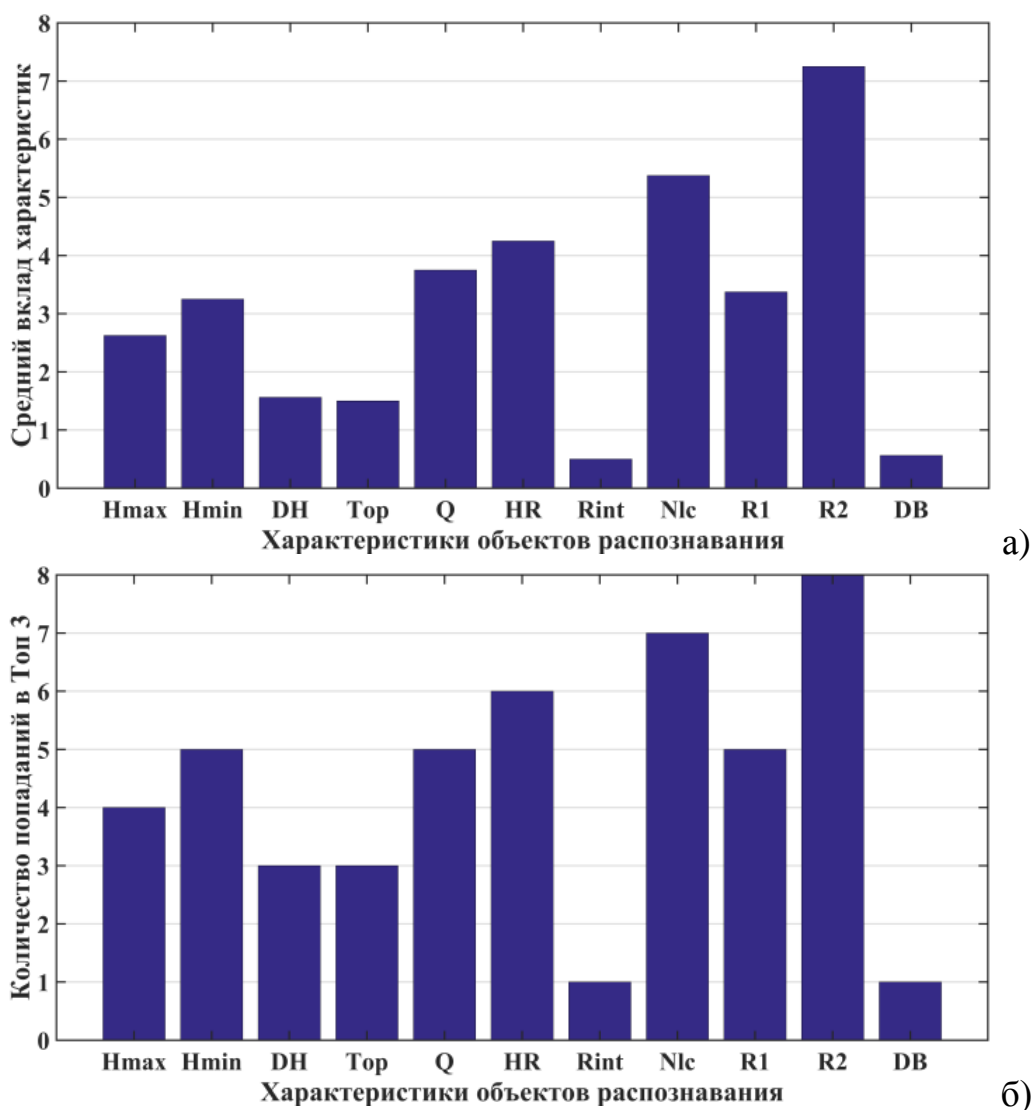


Рис. 2.11. Вклад характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» высокосейсмичного множества пересечений линеаментов на Кавказе: а) средний вклад характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших»

Из рис. 2.11 видно, что при распознавании на Кавказе алгоритмом «Барьер-3» наибольший вклад в формирование искомого высокосейсмичного множества объектов 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.

Пересечения линеаментов на Кавказе, распознанные алгоритмом «Барьер-3» 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), не большой площадью четвертичных пород ($Q \leq 30\%$), они образованы тремя или более линеаменами 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). Эти признаки естественно трактовать как критерии высокой сейсмичности на Кавказе. Из рис. 2.11 видно, что размах высот и сочетание типов рельефа также вносят вклад в формирование итогового результата [249].

Анализ рис. 2.4 и 2.11 показывает, что при распознавании алгоритмом «Барьер-3» в обоих рассматриваемых регионах (Кавказ и Алтай-Саяны-Прибайкалье) существенный вклад в формирование искомого подмножества пересечений линеаментов, в окрестности которых могут возникнуть сильные землетрясения, вносит расстояние до ближайшего линеамента II-го ранга. То есть характеристика $R2$ является крайне важной с точки зрения алгоритма «Барьер-3» [249].

2.6.4. Сравнение классификаций, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3»

На рис. 2.12 белыми эллипсами показан результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, полученный с помощью алгоритма «Кора-3» [207]. Алгоритм «Кора-3» распознал как опасные все 16 объектов обучения высокосейсмичного класса (что априорно не гарантировано). К высокосейсмичным объектам отнесено 22 пересечения из обучающей выборки низкосейсмичного класса и 69 объектов из числа не вошедших в обучающие выборки и составлявших материал экзамена. В итоге «Кора-3» распознал как опасные для магнитуды $M \geq 6.0$ 107 пересечений линеаментов (45% от общего числа объектов распознавания) [207].

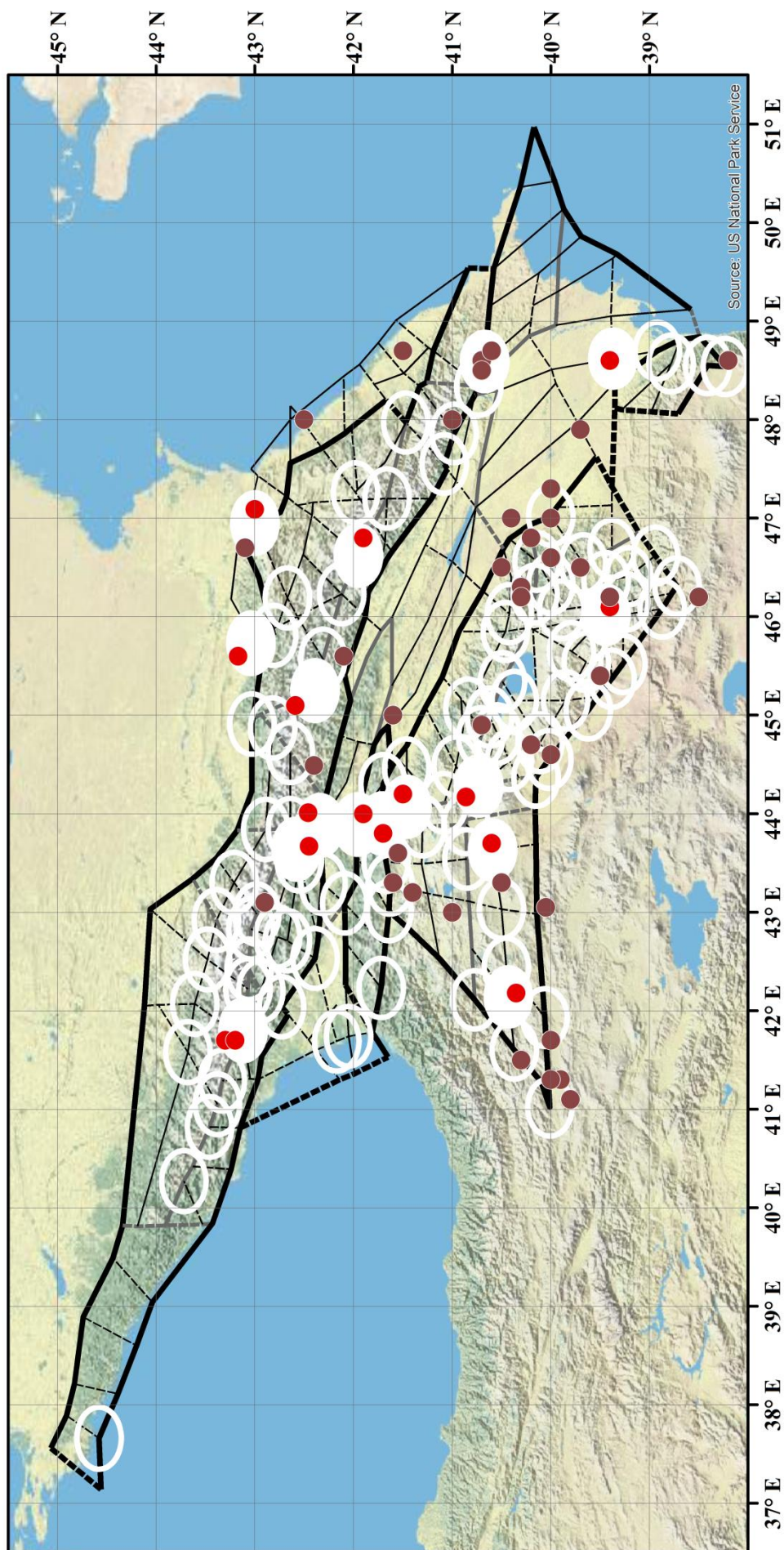


Рис. 2.12. Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, распознанные алгоритмом «Кораз», и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: красные точки – за период 1900 – 1992 гг., коричневые точки – до 1900 г.

Сплошными белыми эллипсами показано множество обучения высокосейсмичного класса

Практически все пересечения, распознанные как высокосейсмичные алгоритмом «Кора-3», связаны с линеаменами I-го и II-го рангов. Это говорит о том, что сейсмоопасные объекты расположены на границах, разделяющих наиболее крупные блоки земной коры Кавказа [205].

Анализ признаков, сформированных алгоритмом «Кора-3» [207], показал, что объекты, распознанные как высокосейсмичные, характеризуются большими значениями MO_{max} , малыми значениями MO_{min} и большими значениями MO_{dif} . Для объектов распознанных как низкосейсмичные характерны малые значения MO_{max} и MO_{dif} . Это может говорить о том, что в окрестностях высокосейсмичных пересечений литосферные магнитные аномалии более неоднородны, чем в окрестностях низкосейсмичных объектов. Последнее может быть следствием неоднородного строения литосферы в окрестностях мест возможного возникновения сильных для Кавказского региона землетрясений. Тем самым в работе [207] впервые была продемонстрирована информативность литосферных магнитных аномалий для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений алгоритмом «Кора-3» в Кавказском регионе. Вопрос так ли это в других сейсмоопасных регионах остается открытым. Аналогичное распознавание было выполнено диссертантом для региона Алтай-Саяны-Прибайкалье [127]. Результат, описанный в п. 2.5.3 диссертации, подтверждает важность площадных магнитных параметров для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (гипотеза А.Д. Гвишиани).

На рис. 2.13 для региона Кавказа представлен результат сравнения классификаций пересечений линеаментов, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Как и в случае региона Алтай-Саяны-Прибайкалье объекты, распознанные алгоритмом «Барьер-3», обозначены пустыми эллипсами с синими границами, а алгоритмом «Кора-3» – белыми эллипсами. Таким образом, опасные объекты, распознанные обоими алгоритмами, показаны белыми эллипсами с синими границами (рис. 2.13).

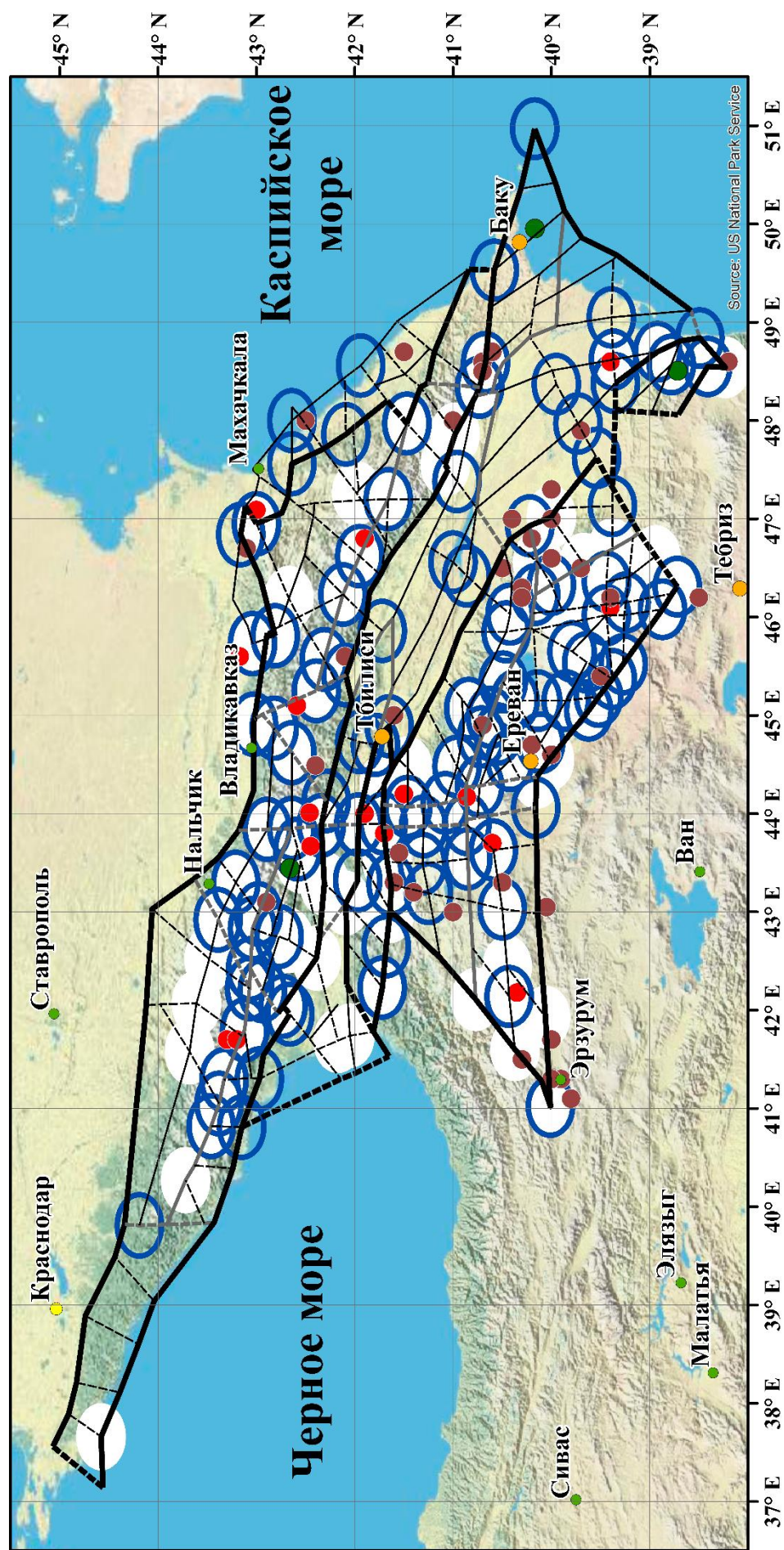


Рис. 2.13. Сравнение результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» (пустые эллипсы с синими границами – «Барьер-3», белые эллипсы – «Кора-3», белые эллипсы с синими границами – оба алгоритма), эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: коричневые круги – до 1900 г. (табл. 2.3), красные круги – за период 1900 – 1992 гг. (табл. 2.3), темно зеленые круги – начиная с 2013 г. (табл. 2.5).

Напомним, что алгоритмом «Барьер-3» распознаны как высокосейсмичные 108 пересечений линеаментов, а алгоритмом «Кора-3» – 107 объектов. При этом 73 пересечения (51.4% из объединения подмножеств распознанных пересечений) классифицированы как опасные для $M \geq 6.0$ обоими алгоритмами. Отметим, что оба алгоритма распознали как высокосейсмичные все 16 объектов из обучающей выборки этого класса.

Алгоритм «Барьер-3» классифицировал как опасные 24 из 71 объекта обучающей выборки низкосейсмичного класса «Коры», алгоритм «Кора-3» – 22. При этом 16 из них отнесены к опасным обоими алгоритмами. Очевидно, что 41 объект обучения низкосейсмичного класса оба алгоритма распознали как неопасные.

Из множества объектов, изначально не отнесенных к обучающим выборкам «Коры», алгоритмы «Барьер-3» и «Кора-3» одинаково классифицировали 95 пересечений, и по-разному – 55.

Из рис. 2.13 видно, что объекты, расположенные на продольных линеаментах 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 линеаментах 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 высокосейсмических 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. 2.10, 2.12 и 2.13 показал, что все 17 эпицентров

землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших за период 1900 – 1992 гг. (табл. 2.3 и красные круги на рис. 2.13) и участвовавших в формировании обучающей выборки высокосейсмичного класса, находятся внутри зон, распознанных обоими алгоритмами. Из 42 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших до 1900 г. (табл. 2.3 и коричневые круги на рис. 2.13), 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. Подчеркнем, что с существенной долей вероятности координаты эпицентров землетрясений, произошедших до 1900 г., могут быть ошибочными. При этом ошибка может быть как в нашу пользу, так и нет. В первом случае усиливается достоверность результата. Во втором – ничего не теряется, т.к. для этих 7 или 8 эпицентров результат распознавания априорно отрицательный [249]. Заметим, что только одно из этих землетрясений имеет магнитуду, значительно превосходящую 6.0, – $M = 7.8$. Для всех остальных – $6.0 \leq M \leq 6.5$. Это означает, что некоторые из пропущенных землетрясений могут и не быть предметом настоящих исследований, т.к. в реальности их магнитуда $M < 6.0$ (т.к. при определении магнитуды исторических землетрясений возможны не меньшие ошибки, чем при определении их эпицентров). Следует также отметить, что вне объединения зон, распознанных обоими алгоритмами, находится лишь 3 (5%) из 59 эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ (табл. 2.3) [249].

В табл. 2.5 приведен список землетрясений с $M \geq 6.0$, произошедших в исследуемом регионе Кавказа начиная с 1993 г. [272, 274]. Информация об этих землетрясениях никак не использовалась при формировании обучения алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3» и, тем самым, представляет собой материал чистого экзамена. Эпицентры таких землетрясений показаны на рис. 2.13 кругами темно зеленого цвета [249].

Из рис. 2.13 видно, что эпицентры двух из трех (табл. 2.5) землетрясений находятся строго внутри высокосейсмичных зон, распознанных как

алгоритмом «Барьер-3», так и алгоритмом «Кора-3». Отметим, что гипоцентр землетрясения, произошедшего в акватории Каспийского моря в районе г. Баку (№ 2 в табл. 2.5) и не попавший в зоны распознанные обоими алгоритмами, по одним данным располагался в коре [274], по другим за ее пределами [272]. Таким образом, возможно, эпицентр этого землетрясения и не является ошибкой типа «пропуск цели» [249].

Таблица 2.5

Землетрясения с $M \geq 6.0$ на Кавказе, начиная с 1993 г.

№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M
1.	09.07.1998	38.717	48.507	6.0
2.	25.11.2000	40.167	49.954	6.5
3.	07.09.2009	42.66	43.443	6.0

Анализ критериев высокой сейсмичности на Кавказе, выявленных в диссертационной работе алгоритмом «Барьер-3» и алгоритмом «Кора-3» в работе [207], продемонстрировал их существенную схожесть.

2.7. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений линеаментов

На основе изученных регионов Алтай-Саяны-Прибайкалье и Кавказ построим совместную интерпретацию мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$, распознанных по одному («чистому») и двум («чистому» и «смешанному») классам обучения. Интерпретация будет базироваться на композиции конструкции нечеткого множества и результатов, полученных независимо алгоритмом «Барьер-3» и классической дихотомией «Кора-3» [73].

Понятие нечеткого множества было введено в 1965 г. основоположником «нечеткой математики» Лофти Заде в статье «Fuzzy Sets», опубликованной в журнале «Information and Control» [324]. Этот выдающийся математик расширил классическое понятие множества,

допустив, что его характеристическая функция может принимать любые значения в интервале $[0, 1]$, а не только значения 0 и 1. Расширив, таким образом, класс характеристических функций Л. Заде назвал их функциями принадлежности.

Определение 1. Под нечетким множеством A понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсума X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$ [275]:

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

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

Функция $\mu_A(x)$, вообще говоря, принимает значения в некотором линейно упорядоченном множестве M [219], которое называют множеством принадлежности. В его качестве мы выбираем отрезок $[0, 1]$, заведомо являющийся линейно упорядоченным множеством. Заметим, что если $M = \{0, 1\}$ (т.е. множество принадлежностей состоит из двух элементов), то нечеткое множество превращается в классическое.

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

Определение 2. Носителем (support) A называется множество:

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

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

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

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

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

Применим конструкцию нечеткого множества для построения

интегрального результата, равноценный вклад в который вносят алгоритмы «Барьер-3» и «Кора-3».

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

$$B = \{w, \mu_B(w) | w \in W\}. \quad (2.16)$$

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

$$\mu_B(w) = \mu_{B_B, B_K}(w) = \begin{cases} 1, & w \in B_B \cap B_K \\ 0.5, & w \in B_B \Delta B_K = (B_B \cup B_K) \setminus (B_B \cap B_K), \\ 0, & w \notin B_B \cup B_K \end{cases} \quad (2.17)$$

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

Согласно формулам (2.16 – 2.17) интегральный результат распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений может быть интерпретирован как непустое нормальное нечеткое множество. Из (2.16 – 2.17) следует, что это имеет место для любой пороговой магнитуды M_0 , такой, что задача имеет смысл и соответствующее распознавание обоими алгоритмами выполнено.

Высокосейсмичными объектами в интегральном результате будем считать пересечения, для которых $\mu_{B_B, B_K}(w) > 0$. Иными словами, мы ищем объекты $w \in W$, принадлежащие носителю нечеткого множества B , определенного формулой (2.16). Таким образом, на основе формулы (2.17) нам нужно определить $supp B$.

На рис. 2.14 и 2.15 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 (2.16 – 2.17).

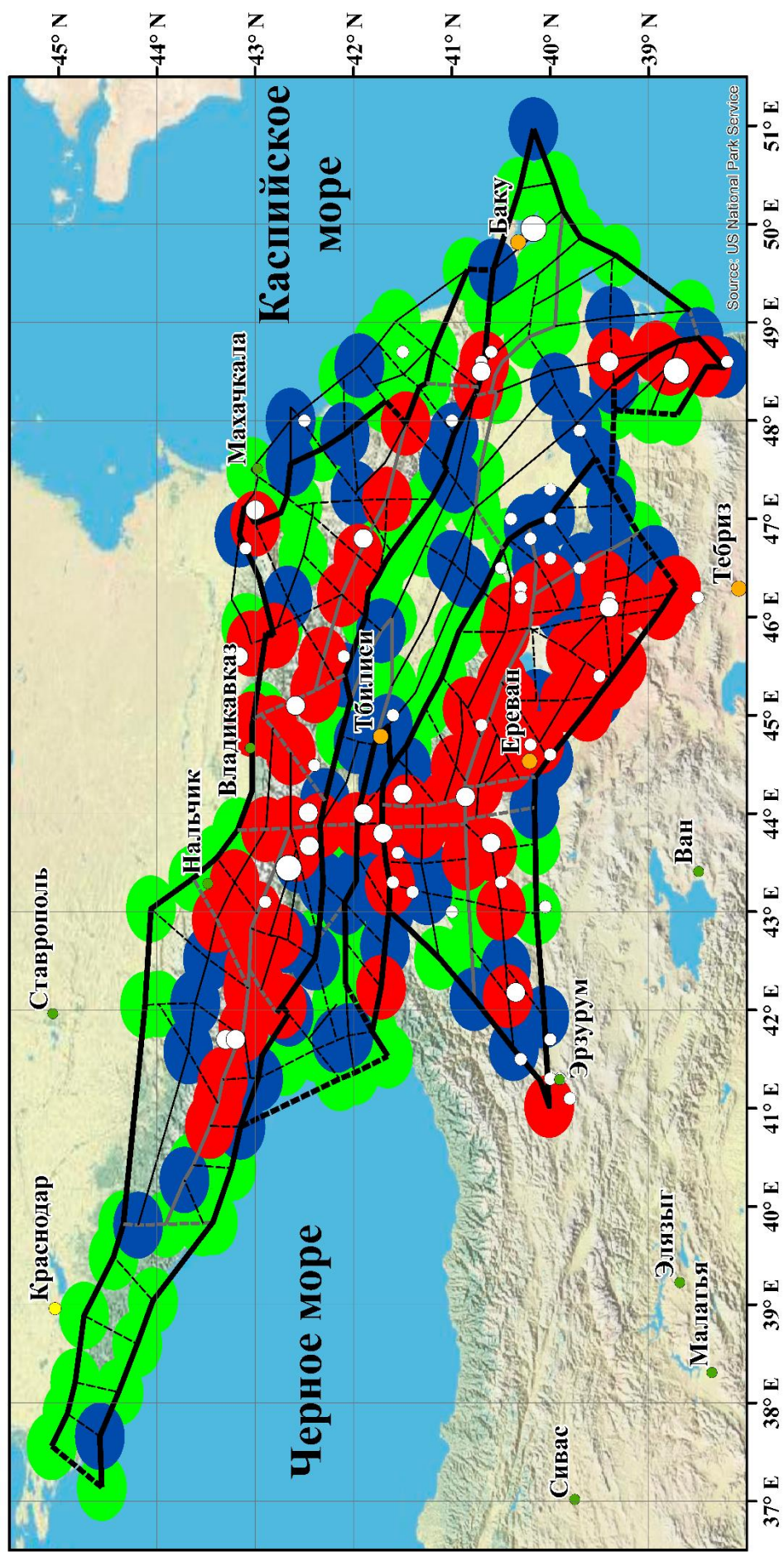


Рис. 2.14. Представление на Кавказе совместного результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткого множества окрестностей пересечений линейментов. Красным цветом показаны окрестности пересечений с функцией принадлежности $\mu_{В,ВК} = 1$, синим – $\mu_{В,ВК} = 0.5$, зеленым – $\mu_{В,ВК} = 0$. Функция принадлежности $\mu_{В,ВК}$ определена формулой (2.17). Белые круги – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$: меньшие – до 1900 г., средние – 1900 – 1992 гг., большие – после 1992 г.

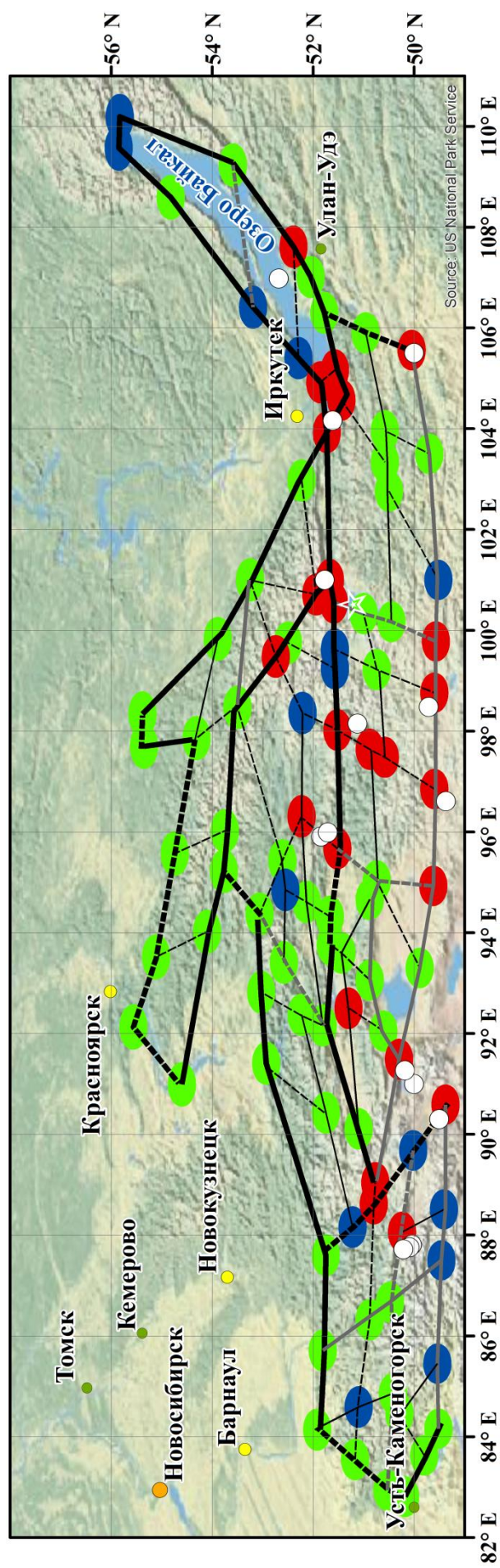


Рис. 2.15. Представление в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье совместного результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткого множества окрестностей пересечений линеаментов. Красным цветом показаны окрестности пересечений с функцией принадлежности $\mu_{B_{B,V_K}} = 1$, синим – $\mu_{B_{B,V_K}} = 0.5$, зеленым – $\mu_{B_{B,V_K}} = 0$. Функция принадлежности $\mu_{B_{B,V_K}}$ определена формулой (2.17). Белые круги – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$. Белая звезда – эпицентр землетрясения с

$M = 6.7$, произошедшего 11.01.2021

В регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье в силу полученных результатов распознавания (рис. 2.6) 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 (рис. 2.15). Вне зависимости от того считать эпицентр землетрясения 2021 года ошибкой «пропуск цели» или нет количество «пропусков цели» распознавания, полученного с помощью нечеткой функции (рис. 2.15), такое же, как у каждого из алгоритмов в отдельности (рис. 2.6). Во всех трех случаях это число 0 или 1. В данном случае распознавание с помощью формул (2.16 – 2.17) не влияет на качество результата, а лишь увеличивает количество искомым высокосейсмичных объектов, где сильные землетрясения до настоящего времени не были зарегистрированы.

Иная ситуация имеет место на Кавказе. Подход с помощью нечеткой функции априорно улучшает здесь качество результата. Напомним, что на рис. 2.13 из 62 эпицентров рассматриваемых землетрясений с $M \geq 6.0$ вне высокосейсмичных зон, распознанных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», находятся 8 и 9 эпицентров, соответственно. При этом всего 4 эпицентра находятся за пределами зон, определенных как высокосейсмичные по формулам (2.16 – 2.17) (рис. 2.14).

2.8. Обсуждение

Предпринятая в диссертации замена в методе ЕРА алгоритма дихотомии на оригинальный алгоритм «Барьер» есть попытка открыть новую страницу в развитии этого метода [54, 62, 97, 127]. Согласно [65] проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений является динамической, предельной задачей распознавания. Как показано в [65, 264] в предельных задачах реально существует лишь один «чистый» класс обучения, образованный объектами с которыми связаны уже

произошедшие, к настоящему моменту времени, сильные землетрясения. Более того, в результате распознавания объекты из низкосейсмичного класса обучения в искомой предельной классификации могут оказаться в высокосейсмичном классе.

Алгоритм «Барьер» по своей идее и конструкции более адекватно чем дихотомия отвечает постановке изучаемой динамической задачи ЕРА. Обучаясь только по одному не содержащему заведомых ошибок высокосейсмичному классу алгоритм «Барьер» лишь расширяет класс обучения B_0 . Алгоритм «Кора-3» [30] был создан еще в 1966 г. М.М. Бонгардом для решения иных нединамических прикладных задач дихотомии. Его рутинное применение к проблеме ЕРА оказывается, вообще говоря, менее адекватным в силу наличия в нем обучения по низкосейсмичному классу, загрязненному потенциальными ошибками классификации.

Тем самым можно утверждать, что «Барьер» представляет собой сегодня тип алгоритма наиболее пригодного для решения задачи ЕРА в ее классической динамически-предельной формулировке, принадлежащей академикам АН СССР И.М. Гельфанду и В.И. Кейлис-Бороку и академиком национальной академии наук США Ф.С. Прессу и Л. Кнопову [97, 98, 252]. Приведенные в настоящей Главе диссертации результаты на примере Кавказа и региона Алтай-Саяны-Прибайкалье демонстрируют, что качество полученного результата не уступает ранее полученному алгоритмом «Кора-3» [113, 207]. При этом в силу меньшего количества свободных параметров алгоритм «Барьер» проще в практическом применении. Наконец, алгоритм «Барьер» оперирует геолого-геофизическими параметрами в виде вещественных чисел, что делает интерпретацию распознанных признаков высокой сейсмичности проще и нагляднее.

Убирая из процесса распознавания этап обучения по потенциально «грязному», содержащему ошибки низкосейсмичному классу алгоритм «Барьер» в своей оригинальной версии, тем не менее, уступает алгоритму

«Кора-3». Действительно, если первый не выявляет геолого-геофизических и геоморфологических характеристик высокой сейсмичности, то «Кора-3» это с успехом делает. Этот недостаток устранен в представленной в диссертации новой версии алгоритма – «Барьер-3». Последний, обучаясь по одному высокосейсмичному классу, выявляет критерии высокой сейсмичности.

Алгоритм «Барьер» [54] и его модификация «Барьер-3» [127] хорошо зарекомендовали себя при распознавании мест возможного возникновения землетрясений с одним классом обучения на Кавказе ($M \geq 6.0$) [54, 246, 249] и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье ($M \geq 6.0$) [127]. Этот факт укрепляет предположения диссертанта о том, что распознавание мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений по единственному высокосейсмичному классу обучения путем его расширения адекватно постановке проблемы ЕРА.

Использование алгоритма «Барьер» принципиально не меняет процедуру распознавания ЕРА, изменяется лишь блок распознавания с обучением. На место «Коры» приходит «Барьер», оставляя без изменения блоки морфоструктурного районирования и измерения геолого-геофизических и геоморфологических параметров. Отметим, что, при этом, в силу специфики алгоритма «Барьер» может измениться блок «Контроль достоверности» (рис. 2.16).

Таким образом, в диссертации предлагается тезис о том, что в классической методике ЕРА возможно варьирование блока распознавания образов: «Кора-3» ↔ «Барьер-3» (рис. 2.16). При хорошей согласованности обоих вариантов распознавания можно говорить о достоверности результатов.

Заметим, что полученные независимо положительные варианты распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» делают их контрольными экспериментами друг для друга. В силу близости результатов контрольные эксперименты следует признать удачными. Это повышает оценку достоверности как результата ЕРА («Кора-3»), так и ЕРА («Барьер-3»).



Рис. 2.16. Вариация блока распознавания образов «Кора-3» ↔ «Барьер-3» в методе ЕРА

В настоящее время в Геофизическом центре РАН под руководством академика А.Д. Гвишиани при активном участии диссертанта развивается проект по созданию и развитию универсальной ГИС-ориентированной базы данных [212, 214] решений с помощью ЕРА («Кора-3»), ЕРА («Барьер-3») и др. задач распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в различных регионах мира. В дальнейшем это позволит убедиться в универсальности варьирования блока распознавания образов (рис. 2.16) для других регионов, где ранее было успешно выполнено распознавание ЕРА («Кора-3»).

Отметим, что алгоритмы «Барьер-3» и «Кора-3» классифицировали как

высокосейсмичные, соответственно, 46% и 45% пересечений линеаментов на Кавказе (рис. 2.13), 32% и 34% в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье (рис. 2.6). В интегральном результате, полученном с помощью нечеткого множества, высокосейсмичными объявлено 41.2% объектов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье (рис. 2.15) и 59.9% на Кавказе (рис. 2.14). При этом в проблеме ЕРА [90, 164, 206 и др.], как правило, результат считается нетривиальным, если не более 60% объектов классифицированы как высокосейсмичные [206].

Распознавание, полученное по формулам (2.16 – 2.17) (рис. 2.14 и 2.15), для обоих регионов удовлетворяет этому условию. Таким образом, это позволяет получить новый нетривиальный результат для обоих регионов и вдвое уменьшить количество «пропусков цели» на Кавказе [73].

Улучшение результата связано с тем, что использование нечеткой математики позволяет интегрировать воедино различные критерии двух независимых распознаваний, выполненных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Это позволяет в какой-то мере компенсировать неполноту, а иногда и дефектность исходных данных [73].

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

Отметим прикладную составляющую результатов настоящей Главы диссертации. В приложении к проблеме обеспечения геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в пределах Нижне-Канского массива сделан вывод о том, что зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье находятся на таком расстоянии от участка «Енисейский» в пределах которого

идет строительство ПГЗРО, что не могут оказать существенного влияния на его сейсмическую опасность. Приведены соответствующие количественные оценки.

2.9. Выводы

- Создан принципиально новый алгоритм распознавания образов «Барьер-3» с обучением по одному классу. В силу меньшего количества свободных параметров алгоритм «Барьер-3» проще в практическом применении, чем ранее используемые в методе ЕРА алгоритмы дихотомии.
- С использованием алгоритма «Барьер-3» в качестве блока распознавания метода ЕРА выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье и на Кавказе. Полученные результаты показали, что распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений путем расширения единственного класса обучения адекватно постановке проблемы ЕРА.
- Проведен сравнительный анализ результатов распознавания алгоритмом «Барьер-3» с высокосейсмичными зонами, определенными методом ЕРА с использованием классического алгоритма дихотомии «Кора-3».
- На основе композиции конструкции нечеткого множества и результатов, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», построена совместная интерпретация мест возможного возникновения сильных землетрясений, распознанных по одному и двум классам обучения.
- Показано, что зоны возможного возникновения сильных землетрясений Алтае-Саянской орогенной области находятся на таком расстоянии от пункта глубинного захоронения РАО (Нижне-Канской массив), что не могут оказать существенного влияния на сейсмическую опасность его строительной площадки.

ГЛАВА 3. РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА БАЗЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛОТНЫХ СГУЩЕНИЙ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1. Общая постановка задачи и метод исследования

В настоящей Главе диссертационной работы речь пойдет о решении задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в тектонически активных регионах в ее классической постановке [65, 96, 245] с некоторой инновацией. Напомним общую формулировку задачи.

Для рассматриваемого сейсмичного региона выбирается порог магнитуды M_0 , начиная с которого землетрясения считаются сильными, а места возможного их возникновения – распознаются. Затем выбираются объекты распознавания, для которых существует априорная связь с эпицентрами сильных землетрясений. Обозначим конечное множество объектов распознавания через $W = \{w\}$.

Примеры объектов распознавания – это пересечения морфоструктурных линеаментов [89, 135, 136, 163], морфоструктурные узлы [62], участки активных разломов [35], ячейки равномерной сетки на площади региона и т.д. Следуя прошлым работам диссертанта [55, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 123, 124, 126, 128, 263], в диссертационной работе в качестве объектов распознавания используются эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq M_R$.

Задача состоит в распознавании разложения $W = B \sqcup H$, где объекты $w \in B$ находятся достаточно близко, а объекты $w \in H$ – достаточно далеко от известных и потенциально возможных мест возникновения сильных ($M \geq M_0$) землетрясений. Как обычно, $B \sqcup H$ обозначает несвязное

(непересекающиеся) объединение множеств B и H , т.е. $B \sqcup H = B \cup H$, если $B \cap H = \emptyset$. При этом, эпицентры сильных землетрясений в прошлом, настоящем и будущем могут быть связаны только с объектами, классифицированными как $w \in B$. Соответственно, при формировании решения, рассматриваем лишь классификации $W = B \sqcup H$, такие что $B \supset B_0$, где B_0 – есть подмножество объектов, априорно связанных с уже известными эпицентрами сильных ($M \geq M_0$) землетрясений.

Инновацией является то, что задача данного исследования ближе к реальности, чем у ставшего уже классическим метода ЕРА [62, 65, 96, 245]. Кроме классификации конечного набора точечных объектов распознавания требуется нетривиальный, формализованный и воспроизводимый переход от распознанного конечного 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, инновационной задачей исследования является построение отображения $F_\gamma : W \rightarrow F_\gamma(W) \subset S \subset R^2$ множества объектов распознавания W в рассматриваемый регион S , как в подмножество Евклидовой плоскости. Здесь γ – множество свободных параметров отображения F_γ . Такая инновация позволяет перейти от распознавания к системному анализу [261, 327].

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 $w \in B_0$ как точки на плоскости, т.е. $\forall w \in B_0 \Rightarrow w \in F_\gamma(B)$.

в) Эпицентры известных сильных землетрясений с $M \geq M_0$ 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 множества $F_\gamma(B)$ мощности континуум, естественно, рассматривать как возможные реальные плоские зоны, где могут возникать сильные ($M \geq M_0$) землетрясения. Выбор значений γ того или иного варианта среди удовлетворяющих условиям а), б), в) производится на основе системного подхода с использованием контрольных экспериментов [71, 75, 76, 126].

В качестве искомого отображения F_γ в диссертационной работе используется хорошо проявившая себя алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [50, 72, 123, 124] и ее модифицированная версия FCAZm (Formalized Clustering And Zoning modified) [51, 71, 126, 128]. Отметим здесь, что система FCAZ состоит из двух базисных алгоритмических компонент – алгоритма кластеризации (топологической фильтрации) DPS и алгоритма E^2XT , осуществляющего преобразование конечного множества B в плоское множество S ненулевой меры на плоскости. Подробное описание алгоритмов DPS и E^2XT будет дано ниже.

Алгоритм DPS (Discrete Perfect Sets) [8, 9, 55, 121, 123, 125, 228, 248, 263] – это инновационный алгоритм топологической фильтрации, выделяющий кластеры как собственные подмножества во множестве объектов распознавания W . Это существенно отличает DPS от классических алгоритмов кластеризации [12, 216]. Иными словами, $B = \prod_{i=1}^n B_i$, где B_i , $i = 1, \dots, n$ есть распознанные DPS-кластеры, $B, B_i \subset W$, в то время как $W \setminus B$ составляет существенную часть W . Заметим, что если последнее не верно, то результат распознавания тривиален. В этом случае необходимо повысить значение порога магнитуды M_0 в постановке задачи.

Результат применения алгоритма DPS можно обозначить следующей

формулой:

$$DPS(q, \beta): W \rightarrow \{B_1, \dots, B_n\}, \quad (3.1)$$

где $q < 0$ и $-1 \leq \beta \leq 1$ – свободные параметры алгоритма, определяющие тот или иной конкретный вид DPS-кластеров, а B_1, \dots, B_n собственные связные подмножества (DPS-кластеры высокосейсмичных объектов) во множестве объектов распознавания.

На следующем этапе распознанные DPS-кластеры B_1, \dots, B_n преобразуются алгоритмом E^2XT в плоские зоны мощности континуум на плоскости (т.е. осуществляется преобразование F_γ). На этом этапе строится отображение:

$$E^2XT(\delta, C, \omega, \nu): B_i \rightarrow F(B_i), \quad (3.2)$$

где δ – шаг сетки, $\omega < 0$, $\nu < 0$ – свободные параметры алгоритма, C – тип связности, B_i – определены формулой (3.1), $F(B_i)$, $i = 1, \dots, n$ – искомые плоские зоны ненулевой меры. Если для отображения (3.2) выполняются приведенные выше условия а), б) и в), то множества $F(B_i)$ могут быть искомыми зонами возможного возникновения сильных ($M \geq M_0$) землетрясений.

Наличие отображения (3.2) дает возможность рассматривать FCAZ как метод системного анализа.

Таким образом, система распознавания FCAZ есть композиция двух алгоритмов:

$$FCAZ(\gamma) = E^2XT(\delta, C, \omega, \nu) \circ DPS(q, \beta), \quad (3.3)$$

а множество свободных параметров системы FCAZ:

$$\gamma = \{\delta, C, \omega, \nu\} \cup \{q, \beta\} = \{\delta, C, \omega, \nu, q, \beta\}, \quad (3.4)$$

где δ – шаг сетки на плоскости, $\omega < 0$, $\nu < 0$, C – тип связности, $q < 0$ и $-1 \leq \beta \leq 1$.

3.2. Элементы системного анализа в проблеме распознавания высокосейсмичных зон

В цикле работ сотрудников Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) были впервые построены алгоритмы Дискретного Математического Анализа (ДМА) [6, 7, 11, 26, 27, 28, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 56, 77, 208, 209, 213, 228, 229, 264, 268, 269, 281, 288, 312, 313, 321, 328, 329 и др.], являющегося математическим методом реализации системного анализа. Начиная с 2012 г., одним из важных приложений ДМА стало распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в сейсмичных регионах земного шара [55, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 123, 124, 126, 128, 263]. Идейной базой, при этом, оказалась оригинальная нетрадиционная топологическая фильтрация (кластеризация) эпицентров слабых землетрясений (алгоритм DPS – Discrete Perfect Sets), отделяющая ярко выраженные компактные, связные группы объектов от их размытого, неструктурированного дополнения. В отличие от классических алгоритмов кластеризации в DPS отнюдь не все рассматриваемые объекты включаются в кластеры. В этом заключается новизна DPS.

Объектами распознавания в этой задаче служат эпицентры слабых землетрясений, начиная с некоторого уровня магнитуды $M \geq M_R$, где M_R – функция рассматриваемого региона. Для распознавания оказывается достаточно только сейсмологических параметров – эпицентров землетрясений. Таким образом, кластеризация оказывается эффективным инструментом в сейсмологических исследованиях, дающим важную информацию о топологии множества сейсмических явлений, приуроченных к основным разломам. Это вполне согласуется с [18, 239, 279].

Соответствующая алгоритмическая система определения высокосейсмичных зон получила название FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [71, 72]. Ниже, в зависимости от контекста, под FCAZ будем понимать как алгоритмическую систему, так и, собственно, метод в целом.

Настоящая диссертационная работа является обобщением результатов применения метода FCAZ. Как будет показано в следующих Главах диссертации система FCAZ была успешно применена для распознавания мест возможного возникновения значительных, сильных и сильнейших ($M \geq M_0$) землетрясений в горном поясе Анд Южной Америки [71], на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка [126] и Курильских островов, в Калифорнии [55, 128, 263], в регионе Алтай-Саяны-Байкал [74, 75], на Кавказе [70, 71, 72, 76, 263] и на полуострове Крым [76].

В процессе исследований система FCAZ получила свое дальнейшее развитие, включающее в себя внедрение элементов искусственного интеллекта. К ним относится процесс логического и функционального развития системы распознавания как функции учета знаний, полученных в результате решения предыдущих задач. Кроме того, технологическим элементом искусственного интеллекта являются автоматизированные процедуры оптимального выбора свободных параметров алгоритмов DPS и E²ХТ. Существенно расширены и продвинуты контрольные эксперименты типа «сейсмическая история» для оценки достоверности результатов распознавания. Так впервые для FCAZ выполнены эксперименты «полная сейсмическая история».

Все это привело к развитию системы FCAZ в ее продвинутую реализацию FCAZm (Formalized Clustering And Zoning modified) [51, 71], обладающую большей степенью формализованности и воспроизводимости.

Система FCAZ [50, 72, 123] и ее продвинутая версия FCAZm [51, 71] стали принципиально новым шагом в развитии теории и практики распознавания потенциальных высокосейсмичных зон. Опыт многолетнего использования классического алгоритма М.М. Бонгарда [30], дихотомии с обучением «Кора-3», в методе ЕРА привел к идее об отказе от обучения для упрощения процесса решения задачи [62, 94, 96, 98, 206]. Вызовом, при этом, стало и то, что до создания алгоритма E²ХТ [72, 123] (финального блока FCAZ) не существовало формализованных и воспроизводимых процедур

определения реальных границ распознанных зон повышенной сейсмической опасности. Другими словами, FCAZ впервые делает распознавание мест землетрясений процедурой системного анализа. Действительно, характеристической чертой системного анализа является точное выделение изучаемой системы от внешней инфраструктуры [261, 327].

FCAZ может и должен разделить свои вновь полученные знания с другими методами, показавшими себя эффективными в проблеме распознавания мест возможного возникновения землетрясений. Одновременно, FCAZ может и должен сам обогатиться новыми знаниями, полученными этими «родственными» методами. Существенным шагом в этом направлении будет создание алгоритмического продукта, интегрирующего в себя воедино системы распознавания образов FCAZ и ERA [62, 71, 72, 94, 96, 98, 123].

FCAZ осуществляет системный подход к исследованию мест возможного возникновения сильных землетрясений. Его суть состоит в том, что распознавание высокосейсмичных зон в принципиально различных по своему строению регионах земного шара базируется на универсальных фактах и подходах, позволяющих единообразно подойти к решению всего множества таких задач. Тем самым, постановка проблемы и процесс ее решения представляет собой единую систему, в целом инвариантную относительно геологического строения, выбора порогов магнитуды, объектов распознавания, искомым сильным землетрясениям и т.д. При этом, необходимым условием применимости метода FCAZ является достаточная сейсмологическая изученность региона, выраженная в высоком качестве каталога землетрясений, имеющегося в распоряжении исследователя.

3.3. Система распознавания образов FCAZ

В Геофизическом центре РАН при активном участии диссертанта под руководством академика РАН Алексея Джерменовича Гвишиани была

разработана алгоритмическая система распознавания образов FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [72]. Она является частью Дискретного Математического Анализа – оригинального подхода к анализу дискретных данных [6, 7, 11, 26, 27, 28, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 56, 77, 208, 209, 213, 228, 229, 264, 268, 269, 281, 288, 312, 313, 321, 328, 329 и др.], созданного в ГЦ РАН академиком РАН А.Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН Ан.Ал. Соловьевым, д.ф.-м.н. С.М. Агаяном и к.ф.-м.н. Ш.Р. Богоутдиновым.

FCAZ позволяет эффективно проводить распознавание мест возможного возникновения сильных ($M \geq M_0$) землетрясений на базе кластеризационного изучения каталога сейсмических событий. Система представляет из себя последовательное применение алгоритмов DPS (Discrete Perfect Sets) [71, 72, 228] и E^2XT [71, 72]. В отличие от классического подхода ЕРА [62, 94, 96, 98, 206] FCAZ не использует ни морфоструктурное районирование, ни обучение алгоритмов дихотомии. FCAZ основывается на топологической фильтрации эпицентров [71, 72].

Принципиальным отличием системы FCAZ от предшественников, и, в частности, от классического метода ЕРА, является наличие формализованного блока (алгоритма E^2XT) перехода от классификации точечных объектов на высоко- и низкосейсмичные к исходным плоским высокосейсмичным зонам. Алгоритм E^2XT формализует построение однозначного отображения DPS-кластеров в плоские зоны не нулевой меры внутри и на границе которых возможно возникновение землетрясения с магнитудой $M \geq M_0$ [126].

Система FCAZ позволила перейти в проблеме распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений от простого распознавания образов к системному анализу. В частности, с помощью FCAZ удалось однозначно выделить подсистему высокосейсмичных зон от непустого дополнения с помощью точной границы.

На рис. 3.1 представлена блок-схема системы FCAZ.

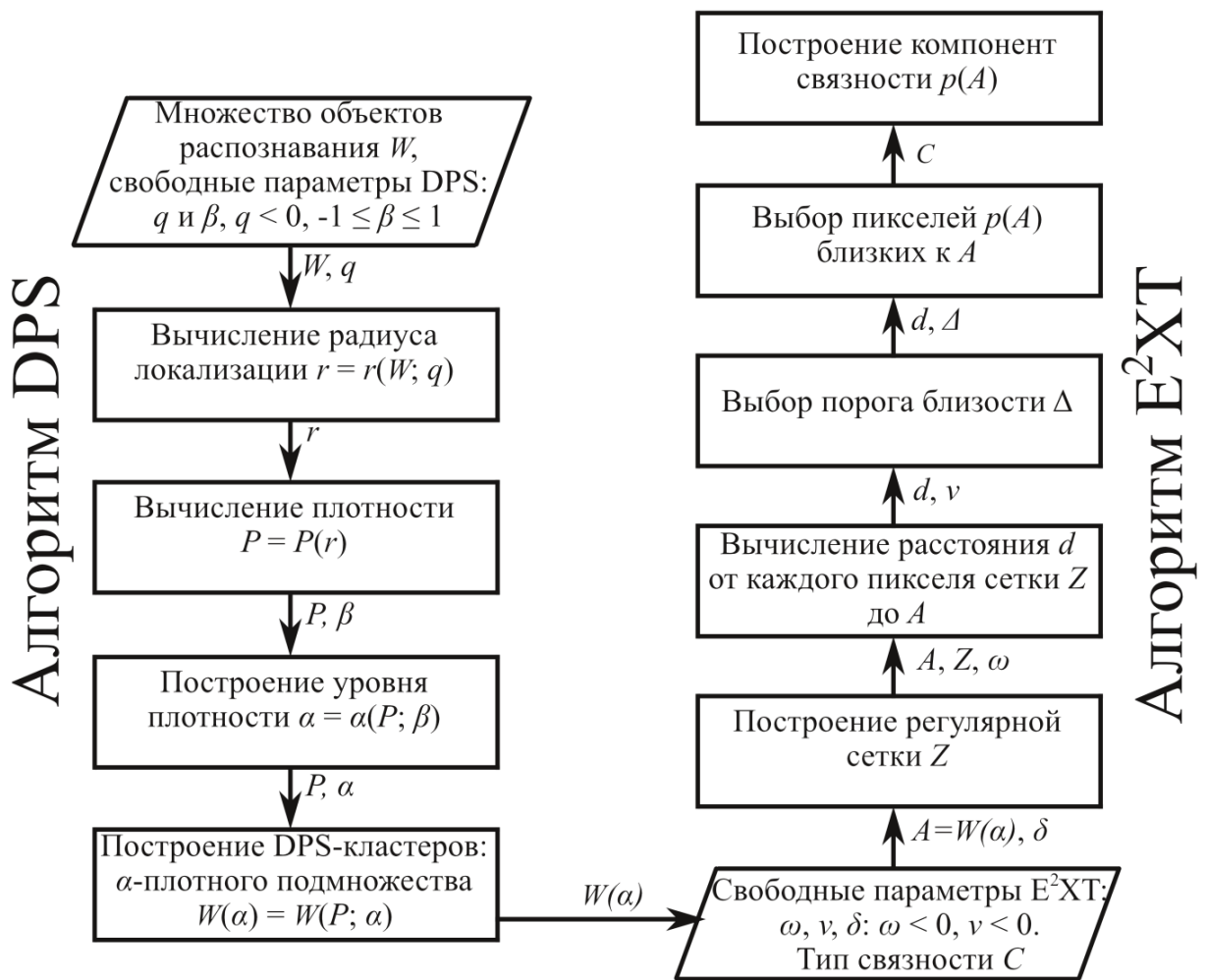


Рис. 3.1. Блок-схема системы FCAZ

3.3.1. Алгоритм DPS

Ядром системы FCAZ является алгоритм топологической фильтрации DPS [9, 55, 123, 228]. DPS есть логическое развитие алгоритмов ДМА-кластеризации [11, 43, 77, 228, 288 и др.]. Алгоритмы ДМА-кластеризации решают задачи топологической фильтрации многомерных массивов данных, выделяя в этих массивах наиболее существенные части и отсекая несущественные. DPS нацелен на выделение в конечном множестве Евклидова пространства плотных областей заданного уровня плотности α .

DPS имеет два свободных параметра: показатель $q < 0$ для расчета радиуса локализации r и параметр $\beta \in [-1, 1]$ – уровень максимальности

необходимой плотности $\alpha = \alpha(\beta, q)$ выделяемых DPS-кластеров. На выходе получается множество точек $W(\alpha(\beta, q))$ α -плотное в каждой своей точке. Подчеркнем, что алгоритм DPS крайне эффективен в рассматриваемой задаче потому, что он «притягивает» объекты распознавания в плотные кластеры, не оставляя изолированных точек [228].

Проведем описание алгоритма DPS согласно [71].

Радиус локализации. Пусть d – стандартное расстояние в евклидовом пространстве E . Радиус локализации r для W определяется как степенное среднее всех нетривиальных попарных расстояний $D(W)$ в W при $q < 0$:

$$r = \left(\frac{\sum_{d \in D(W)} d^q}{|D(W)|} \right)^{1/q}. \quad (3.5)$$

Плотность $P_A(w)$ произвольного подмножества $A \subseteq W$ в точке $w \in W$ задается как сумма весов, убывающим образом зависящих от расстояния до w от точек из r -окрестности $B_A(w, r)$ точки w в A :

$$P_A(w) = \sum_{g \in B_A(w, r)} \left(1 - \frac{d(w, g)}{r} \right). \quad (3.6)$$

Уровень плотности. Инструментом для выбора уровня плотности α являются нечеткие сравнения [46, 49]. Нечеткое сравнение $n(a, c)$ двух неотрицательных чисел a и c есть мера превосходства числа c над числом a со значениями на отрезке $[-1, 1]$. В алгоритме DPS используется следующее нечеткое сравнение:

$$n(a, c) = \frac{c - a}{\max(a, c)}. \quad (3.7)$$

Нечеткое сравнение числа a и конечного множества чисел C можно определить как среднее нечетких сравнений a со всеми числами из множества C . Естественно понимать такое сравнение как меру минимальности в случае $n(a, C)$ и меру максимальности в случае $n(C, a)$

числа a на фоне S . Мера максимальности дает возможность сформулировать необходимое требование к будущему результату алгоритма DPS: плотность A в каждой своей точке w должна быть значительной (достаточно максимальной) на фоне W .

Пусть $P_w(W)$ – значения плотности всего множества W во всех его точках, $\beta \in [-1, 1]$ – необходимый уровень максимальности плотности P на фоне W . Тогда уровень плотности $\alpha = \alpha(\beta)$ для P однозначно определяется по β из уравнения:

$$n(P_w(W), \alpha) = \beta. \quad (3.8)$$

Алгоритмическое ядро DPS. Задача алгоритма DPS состоит в построении такого множества $W(\alpha) = \{B_1, \dots, B_n\}$ (см. формулу 3.1), что его плотность будет не меньше уровня α во всех своих точках.

Вначале выберем все точки $W^1(\alpha)$, где плотность всего W не меньше уровня α . Нельзя утверждать, что плотность выбранных точек по-прежнему будет не меньше уровня α , если ограничиться только ими. Поэтому продолжим выбор точек с плотностью не меньшей α до тех пор, пока множество с предыдущего шага $W^n(\alpha) = \{w \in W : P_{W^{n-1}(\alpha)}(w) \geq \alpha\} \subseteq W^{n-1}(\alpha)$ не совпадет с множеством точек, где его плотность не меньше α . Построенное таким образом множество $W^n(\alpha)$ будет обладать свойством совершенности: $W(\alpha) = W^n(\alpha) = \{w \in W : P_{W(\alpha)}(w) \geq \alpha\}$. Множество $W(\alpha)$ и есть множество искомым DPS-кластеров $W(\alpha) = \{B_1, \dots, B_n\}$ (см. формулу 3.1).

3.3.2. Алгоритм E²XТ

В системе FCAZ алгоритм DPS продолжается формализованным алгоритмом плоского расширения кластеров E²XТ. Иными словами, для системы FCAZ справедлива формула (3.3). Зоны, полученные с помощью E²XТ, интерпретируются системой как искомые области, внутри которых, и

только в них, возможно возникновение сильных землетрясений. Как указывалось выше, E²XТ точно выделяет границы изучаемой системы, превращая, тем самым, FCAZ в метод системного анализа [261, 327].

Алгоритм E²XТ имеет четыре свободных параметра: δ – шаг сетки, тип связности C и $\omega < 0$, $\nu < 0$ для вычисления степенного среднего.

Перейдем к описанию алгоритма [71, 72, 123]. Пусть Z – регулярная сетка с шагом δ на координатной плоскости и $P(Z)$ некоторое ее покрытие квадратными пикселями p с центрами $z(p)$, лежащими в Z . Результат работы алгоритма DPS обозначим через A . Для каждого $p \in P(Z)$ обозначим через $D(p, A)$ совокупность нетривиальных расстояний от центра $z(p)$ до точек a из A . Расстоянием $d(p, A)$ между пикселем p и множеством A , будем называть степенное среднее при $\omega < 0$:

$$d(p, A) = \left(\frac{\sum_{D(p, A)} d(z(p), a)^\omega}{|D(p, A)|} \right)^{1/\omega}. \quad (3.9)$$

Вычислив $d(p, A)$, можно определить близкие к A пиксели $p(A)$. Для таких множеств, как $p(A)$, существует два типа связности: C_4 и C_8 : C_4 -связность выражается равенством $d(z(p), z(\bar{p})) = \delta$, а их C_8 -связность – $d(z(p), z(\bar{p})) \leq \sqrt{2}\delta$.

Осталось построить оболочку $p(A)$. Для этого формализуется понятие близости пикселей $p \in P(Z)$ к A . Это делается путем степенного усреднения совокупности всех нетривиальных расстояний $d(p, A)$ с показателем степени $\nu < 0$:

$$\Delta = \left(\frac{\sum_{D(P(Z), A)} d(p, A)^\nu}{|D(P(Z), A)|} \right)^{1/\nu}. \quad (3.10)$$

Если $d(p, A) \leq \Delta$, то $p \in P(Z)$ считается близким к A . Совокупность

близких к A узлов $p \in P(Z)$ образует искомые зоны.

3.3.3. Элементы искусственного интеллекта для автоматизации FCAZ.

Версия системы FCAZm

Модифицированная версия FCAZm системы FCAZ была создана в 2016 г. Модификация заключается в создании блоков искусственного интеллекта в структуре алгоритмов DPS и E²XТ. Эти блоки позволили автоматизировать выбор оптимальных значений ряда входных параметров алгоритмов, чем сделали результат более объективным и воспроизводимым [71]. На рис. 3.2 показана блок-схема системы FCAZm.

Как было сказано выше, алгоритм DPS имеет два свободных параметра: q и β . В свою очередь, модифицированный алгоритм DPSm фактически имеет только один свободный параметр $q < 0$.

Блок искусственного интеллекта, который модифицирует алгоритм DPS в алгоритм DPSm есть разработанный критерий выбора уровня максимальности плотности. Он позволяет формализовать и автоматизировать расчет оптимального значения свободного параметра β .

В отличие от алгоритма DPS (рис. 3.1) в DPSm (рис. 3.2) выполняется следующая формализованная процедура. Область определения $\beta \in [-1, 1]$

делится на $M - 1$ равных отрезков $[-1, 1] = \bigcup_{m=1}^{M-1} [\beta_m, \beta_{m+1}]$, где $\beta_1 = -1$, $\beta_M = 1$,

$\beta_m = \beta_1 + \frac{2(m-1)}{M-1}$. Затем, для каждого из $\beta \in \mathbf{\beta} = \{\beta_m | M\}$ применяется

алгоритм DPS в его описанном выше классическом варианте (рис. 3.1). Таким образом, имеем M наборов DPS-кластеров, обозначенных на блок-схеме (рис. 3.2) через $DPS(\alpha)$. Заметим, что, как и следовало ожидать, при фиксированном значении параметра β блок-схема FCAZm (рис. 3.2) вырождается в блок-схему FCAZ (рис. 3.1).

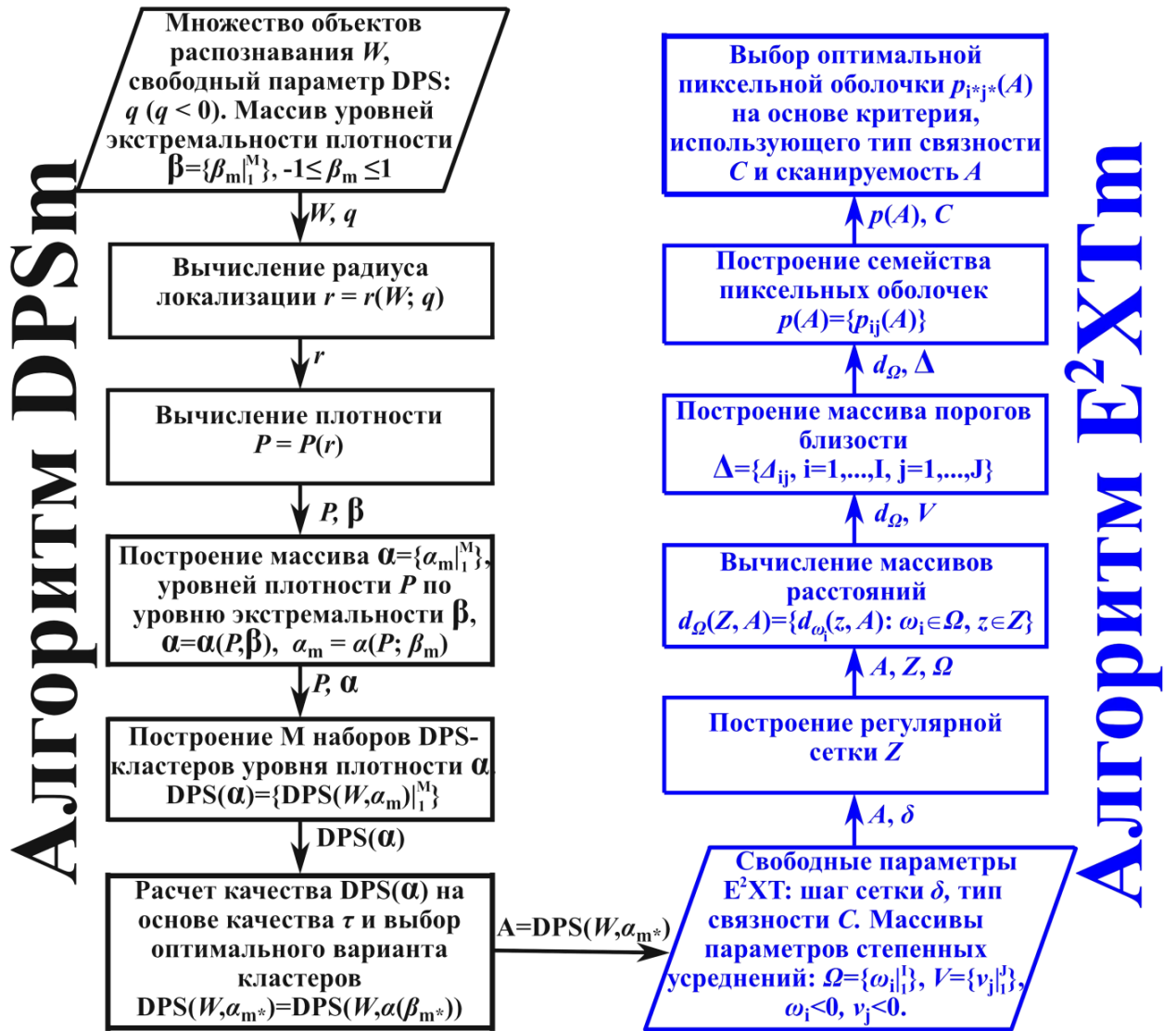


Рис. 3.2. Блок-схема системы FCAZm

Далее в $DPS(\alpha)$ выбирается оптимальный вариант кластеров $\{B_1, \dots, B_n\}$. Для этого рассчитывается качество каждого из M наборов кластеров, входящих в $DPS(\alpha)$.

Качеством $\tau(A)$ множества A считается всякое формальное выражение преимущества числовой совокупности $P_A(A)$ над числовой совокупностью $P_A(\bar{A})$, а именно:

$$\tau(A) = \tau_{k\xi}(A) = M_k(P_A(A)) - M_\xi(P_A(\bar{A})), k \leq -2, \xi \geq 2, \quad (3.11)$$

где M_k и M_ξ определяются подобно (3.5).

Оптимальное значение β^* определяется путем нечетких сравнений каждого $\tau(W(\alpha(\beta_i)))$ со всеми $\tau(W(\alpha(\beta)))$, $\beta \in [-1,1]$ и выбором наименьшего значения β^* , такого, что $\tau(W(\alpha(\beta^*)))$ является «достаточно» большим на фоне остальных $\tau(W(\alpha(\beta)))$. Таким образом, β^* выбирается однозначно и, по существу, β перестает быть свободным параметром. Набор кластеров $W(\alpha(\beta^*))$ объявляется искомым результатом алгоритма DPStm.

Так же, как для FCAZ, в системе FCAZm алгоритм DPStm продолжается формализованным алгоритмом плоского расширения кластеров E^2XTm . Иными словами, для системы FCAZm так же справедлива формула (3.3).

Алгоритм E^2XT имеет четыре свободных параметра: δ – шаг сетки, тип связности C и $\omega < 0$, $\nu < 0$ для вычисления степенного среднего. В свою очередь, модифицированный E^2XTm фактически имеет только два свободных параметра: δ и C . Это достигается тем, что заранее разбивается область изменения ω и ν на равные сегменты и оптимизируется дальнейшая процедура относительно этого разбиения.

Модификация E^2XT до E^2XTm заключается во включении в алгоритм нового блока, который будем называть блоком искусственного интеллекта. Он позволяет автоматизировать выбор оптимальных значений свободных параметров ω и ν с помощью следующей формализованной процедуры.

За сканируемость первоначального результата DPS (DPStm) отвечает

отношение: $SE^2XT(A) = \frac{|P(A) \cap P(A)|}{|P(A) \cup P(A)|}$, где $P(A) = \{p \in P : p \cap A \neq \emptyset\}$. За

связность пиксельной оболочки $CE^2XT(A)$ – порядок разбиения $E^2XT(A)$ на компоненты связности.

Условимся, что в алгоритме варьируются только свободные параметры ω и ν . Будем считать, что ω и ν меняются дискретным регулярным образом

и проведем разбиение $\Omega = \{\omega_i | I\}$, $V = \{v_j | J\}$. Возникающие зависимости $SE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ и $CE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ образуют содержательную связку: как правило, чем (ω_i, v_j) меньше, тем сканируемость $SE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ больше, а связность $CE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ меньше. Поэтому очевидно, что их соединение в единый критерий $K(SE^2XT(\omega_i, v_j)(A), CE^2XT(\omega_i, v_j)(A))$ будет результативным и позволит автоматизировать выбор ω и v .

Предварительно показатели SE^2XT и CE^2XT нормируются в единой шкале с помощью нечеткого сравнения $n(a, c)$ (3.7).

Нормирование сканируемости: чем $SE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ выше, тем лучше.

Поэтому в качестве нормирования сканируемости $\overline{SE^2XT}(\omega_i, v_j)(A)$ принимается мера максимальности $SE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$:

$$\begin{aligned} \overline{SE^2XT}(\omega_i, v_j)(A) &= mes \max(SE^2XT(\omega_i, v_j)(A)) = \\ &= \sum_{\bar{i}=1}^I \sum_{\bar{j}=1}^J \frac{n(SE^2XT(\omega_{\bar{i}}, v_{\bar{j}})(A), SE^2XT(\omega_i, v_j)(A))}{I \cdot J} \cdot \end{aligned} \quad (3.12)$$

Нормирование связности: чем показатель $CE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$ ниже, тем лучше (т.е. оболочка $p(A)$ связнее). Поэтому в качестве нормирования связности $\overline{CE^2XT}(\omega_i, v_j)(A)$ принимается мера минимальности $CE^2XT(\omega_i, v_j)(A)$:

$$\begin{aligned} \overline{CE^2XT}(\omega_i, v_j)(A) &= mes \min(CE^2XT(\omega_i, v_j)(A)) = \\ &= \sum_{\bar{i}=1}^I \sum_{\bar{j}=1}^J \frac{n(CE^2XT(\omega_i, v_j)(A), CE^2XT(\omega_{\bar{i}}, v_{\bar{j}})(A))}{I \cdot J} \cdot \end{aligned} \quad (3.13)$$

Критерий K : т.к. нечеткое сравнение принимает значения на отрезке $[-1, 1]$, то и значения $\overline{SE^2XT}$ и $\overline{CE^2XT}$ также принимает значения на отрезке

$[-1, 1]$ и можно их соединить возрастающей функцией $K(x, y)$ на квадрате $[-1, 1]^2$.

Выбор оптимальной пары $(\omega_{i^*}, \nu_{j^*})$ значений параметров ω и ν производится путем максимизации $K(\omega_i, \nu_j)$:

$$(\omega_{i^*}, \nu_{j^*}) = \arg \max_{(i, j)} K(\omega_i, \nu_j). \quad (3.14)$$

Таким образом, ω и ν выбираются однозначно и, по существу, перестают быть свободными параметрами. По сути, свободными параметрами системы FCAZ_m остаются лишь показатель $q < 0$ радиуса локализации в DPS_m, а также шаг сетки δ и тип связности C в E²XТ_m. Такой переход от системы FCAZ к FCAZ_m усиливает объективность и воспроизводимость результатов подхода FCAZ в целом.

Везде ниже (если не вводится дополнительное уточнение) говоря FCAZ, DPS и E²XТ будем понимать их модифицированные версии FCAZ_m, DPS_m и E²XТ_m соответственно.

3.3.4. Последовательное распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений для нескольких пороговых магнитуд

С помощью оригинальной алгоритмической системы FCAZ [71, 72] распознавание мест возможного возникновения землетрясений проводится на базе кластеризации каталога землетрясений рассматриваемого региона. Тем самым, FCAZ реализует принципиально новый подход к решению классической задачи ЕРА [62, 264].

Ранее, как в методе ЕРА, так и при применении FCAZ, распознавание потенциально высокосейсмичных зон проводилось для одного фиксированного для данного региона порога магнитуды M_0 .

В диссертационной работе разработан новый алгоритм для последовательного распознавания мест возможного возникновения сильных

землетрясений в одном и том же регионе [74]. Он базируется на идее многократного применения алгоритмической системы FCAZ к последовательно сужаемому путем DPS-кластеризации множеству эпицентров (объектов распознавания) достаточно слабых ($M \geq M_R$) землетрясений в регионе. Новый алгоритм будем называть «последовательный FCAZ» и обозначать SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning). Таким образом, классическая задача ЕРА впервые заменяется системно более сложной задачей последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений в едином регионе для нескольких пороговых магнитуд. Дадим строгое описание SFCAZ [53, 74].

Пусть \tilde{K} – каталог землетрясений данного сейсмоактивного региона D . В нем выбирается подмножество событий (подкаталог) $K \subset \tilde{K}$, определяемое условием на магнитуду $K = \{k \in \tilde{K} : M(k) \geq M_R\}$, где $M(k)$ – магнитуда события $k \in \tilde{K}$. FCAZ, при фиксированном наборе параметров $\gamma = \{q, \beta, \delta, \omega, \nu, C\}$, осуществляет однозначное отображение каталога K в некоторое несвязное объединение собственных подмножеств рассматриваемого региона $D: \text{FCAZ}(\gamma): K \mapsto \prod_{i=1}^{N_p} D_i$.

Система FCAZ является композицией двух алгоритмов DPS и E²ХТ: $\text{FCAZ} = \text{E}^2\text{ХТ} \circ \text{DPS}$, где $\text{DPS}(q, \beta): K \rightarrow \prod_{i=1}^{N_p} K_i$, $K_i \subset K$ – плотные сгущения (скелетные кластеры) эпицентров $k \in K$, распознанные алгоритмом в D ; $\text{E}^2\text{ХТ}(\delta, \omega, \nu): K_i \rightarrow D_i$, $\forall i = 1, \dots, N_p$ ($K_i \subset K$, $D_i \subset D$) переводящий 1D сгущения эпицентров землетрясений в 2D плоские зоны, где могут возникать сильные землетрясения [71].

Не ограничивая общности предположим, что распознавание мест возможного возникновения землетрясений (проблема ЕРА) в данном регионе имеет смысл для нескольких последовательно возрастающих порогов

магнитуды $M_0^1 < M_0^2 < \dots < M_0^s$. Применим FCAZ к задаче, определяемой порогом магнитуды M_0^1 . Для M_0^1 существует такое γ_1 , что FCAZ(γ_1) строит скелетные высокосейсмичные кластеры $K_1 = \prod_{i=1}^{N_{p_1}} K_i^1$ и 2D зоны $\prod_{i=1}^{N_{p_1}} D_i^1$ возможного возникновения землетрясений с $M \geq M_0^1$.

Для магнитудного порога M_0^2 применим FCAZ к подкаталогу K_1 , который состоит из эпицентров, принадлежащих кластерам K_i^1 , распознанным на предыдущем этапе как высокосейсмичные для порога M_0^1 . Для M_0^2 существует такое γ_2 , что FCAZ(γ_2) строит скелетные высокосейсмичные кластеры $K_2 = \prod_{i=1}^{N_{p_2}} K_i^2$ и 2D зоны $\prod_{i=1}^{N_{p_2}} D_i^2$ возможного возникновения землетрясений с $M \geq M_0^2$.

Аналогичным образом решается задача для всех последующих порогов начиная с M_0^3 .

Результаты FCAZ-распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений (см. следующие Главы диссертации) оказались весьма интересными. Тот факт, что распознанные FCAZ-зоны для некоторой магнитуды будут содержать в себе FCAZ-зоны для большей магнитуды очевиден.

Аналізу вложенных друг в друга потенциально высокосейсмичных зон помогает интерпретация полученных FCAZ-зон как нечетких множеств. Проведем описание такой интерпретации для двух магнитудных порогов M_0^1, M_0^2 ($M_0^1 < M_0^2$).

Функция принадлежности в точке для FCAZ-зон определяется возможностью возникновения в ней землетрясения максимальной магнитуды.

Обозначим рассматриваемый нами регион через R . Пусть функция

$F: R(x, y) \rightarrow [0, M_1]$ ставит в соответствие каждой точке $(x, y) \in R$ рассматриваемого региона значение максимально возможной магнитуды землетрясения с эпицентром (x, y) . Здесь M_1 – максимальная возможная магнитуда землетрясения во всем рассматриваемом регионе. Введем функцию $\Phi(x, y) = \frac{1}{M_1} F(x, y): R \rightarrow [0, 1]$ и будем интерпретировать $\Phi(x, y)$ как функцию принадлежности точки $(x, y) \in R$ к рассматриваемому нечеткому множеству FCAZ-зон.

Пусть $D_{M_0^1}$ и $D_{M_0^2}$ соответственно зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq M_0^1$ и $M \geq M_0^2$. Введем предположение, что $D_{M_0^2}$ есть собственное подмножество $D_{M_0^1}$, то есть $D_{M_0^1} \supset D_{M_0^2}$, но $D_{M_0^1} \setminus D_{M_0^2} \neq \emptyset$. Нетрудно установить, что функция принадлежности $\Phi(x, y)$ обладает следующими свойствами:

$$\forall (x, y) \in R \setminus D_{M_0^1} \Rightarrow F(x, y) < M_0^1 \Leftrightarrow \Phi(x, y) < \frac{M_0^1}{M_1}, \quad (3.15)$$

$$\forall (x, y) \in D_{M_0^2} \Rightarrow F(x, y) \geq M_0^2 \Leftrightarrow \Phi(x, y) \geq \frac{M_0^2}{M_1}, \quad (3.16)$$

$$\forall (x, y) \in D_{M_0^1} \setminus D_{M_0^2} \Rightarrow M_0^1 \leq F(x, y) < M_0^2 \Leftrightarrow \frac{M_0^1}{M_1} \leq \Phi(x, y) < \frac{M_0^2}{M_1}. \quad (3.17)$$

Знание точного вида функции принадлежности $\Phi(x, y)$ для региона R эквивалентно полному решению проблемы распознавания максимально возможной магнитуды для каждой точки $(x, y) \in R$. Оценки (3.15), (3.16) и (3.17) устанавливают важные свойства этой функции.

3.4. Обсуждение

Инструментом настоящего диссертационного исследования служат оригинальные алгоритмы ДМА [42, 49 и др.] DPS и E²XТ, образующие, в их композиции, систему распознавания образов FCAZ. Возникает вопрос, является ли эта система частью методологии перспективного системного анализа (advance systems analysis) [306]? Результаты данной Главы дают положительный ответ на этот вопрос.

Действительно, формальной характеристикой системного анализа является четкое и однозначное определение изучаемой системы как части объемлющего целого. При этом изучаемая система отделяется от нечеткого дополнения однозначно определенной и воспроизводимой границей. Алгоритм E²XТ позволяет определить искомые границы высокосейсмичных зон именно таким системным образом. При этом наличие в E²XТ блока искусственного интеллекта дает возможность вычислить управляющие этой операцией свободные параметры алгоритма объективным, воспроизводимым и автоматизированным образом. Таким образом, система распознавания образов FCAZ может рассматриваться как метод системного анализа с точки зрения наличия вышеуказанного свойства делимости.

С другой стороны классический метод ЕРА распознавания мест возможного возникновения землетрясений [62, 94, 96, 98, 206] является методом распознавания образов, но не методом системного анализа. Действительно, ЕРА фактически определяет зоны возможного возникновения сильных землетрясений как нечеткие множества. Последние интерпретируются в виде кругов единого для всех объектов радиуса с центрами в пересечениях осей линеаментов.

В методе FCAZ системообразующие объекты определены строго однозначно как эпицентры землетрясений. В тоже время, в методе ЕРА объекты – пересечения осей морфоструктурных линеаментов, – по своей сути, также являются элементами нечеткого множества. Такая «нечеткость»

вытекает из неоднозначности процесса морфоструктурного районирования [14, 39, 231]. Таким образом, и на уровне определения объектов распознавания также наблюдается четкая «выделимость» их совокупности в методе FCAZ и отсутствие таковой в методе ЕРА. Это также иллюстрирует тот факт, что система распознавания FCAZ является методом системного анализа, в то время как ЕРА остается лишь эффективной процедурой распознавания образов.

Другим характеристическим свойством системного анализа является его инвариантность по отношению к масштабам изучаемых подобных явлений. Иными словами, метод адаптируется, «настраивается» под данную «степень подобия» изучаемой системы. Этим свойством обладают оба подхода, FCAZ и ЕРА. Действительно, путем вариации свободных параметров, как FCAZ, так и ЕРА успешно «настраиваются» на решение подобных задач распознавания высокосейсмичных зон. При этом конкретная реализация задачи в классе ей подобных определяется значениями пороговой магнитуды M_0 . Оба метода, FCAZ и ЕРА, применимы к распознаванию мест возможного возникновения значительных, сильных и сильнейших землетрясений. При этом полученные ниже конкретные результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений рельефно демонстрируют преимущества инновационного метода системного анализа FCAZ.

Разработанный FCAZ-подход к проблеме ЕРА позволяет поэтапно выполнить распознавание мест возможного возникновения землетрясений для конечной последовательности возрастающих магнитудных порогов $M_0^1 < M_0^2 < \dots < M_0^s$ в едином регионе. При этом предполагается, что $\forall i = 1, \dots, s$ задача имеет смысл. Отметим, что классический подход (алгоритмы «Кора-3», «Подклассы», «Хэмминг» и другие) к решению задачи ЕРА дает возможность проводить распознавание только для одного фиксированного порога M_0 , в силу малого количества объектов распознавания и эпицентров сильных землетрясений необходимых для формирования обучающих выборок. При этом, не очевидно, что

распознанные зоны для большей пороговой магнитуды будут находиться внутри зон, распознанных для меньшей пороговой магнитуды.

При распознавании методом FCAZ, по определению, результаты распознавания для магнитудной последовательности порогов $M_0^1 < M_0^2 < \dots < M_0^s$ удовлетворяют условию $K_i^j \supset K_i^{j+1}$, $D_i^j \supset D_i^{j+1}$, $j = 1, \dots, s - 1$. Таким образом, распознанные высокосейсмичные зоны для больших пороговых магнитуд вложены в соответствующие зоны для меньших. Соответственно, результаты последовательного FCAZ-распознавания могут быть непосредственно использованы при сейсмическом районировании.

Возможность FCAZ-распознавания для нескольких порогов магнитуд для одного и того же региона в некоторых случаях подтверждена результатами диссертационной работы.

3.5. Выводы

- Создана новая версия алгоритмической системы FCAZ. Конструкции алгоритмов DPS и E²XТ снабжены блоками искусственного интеллекта, которые позволяют осуществлять автоматизированный выбор оптимальных значений свободных параметров, что делает результат FCAZ-распознавания объективным и воспроизводимым.
- Показано, что метод FCAZ является частью методологии перспективного системного анализа.
- Разработан оригинальный метод SFCAZ последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений для возрастающих магнитудных порогов.

ГЛАВА 4. FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В данной Главе приводятся результаты использования метода FCAZ для распознавания мест возможного возникновения сильнейших ($M \geq 7.75$) землетрясений в регионах с очень высоким уровнем сейсмической опасности. В качестве таких регионов рассматриваются: горный пояс Анд Южной Америки и Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка и Курильских островов. Учитывая порог магнитуды $M \geq 7.75$, речь здесь идет о землетрясениях, представляющих собой стихийные бедствия.

4.1. Горный пояс Анд Южной Америки

Анды – возрожденные молодые горы. Они являются одной из самых сейсмоактивных зон Земли. Поднятие и опускание отдельных их участков продолжают в наше время.

Горный пояс Анд вытянут вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки от Панамского перешейка до Огненной Земли, между 12° с.ш. и 55° ю.ш., почти на 7.5 тыс. км. Они включают в себя территории 7 стран: Чили, Аргентина, Боливия, Перу, Эквадор, Колумбия и Венесуэла. Анды достигают максимальной ширины (700 км) примерно вблизи 20° ю.ш. (Чили и Боливия).

Почти на всем протяжении до 34° ю.ш. на юге высота гор больше 5 тыс. м. К югу от 34° ю.ш. горы постепенно снижаются до 1 км на Огненной Земле. Максимальная высота Анд равна 6 962 м (гора Аконкагуа в Аргентине). Анды ограничены с севера Карибским бассейном, с юга – котловиной моря Скотта. На востоке горный пояс Анд граничит с Южно-Американской докембрийской платформой (в северной части) и эпигерцинской Патагонской плитой (в южной) [39].

Впервые распознавание мест возможного возникновения сильнейших

землетрясений в Андах было выполнено в начале 80-х годов прошлого века методом ERA [79].

4.1.1. Объекты распознавания

Границы региона, где проводится FCAZ-распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений в Андах, были существенно расширены на восток по сравнению с [79, 270] (рис. 4.1). Тем самым, в диссертационной работе системными методами распознавания образов изучена большая территория, чем в [79, 270].

Для формирования множества объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из каталога ANSS (Advanced National Seismic System) [273] в пределах 6° с.ш. – 46° ю.ш. и 62° з.д. – 90° з.д. за период 1963 – 2013 гг. В каталоге содержатся данные о 71 443 землетрясениях в рассматриваемом регионе Южной Америки за 1963 – 2013 гг.

Для выбора порога магнитуды M_R , начиная с которого эпицентры будут использоваться как объекты распознавания в Андах, была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) в каталоге. Порог M_c определяется как магнитуда, начиная с которой все землетрясения зарегистрированы. Адекватная оценка M_c имеет большое значение. Слишком большое значение M_c приводит к неполной выборке, в то время как ее слишком низкое значение может привести к частым ошибкам в значениях параметров сейсмичности, входящих в каталог [286, 287, 319, 322].

Оценки M_c проводятся как методами, основанными на анализе каталога, так и методами, основанными на анализе сейсмической сети. В диссертации используются первые из них. Они базируются на оценке близости закона Гутенберга-Рихтера и наблюдаемого графика повторяемости землетрясений. Значение магнитуды, на которой нижний конец наблюдаемого графика повторяемости удаляется от закона Гутенберга-Рихтера принимается в качестве M_c [287, 319]. В [287] приводятся некоторые из часто используемых

алгоритмов оценки и картирования M_c , основанные на анализе каталога: MAXC, GFT, MBS, OK1993, EMR, MBASS, BMC и др.

Для оценки значения M_c используемого каталога Анд нами был использован программный продукт ZMAP [323]. Вначале каталог был декластеризован по методике Резенберга [302]. Затем использование алгоритмов MAXC, GFT, MBS и EMR показало, что для рассматриваемого каталога $M_c \approx 4.4 - 4.6$. При этом известно, что алгоритмы MAXC и GFT дают нижнюю оценку значения M_c , а алгоритм MBS, наоборот, – верхнюю. Учитывая это, было принято решение использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq M_R = 4.5$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 16 556 таких землетрясениях. Расположение их эпицентров, являющихся объектами распознавания, на карте рассматриваемого региона показано на рис. 4.1.

Каталог коровых землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд был сформирован на основе рассматриваемого каталога ANSS и субкаталога, использованного для формирования обучающих выборок при распознавании в Андах методом ERA [79, 270] (табл. 4.1). Последний включает в себя сильнейшие события с начала XX века, произошедшие до 1960 г. включительно. Таким образом, два использованных каталога последовательно дополняют друг друга. Расположение эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$ в рассматриваемом регионе показано на рис. 4.1.

Карта-схема мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки, определенных А.Д. Гвишиани, Ал.Ан. Соловьевым и М.П. Жидковым методом ERA, была опубликована в 1982 году [79]. С момента публикации [79], в горном поясе Анд произошел ряд новых сильнейших землетрясений. Их эпицентры согласуются с результатами распознавания [79], что повышает достоверность последних.

Землетрясения с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд [79, 273]

№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M
1.	07.01.1901	-2.0	-82.0	7.8
2.	17.08.1906	-33.0	-72.0	8.6
3.	06.08.1913	-17.0	-74.0	7.9
4.	20.05.1918	-28.5	-71.5	7.9
5.	04.12.1918	-26.0	-71.0	7.75
6.	11.11.1922	-28.5	-70.0	8.4
7.	01.12.1928	-35.0	-72.0	8.3
8.	25.01.1939	-36.3	-72.3	8.3
9.	24.05.1940	-10.5	-77.0	8.4
10.	14.05.1942	-0.8	-81.5	8.3
11.	24.08.1942	-15.0	-76.0	8.6
12.	06.04.1943	-30.8	-72.0	8.3
13.	02.08.1946	-26.5	-70.5	7.9
14.	09.12.1950	-23.5	-67.5	8.3
15.	12.12.1953	-3.4	-80.6	7.75
16.	19.01.1958	1.4	-79.3	7.8
17.	22.05.1960	-39.5	-74.5	9.5
18.	28.12.1966	-25.5	-70.7	7.75
19.	31.05.1970	-9.18	-78.82	7.8
20.	03.03.1985	-33.14	-71.87	7.8
21.	30.07.1995	-23.34	-70.29	8.4
22.	23.06.2001	-16.27	-73.64	8.4
23.	15.08.2007	-13.39	-76.60	8.0
24.	27.02.2010	-36.12	-72.89	8.8

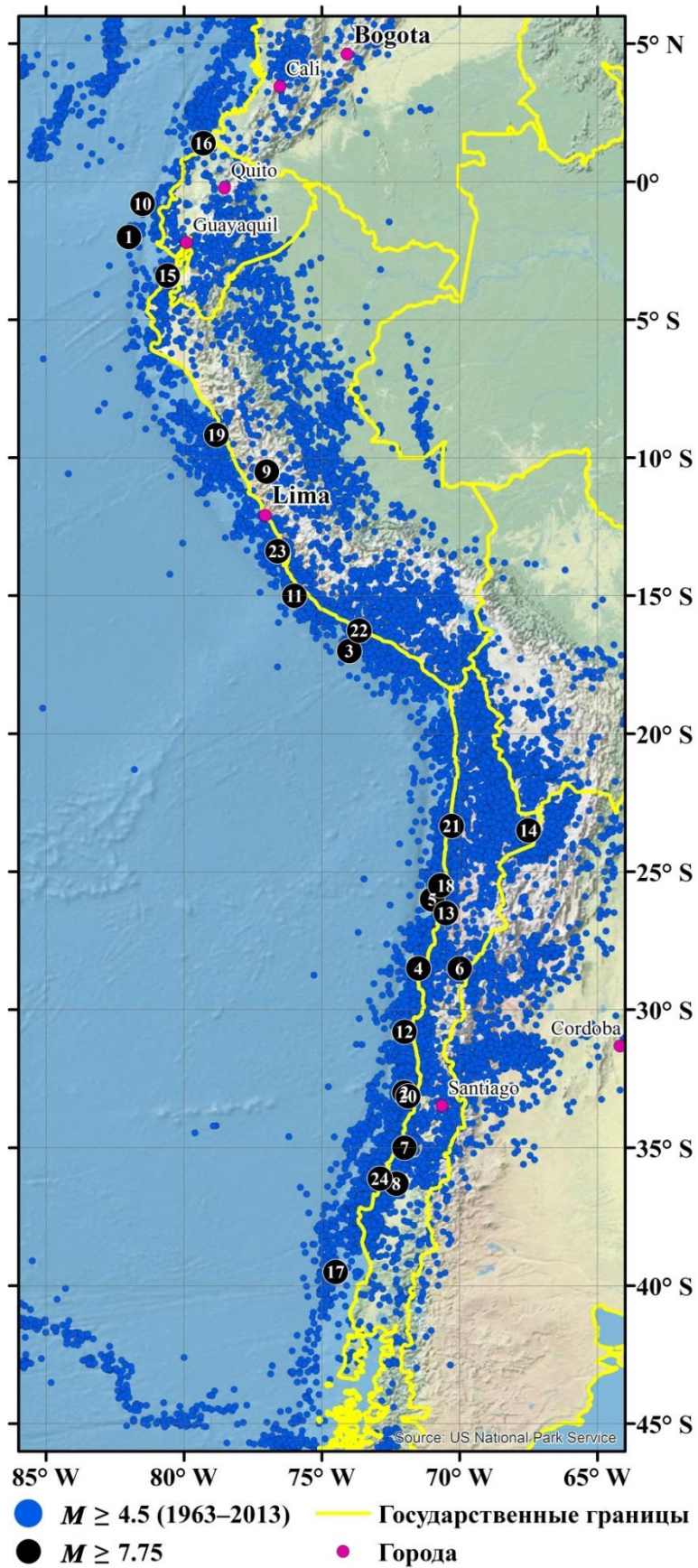


Рис. 4.1. Объекты распознавания системы FCAZ в горном поясе Анд (эпицентры землетрясений с $M \geq 4.5$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.1)

4.1.2. FCAZ-зоны

DPS-кластеризация эпицентров землетрясений осуществлялась с использованием разработанного критерия выбора уровня максимальности плотности (см. п. 3.3.3). Было выполнено 4 итерации алгоритма DPS. Вначале был применен алгоритм с уровнем плотности $\alpha_1(\beta_1)$. Полученное плотное множество эпицентров землетрясений $W_1(\alpha_1(\beta_1))$ было удалено из рассмотрения и алгоритм был применен второй раз к оставшемуся подмножеству с уровнем плотности $\alpha_2(\beta_2)$. Это дало новые DPS-кластеры эпицентров $W_2(\alpha_2(\beta_2))$, где $W_2 = W \setminus W_1(\alpha_1(\beta_1))$. Аналогичным образом были выполнены третья и четвертая итерации.

На каждой итерации алгоритм DPS применялся последовательно при значениях β , дискретно изменяющихся на отрезке $[-1, 1]$. Затем на основе полученных DPS-кластеров выбиралось оптимальное значение уровня максимальности плотности, т.е. оптимальное значение $\beta = \beta_i$, $i = 1, 2, 3, 4$. Полученные оптимальные значения параметра β на итерациях оказались следующими: $\beta_1 = 0.3$, $\beta_2 = 0.0$, $\beta_3 = 0.0$ и $\beta_4 = 0.2$. Значения параметра q равнялись соответственно: $q_1 = -3.0$, $q_2 = -2.5$, $q_3 = -2.5$ и $q_4 = -3.0$ ($r_1 = 16.21$ км, $r_2 = 46.49$ км, $r_3 = 62.73$ км и $r_4 = 26.88$ км).

Выбор параметра q осуществляется в алгоритме DPS из соображений того, что радиус локализации $r_q(W)$ не должен быть ни слишком маленьким, ни слишком большим. Иными словами, выделяемые DPS-кластеры, с одной стороны, не должны занимать слишком внушительную часть рассматриваемого региона, а с другой – не должны представлять собой объединения, состоящие всего из нескольких объектов распознавания.

Искомymi DPS-кластерами были объявлены все r -связные компоненты, входящие в $W_1(\alpha_1(\beta_1)) \cup W_2(\alpha_2(\beta_2)) \cup W_3(\alpha_3(\beta_3)) \cup W_4(\alpha_4(\beta_4))$. Отметим,

что, в DPS-кластеры вошло 67% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$). На рис. 4.2 зеленым цветом показаны распознанные DPS-кластеры.

К высокосейсмичным DPS-кластерам (рис. 4.2) был применен алгоритм E^2XT . Оптимальные значения входных параметров $\omega = -3.75$ и $\nu = -2.25$ алгоритма были вычислены автоматически с помощью разработанного блока искусственного интеллекта (см. п. 3.3.3). При этом использовалась регулярная сетка с шагом 0.1° и тип связности C_8 . На рис. 4.3 показаны распознанные системой FCAZ зоны возможного возникновения землетрясений в горном поясе Анд.

Как видно из рис. 4.3, распознанные FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров исторических и инструментальных землетрясений с $M \geq 7.75$. Эпицентры практически всех землетрясений с $M \geq 7.75$, используемые в [79] для обучения при распознавании методом EPA, попадают во FCAZ-зоны или располагаются на их границах. То же самое можно сказать и про эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ произошедшие после опубликования [79].

Из 24 рассматриваемых (табл. 4.1) землетрясений с $M \geq 7.75$ эпицентр только одного (4.2%) не попал в распознанные FCAZ-зоны (рис. 4.3), создавая ошибку типа «пропуск цели». Это эпицентр землетрясения, произошедшего 24 мая 1940 года севернее города Лима (№ 9 в табл. 4.1) более чем за 20 лет до начала активных инструментальных сейсмологических наблюдений в регионе. Это может быть причиной того, что не имеется достаточного числа объектов (эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$) для его распознавания. Иными словами, кластер объектов не может здесь образоваться потому, что собственно объекты распознавания в окрестности этого эпицентра отсутствуют. При дальнейшем расширении каталога со временем этот «пропуск цели» может оказаться в новом высокосейсмичном кластере, распознанном позже на основе вновь появившихся объектов.

Заметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 69% землетрясений с $M \geq 5.0$ из числа имеющихся в используемом при распознавании инструментальном каталоге. При этом зоны занимают примерно половину площади сейсмоактивного горного пояса Анд и активной зоны субдукции. Все это позволяет с большой степенью достоверности интерпретировать полученные FCAZ-зоны как места возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд Южной Америки.

Наилучшим обоснованием достоверности результатов распознавания высокосейсмичных зон является проведение чистого эксперимента, т.е. анализ расположения эпицентров землетрясений, произошедших после выполнения распознавания, относительно этих зон. В данном случае чистый эксперимент сводился к анализу согласованности FCAZ-зон и эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$, произошедших после окончания используемого для распознавания инструментального каталога.

В рассматриваемом регионе после 2013 г. произошло 3 землетрясения с $M \geq 7.75$. Так 1 апреля 2014 г. в 23:46:49 UTC произошло землетрясение с магнитудой $M = 8.2$. Эпицентр этого сильнейшего землетрясения располагается к северо-востоку от побережья Чили. Землетрясение вызвало цунами. В 2015 году в регионе произошло еще более сильное землетрясение с $M = 8.3$ (16.09.2015; 22:54:33 UTC; эпицентр располагался у малонаселенного побережья Чили; 5 человек погибло). 16 апреля 2016 г. в Эквадоре произошло землетрясение с $M = 7.8$. Информация об этих трех землетрясения никак не использовалась в процессе распознавания. Тем самым, эти землетрясения дают нам материал чистого эксперимента.

Эпицентры землетрясений 2014, 2015 и 2016 гг. показаны на рис. 4.3, соответственно, черной, фиолетовой и синей звездами. Первые два эпицентра находятся строго внутри FCAZ-зон. Третий эпицентр находится на небольшом расстоянии от распознанных FCAZ-зон. Таким образом, получен объективный и независимый от результатов исследования аргумент в пользу достоверности результатов проведенного FCAZ-распознавания.

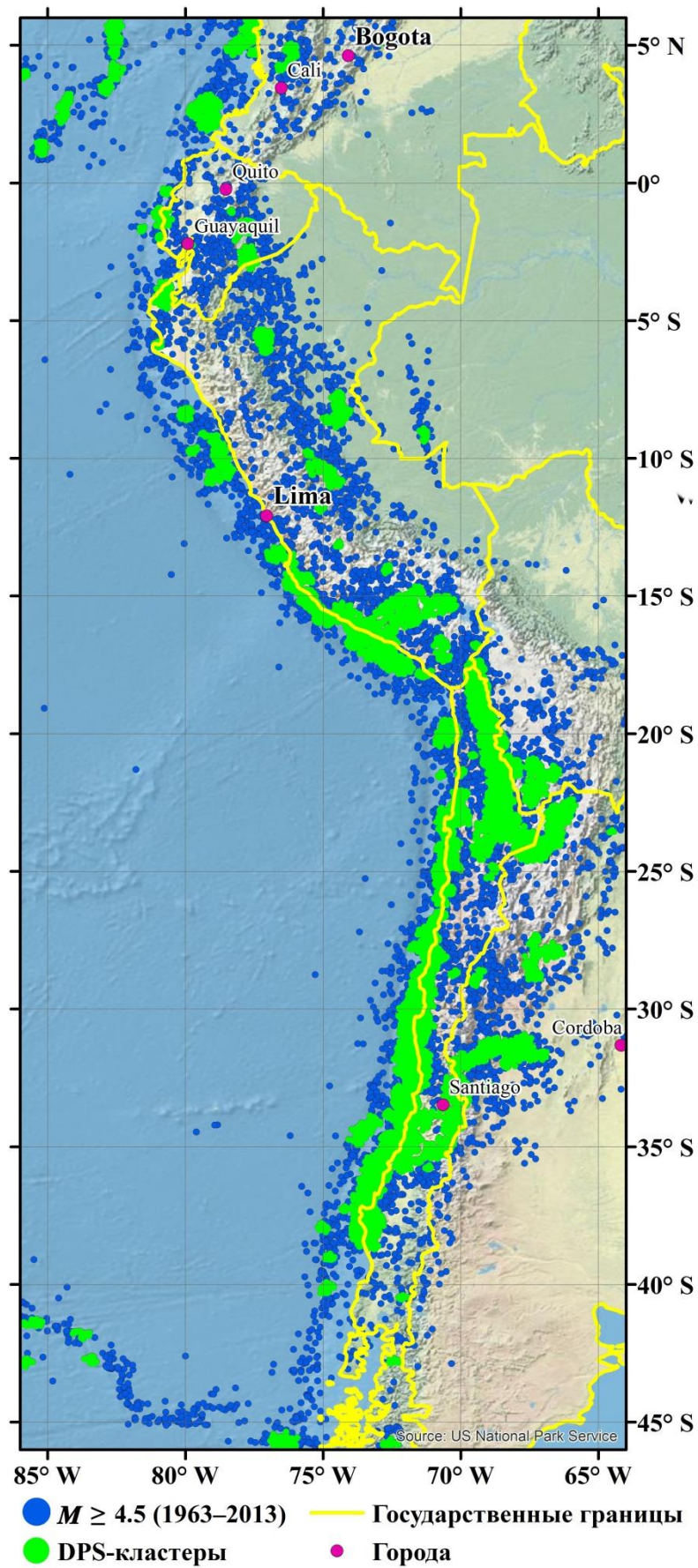


Рис. 4.2. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$ в Южной Америке

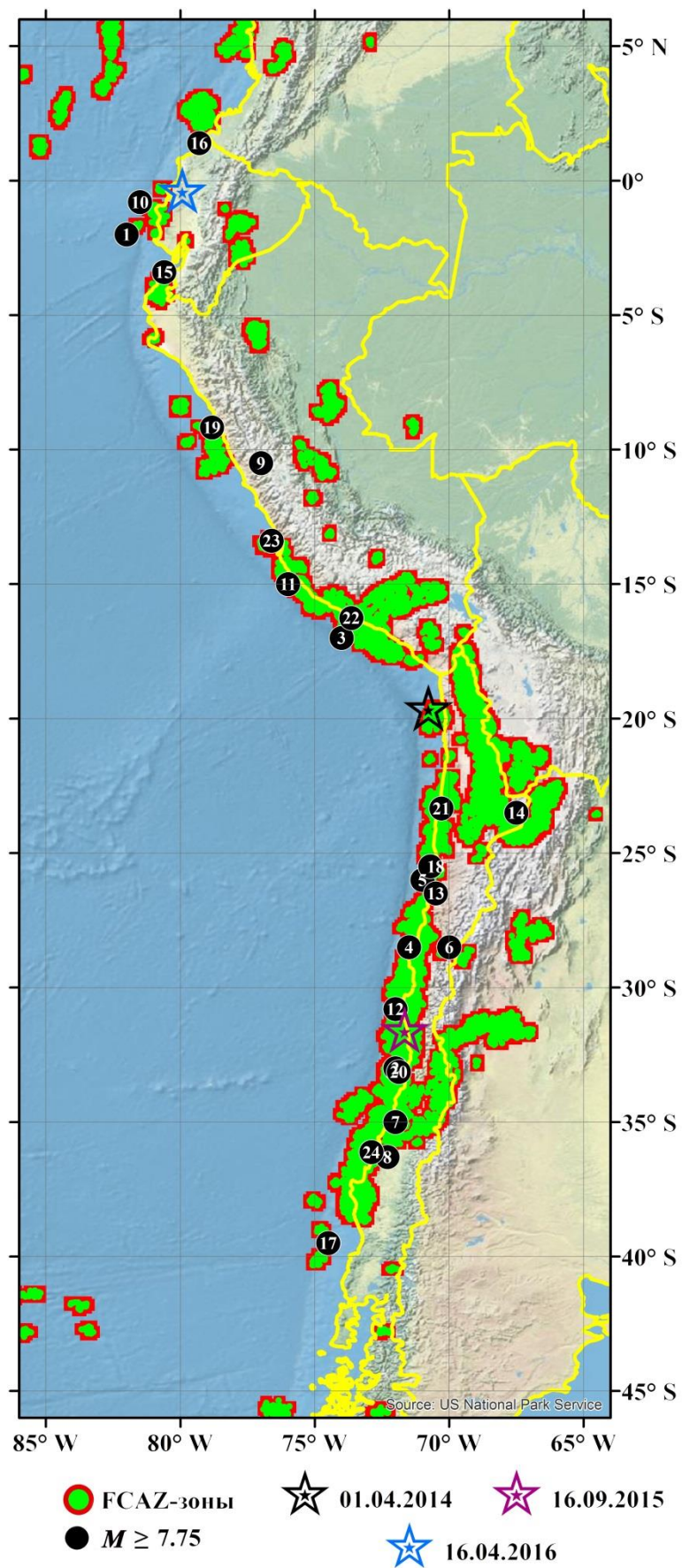


Рис. 4.3. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$

4.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка

В 1984 г. распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка было выполнено А.Д. Гвишиани, М.П. Жидковым и Ал.Ан. Соловьевым методом ЕРА [78]. Следует заметить, что авторами не проводилось обучение алгоритма дихотомии «Кора-3», используемого для распознавания в [78]. Зоны возможного возникновения землетрясений были получены путем переноса критериев высокой сейсмичности с горного пояса Анд [79] на территорию Камчатки.

С момента публикации картированных таким образом высокосейсмичных ЕРА-зон на Камчатке [78] произошло одно новое сильнейшее землетрясение (5 декабря 1997 г. с $M = 7.8$). Его эпицентр располагается внутри ЕРА-зон, что повышает достоверность последних. На Тихоокеанском побережье Камчатки эпицентры всех сильнейших коровых землетрясений расположены в пределах континентального склона [78].

4.2.1. Объекты распознавания

В качестве объектов распознавания системы FCAZ использовались эпицентры землетрясений из каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [153] за период 1962 – 2015 гг. с глубиной гипоцентров не превосходящей 70 км. Для выбора глубины была построена гистограмма распределения событий по глубине, показавшая, что подавляющая часть землетрясений приходится на слой 0 – 70 км, что согласуется с результатами работы [167]. Следует заметить, что для проведения работ по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений методом академика С.А. Федотова используются землетрясения с глубиной 0 – 80 км [218].

Используемый инструментальный каталог содержит информацию о

землетрясениях с магнитудой $M \geq 3.5$. Оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) каталога показала, что начиная с магнитуды $M = 3.5$ каталог является полным. В связи с этим, в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 3.5$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 44 113 таких землетрясениях (рис. 4.4).

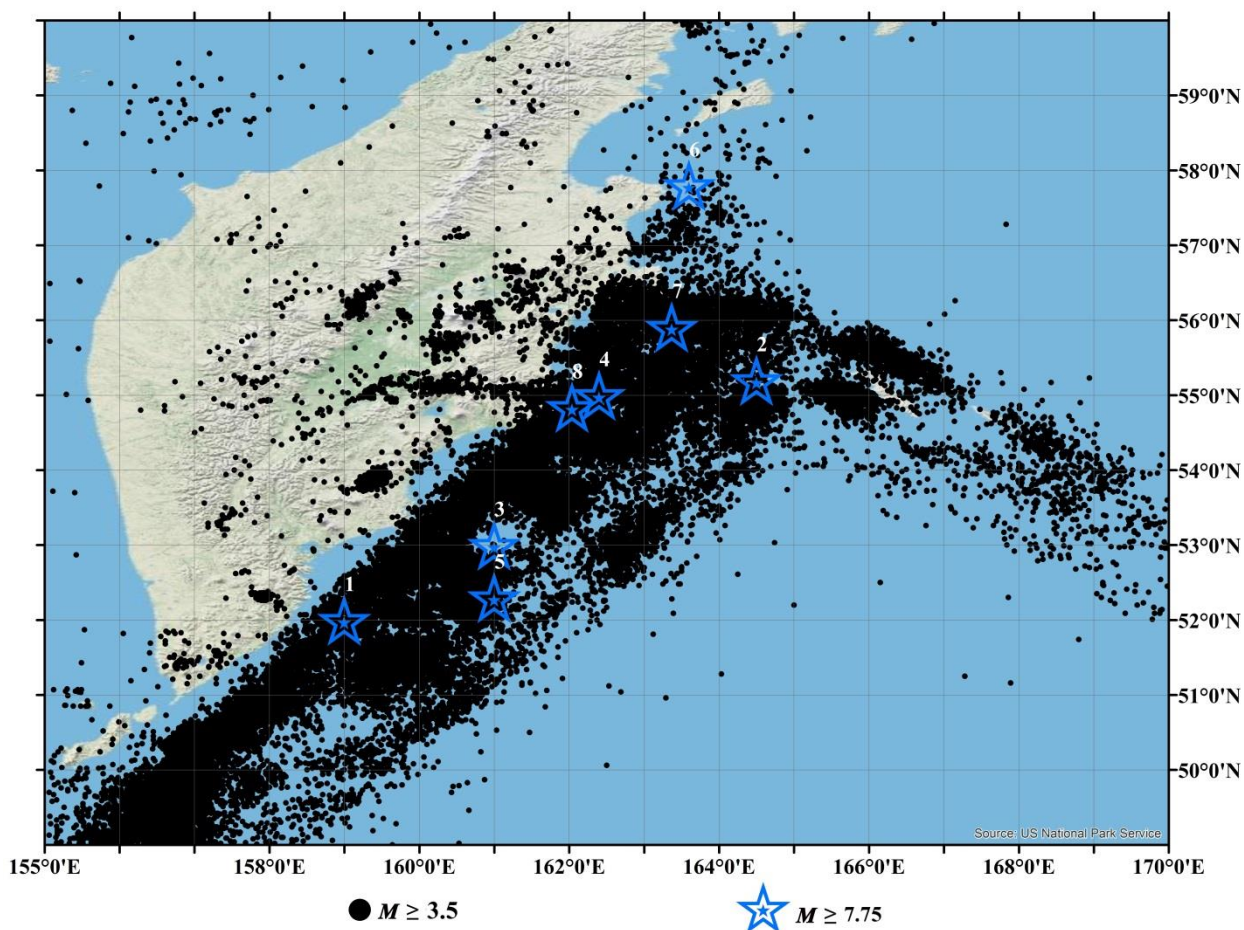


Рис. 4.4. Объекты распознавания системы FCAZ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.5$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2)

Каталог коровых сильнейших ($M \geq 7.75$) землетрясений Тихоокеанского побережья Камчатки, начиная с 1900 г., был сформирован на основе рассматриваемого инструментального каталога [153] и каталогов из работ [78, 183, 206] (табл. 4.2 и рис. 4.4).

Землетрясения с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова
Камчатка [78, 153, 183, 206]

№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M
1.	25.06.1904	52.00	159.00	7.75
2.	30.01.1917	55.20	164.50	8.1
3.	03.02.1923	53.00	161.00	8.5
4.	24.02.1923	55.00	162.40	7.75
5.	04.11.1952	52.30	161.00	8.5
6.	22.11.1969	57.80	163.60	7.75
7.	15.12.1971	55.91	163.37	7.8
8.	05.12.1997	54.84	162.04	7.8

4.2.2. FCAZ-зоны

К множеству объектов распознавания был применен алгоритм DPS. Было выполнено 2 итерации. Оптимальные значения параметра β – уровня максимальности плотности DPS-кластеров – вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта.

В DPS-кластеры вошло 73.3% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 3.5$). DPS-кластеры показаны зеленым цветом на рис. 4.5. Вычисленные оптимальные значения параметра β равнялись: $\beta_1 = -0.15$, $\beta_2 = -0.2$. Радиус локализации алгоритма на итерациях равнялся: $r_1 = 30.9$ км, $r_2 = 33.7$ км ($q_1 = q_2 = -2.5$).

К распознанным высокосейсмичным DPS-кластерам эпицентров землетрясений (рис. 4.5) был применен алгоритм E²ХТ. Оптимальные значения его входных параметров $\omega = -4$ и $\nu = -2.25$ вычислялись с помощью автоматизированной процедуры. При этом шаг географической сетки равнялся 0.05° . Картированные таким образом двумерные зоны возможного возникновения землетрясений на Камчатке показаны совокупностью

зеленого и красного цветов на рис. 4.6. Внутри распознанных FCAZ-зон попадает 7 из 8 (87.5%) сильнейших землетрясений региона с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2, рис. 4.6).

Отметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 73% землетрясений с $M \geq 4.0$ из числа имеющихся в рассматриваемом инструментальном каталоге. При этом FCAZ-зоны занимают 40% площади сейсмоактивных Курило-Камчатской и Алеутской дуг, попадающих в границы рассматриваемого региона (рис. 4.4 – 4.6). Все это позволяет с большой степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка.

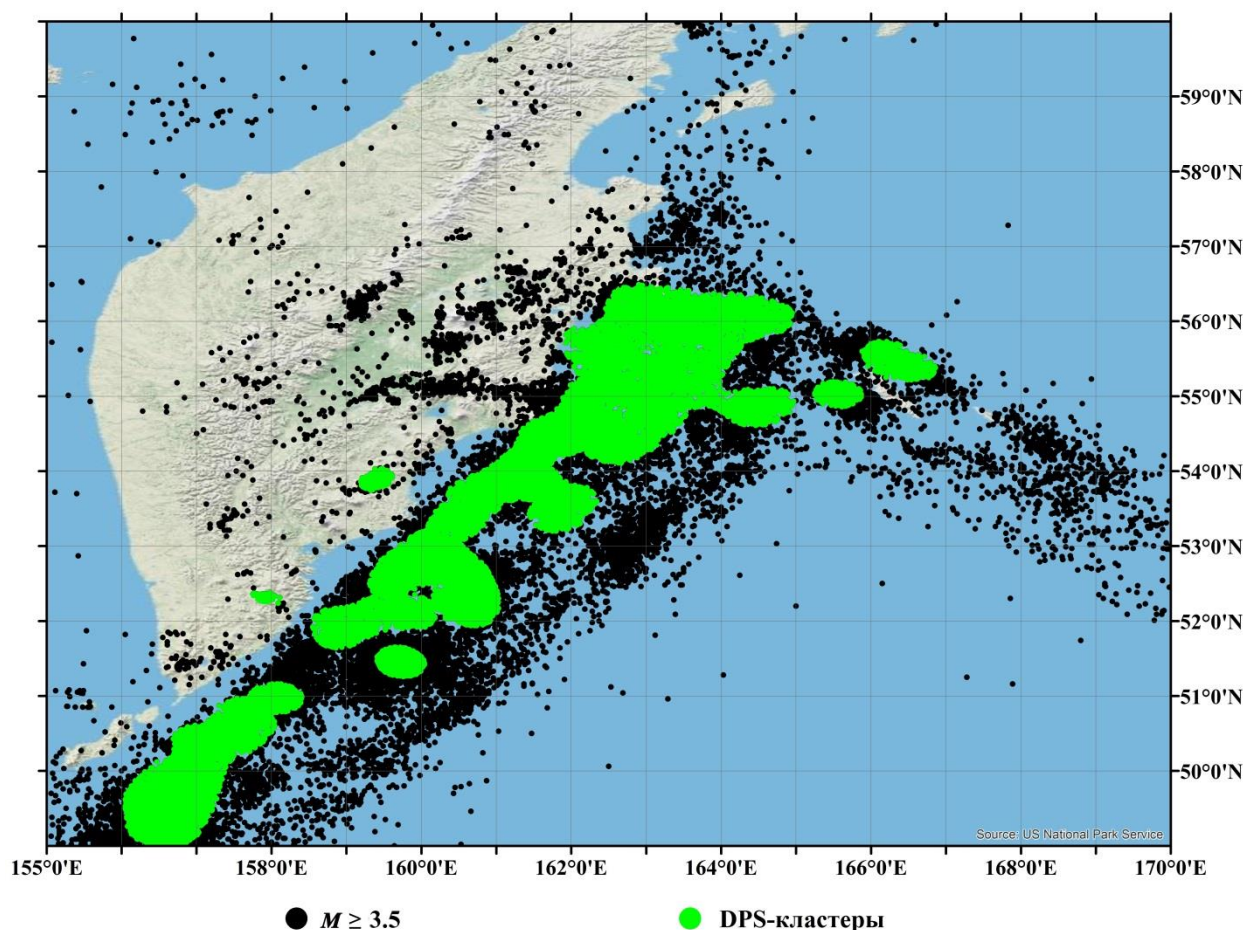


Рис. 4.5. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 3.5$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка

Как видно из рис. 4.6, распознанные зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2). Эпицентры практически всех землетрясений с $M \geq 7.75$ попадают во FCAZ-зоны или располагаются на их границах. Из 8 рассматриваемых нами сильнейших землетрясений эпицентр только одного (12.5%) не попал в распознанные FCAZ-зоны (рис. 4.6), создавая ошибку типа «пропуск цели». Это эпицентр Озерновского землетрясения с $M = 7.75$ в Корякии, произошедшего 22 ноября 1969 г. на севере рассматриваемого региона (№ 6 в табл. 4.2, рис. 4.4 и 4.6).

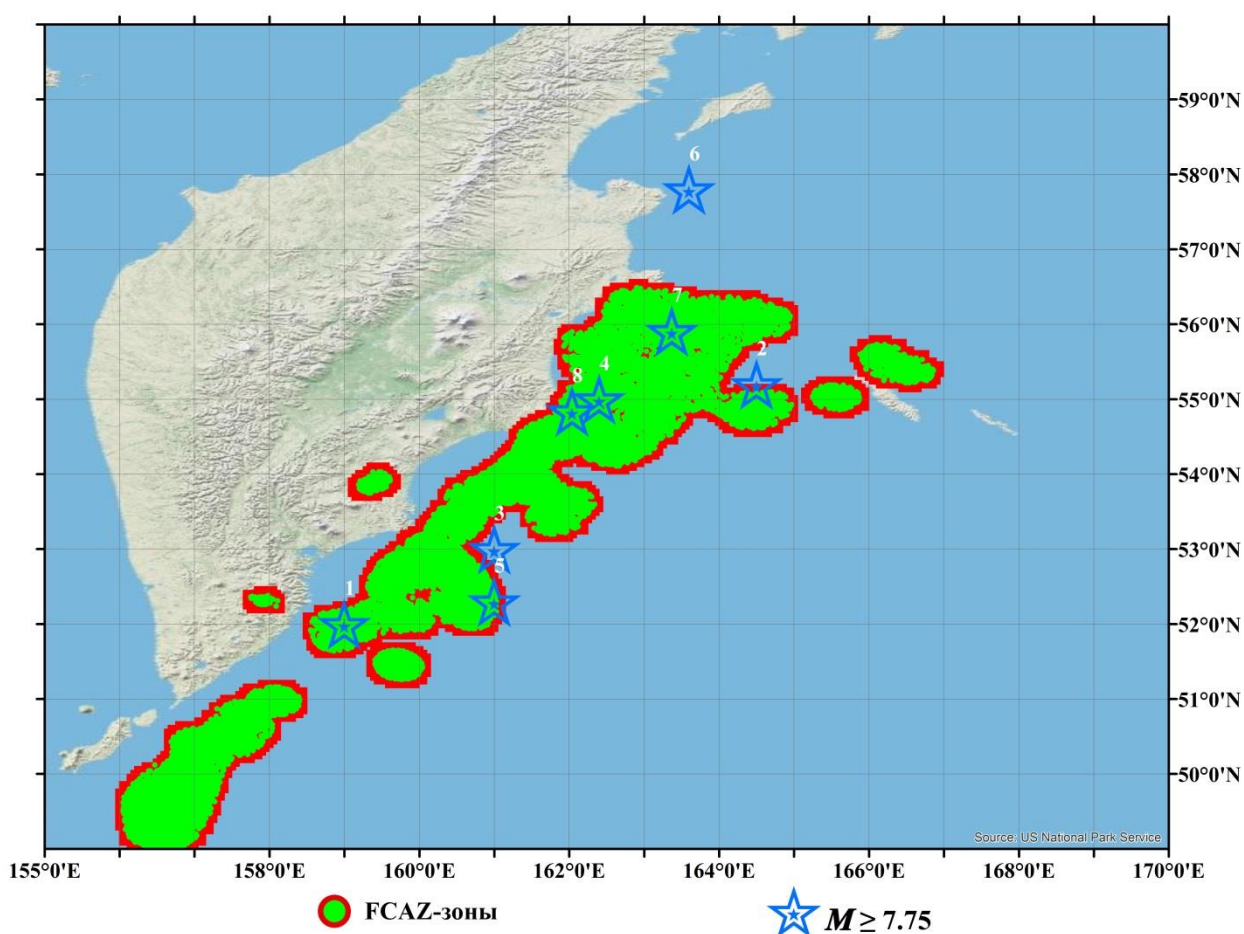


Рис. 4.6. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2)

В 2006 г. в Корякии севернее границы рассматриваемого в диссертационной работе региона 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 эпицентры этих землетрясений расположены вне современной зоны субдукции. Территория Корякии расположена на стыке Северо-Американской, Охотской и Беринговоморской плит. Сеймотектонические движения на границах этих плит характеризуются малыми скоростями по сравнению с движениями в Курило-Камчатской зоне субдукции [186]. Из рис. 4.4 видно, что эта территория характеризуется низким уровнем сейсмической активности. Условия возникновения этих сильнейших землетрясений, находящихся вне зоны субдукции, кардинально отличаются от остальных рассматриваемых землетрясений (табл. 4.2, рис. 4.4, 4.6) [126]. 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 [218].

Таким образом, эпицентр Озерновского землетрясения (№ 6 в табл. 4.2, рис. 4.6) достаточно уверенно можно не считать ошибкой «пропуск цели». Рассмотрение в настоящем исследовании этого события обусловлено его присутствием в каталоге работы [78] по распознаванию классическим методом ЕРА.

Распознанные FCAZ-зоны для землетрясений с $M \geq 7.75$ хорошо согласуются с результатами долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2013 – VIII 2018 гг. [218]. Авторы [218] с разной степенью вероятности ожидали землетрясения с $M = 5.7 - 7.2$ на всем Тихоокеанском побережье Камчатки. При этом в течение указанного временного отрезка сильнейшие землетрясения с $M \geq 7.7$ ожидалось в прибрежной зоне Авачинского залива и у берегов Южной Камчатки. В этих районах располагаются крупные FCAZ-зоны.

4.3. Тихоокеанское побережье Курильских островов

Решение задачи определения мест возможного возникновения сильнейших землетрясений для Тихоокеанского побережья Курильских островов с точки зрения применения методов и алгоритмов распознавания образов ранее не проводилось. В диссертационной работе проведено такое распознавание методом FCAZ.

4.3.1. Объекты распознавания

Для определения мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на Тихоокеанском побережье Курильских островов в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с глубиной гипоцентра не превосходящей 70 км, взятые из регионального каталога землетрясений Курило-Охотского региона Сахалинского филиала Геофизической службы Российской академии наук (СФ ГС РАН) за период 1962 – 2009 гг.

Для выбора глубины была построена гистограмма распределения событий по глубине, показавшая, что подавляющая часть землетрясений приходится на глубины до 70 км. Заметим, что для распознавания мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на побережье полуострова Камчатка так же использовались события с глубиной 0 – 70 км [126].

Оценка полноты магнитуды M_c используемого инструментального каталога показала, что начиная с $M = 4.2$ каталог является полным [302, 323]. В связи с этим, в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq M_R = 4.2$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 11 725 таких землетрясениях. Расположение их эпицентров, являющихся объектами распознавания, на карте рассматриваемого региона показано на рис. 4.7.

По результатам анализа графика повторяемости используемого инструментального каталога и по аналогии с распознаванием мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатке [126] в качестве сильнейших землетрясений для Тихоокеанского побережья Курильских островов рассматривались землетрясения с магнитудой $M \geq 7.75$. Каталог землетрясений Тихоокеанского побережья Курильских островов с $M \geq 7.75$ и глубинами до 70 км начиная с 1900 г. был сформирован на основе используемого инструментального каталога, каталога сильных землетрясений на территории СССР и каталога USGS [156, 183, 274] (табл. 4.3 и рис. 4.7).

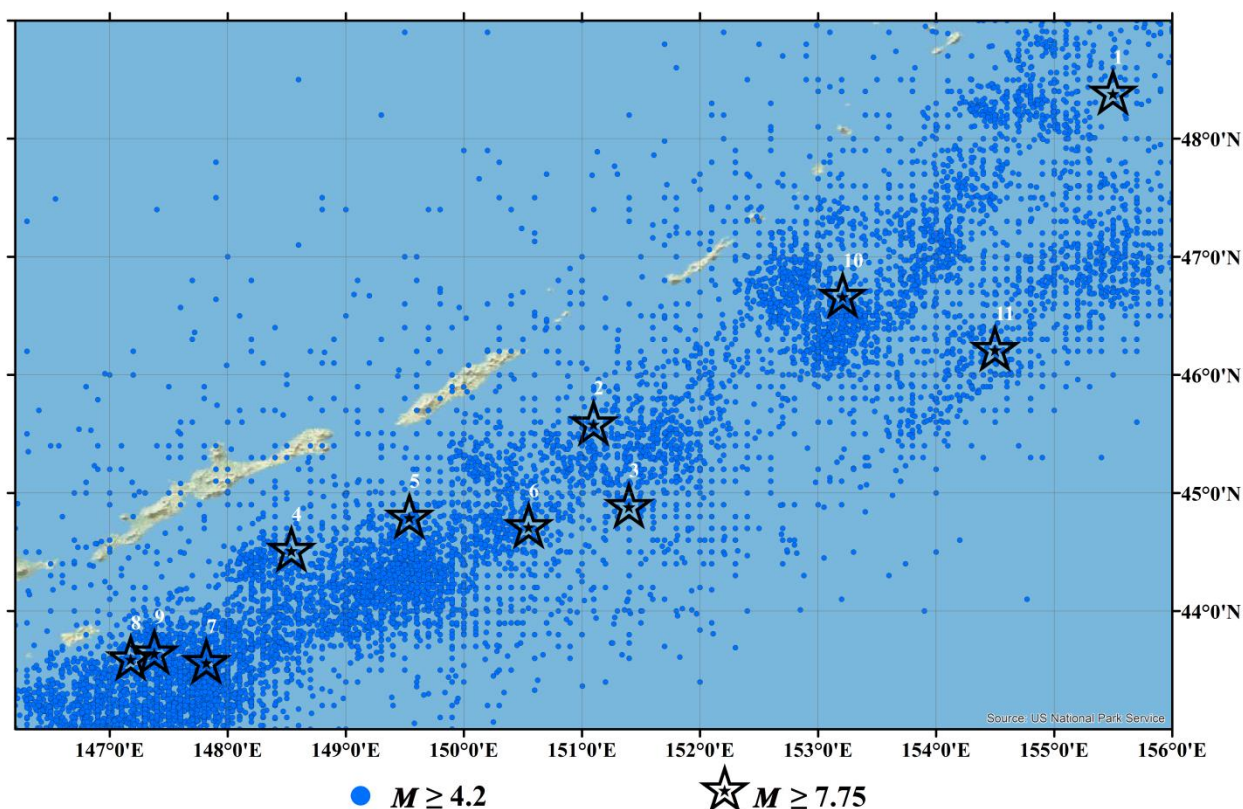


Рис. 4.7. Объекты распознавания системы FCAZ на Тихоокеанском побережье Курильских островов (эпицентры землетрясений с $M \geq 4.2$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.3)

Землетрясения Тихоокеанского побережья Курильских островов с $M \geq 7.75$

№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M
1.	01.05.1915	48.4	155.5	8.3
2.	07.09.1918	45.6	151.1	8.2
3.	08.11.1918	44.9	151.4	7.9
4.	06.11.1958	44.53	148.54	8.2
5.	13.10.1963	44.81	149.54	8.1
6.	20.10.1963	44.73	150.55	7.8
7.	11.08.1969	43.58	147.82	8.2
8.	11.08.1969	43.61	147.18	7.8
9.	04.10.1994	43.66	147.38	7.9
10.	15.11.2006	46.68	153.21	7.8
11.	13.01.2007	46.23	154.5	8.2

4.3.2. FCAZ-зоны

К множеству объектов распознавания (эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 4.2$) был применен алгоритм DPS. Было выполнено 3 итерации алгоритма. Оптимальные значения параметра β – уровня максимальности плотности DPS-кластеров – вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта [71]. В DPS-кластеры вошло 77.5% рассматриваемых объектов распознавания. DPS-кластеры показаны на рис. 4.8 зеленым цветом.

К распознанным DPS-кластерам эпицентров землетрясений (рис. 4.8) был применен алгоритм E²XТ. Оптимальные значения его входных параметров вычислялись с помощью автоматизированной процедуры [71]. Построенные таким образом двумерные высокосейсмичные FCAZ-зоны показаны на рис. 4.9 совокупностью зеленого и красного цветов. Внутри распознанных FCAZ-зон попадает 10 (90.9%) из 11 землетрясений региона с

$M \geq 7.75$. Один эпицентр находится на некотором отдалении от распознанных зон (табл. 4.3, рис. 4.9) и создает ошибку распознавания типа «пропуск цели».

Отметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 81% землетрясений с $M \geq 5.0$ из числа имеющихся в инструментальном каталоге, используемом для распознавания, и занимают не всю площадь Курило-Камчатской субдукционной зоны. Это дает возможность с большой степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Курильских островов.

FCAZ-зоны (рис. 4.9) хорошо согласуются с результатами долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2013 – VIII 2018 гг. [218].

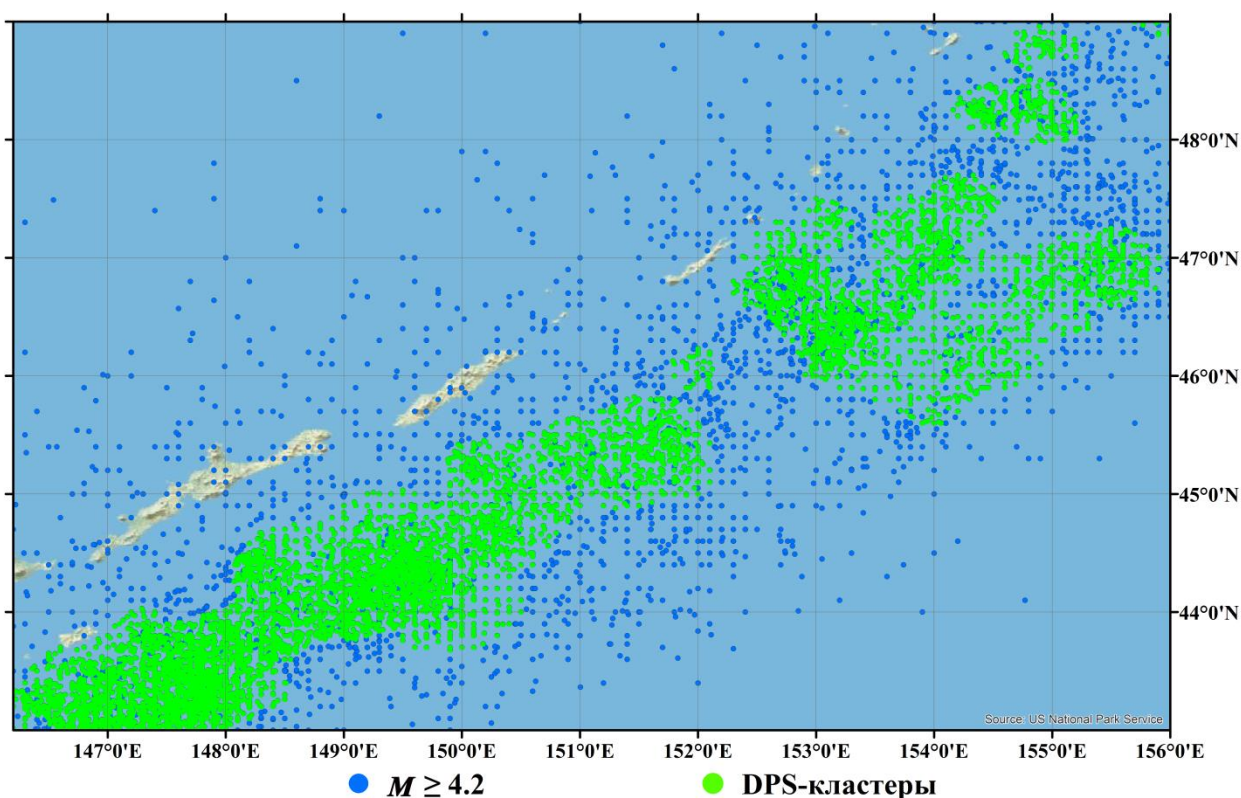


Рис. 4.8. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 4.2$ на Тихоокеанском побережье Курильских островов

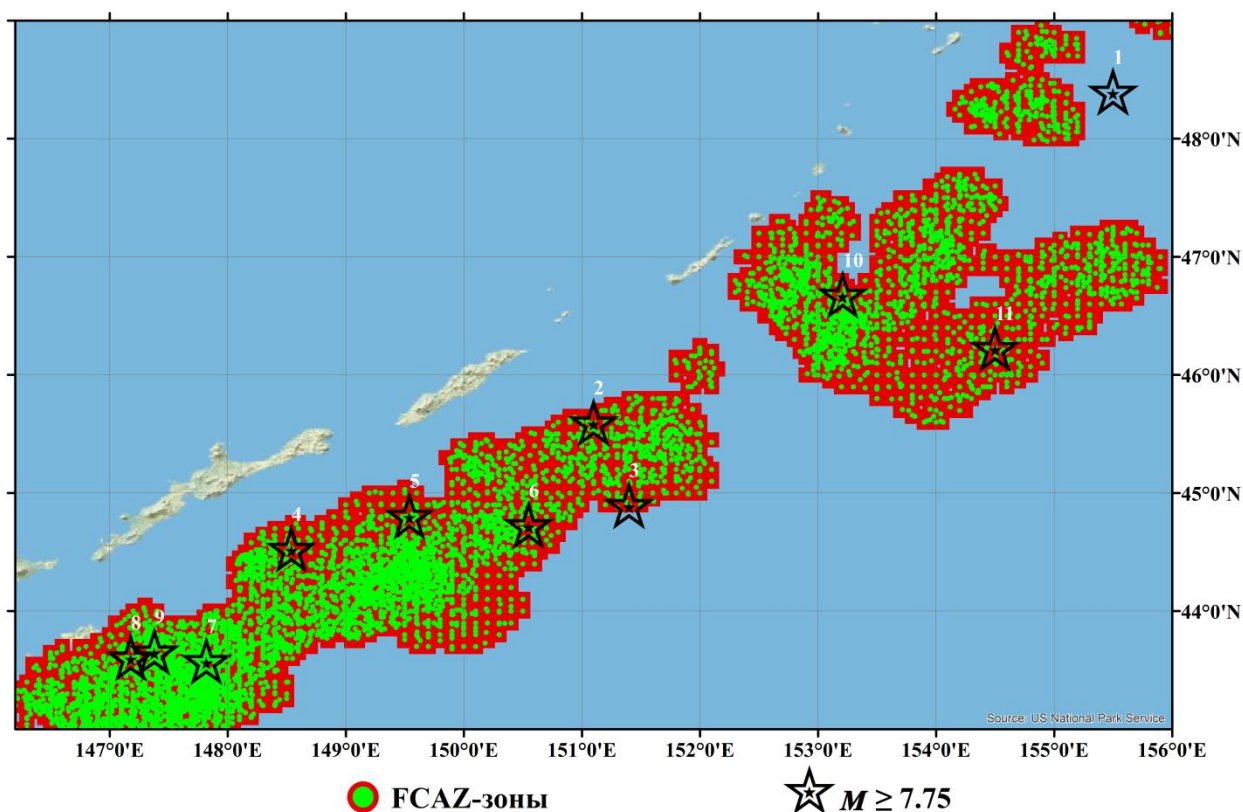


Рис. 4.9. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Курильских островов и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.3)

4.4. Обсуждение

Основным результатом настоящей Главы диссертации является то, что впервые распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений в регионах Тихоокеанского сейсмического кольца удалось успешно провести на базе объективной классификации без привлечения морфоструктурного районирования и необходимости формирования множества объектов обучения. Достаточно было использовать эпицентры землетрясений слабой магнитуды в качестве объектов распознавания. При этом, результаты, в целом, хорошо согласуются с полученными ранее независимо классическим методом ЕРА.

В диссертационной работе распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на Камчатке и Курильских

островах, составляющих единую Курило-Камчатскую субдукционную зону, на базе алгоритмической системы FCAZ проведено по отдельности. Это связано с тем, что сейсмический мониторинг и формирование каталогов землетрясений для этих регионов осуществляется на базе разных сейсмологических сетей. Как следствие каталоги для этих регионов сильно отличаются по качеству. На рис. 4.10 показан интегральный результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в Курило-Камчатском регионе.

Распознанные в Курило-Камчатском регионе высокосейсмичные FCAZ-зоны могут быть в будущем использованы для определения территории, для которой будут проводиться работы по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений методом академика С.А. Федотова [218].

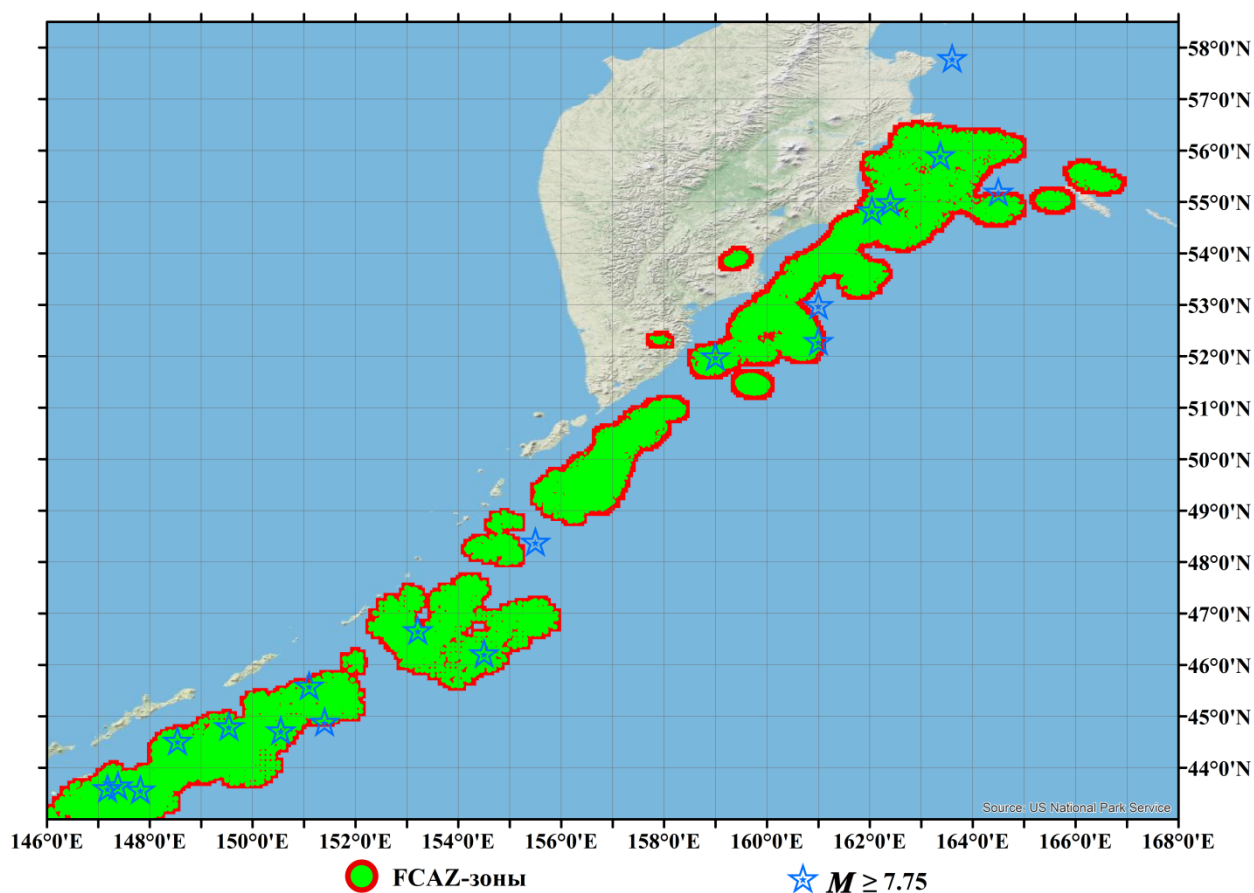


Рис. 4.10. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в Курило-Камчатском регионе и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2 и 4.3)

4.5. Выводы

- Выполнено FCAZ-распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд Южной Америки и на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и Курильских островов. Тем самым показано, что метод FCAZ применим для изучения регионов с очень высоким уровнем сейсмичности.
- Произошедшие в 2014, 2015 и 2016 годах в горном поясе Анд Южной Америки землетрясения с $M \geq 7.75$ впервые дали материал чистого экзамена для FCAZ-распознавания. Результат экзамена оказался успешным. Тем самым получено существенное обоснование достоверности FCAZ-распознавания.
- Создана база данных цифровых карт зон возможного возникновения сильнейших землетрясений в исследованных регионах.

ГЛАВА 5. FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ И ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ОДНОЙ И НЕСКОЛЬКИХ ПОРОГОВЫХ МАГНИТУД

В настоящей Главе описаны результаты FCAZ-распознавания мест возможного возникновения сильных ($M \geq 6.0$) и значительных ($M \geq 4.5$) землетрясений в Калифорнии и некоторых регионах России. Как и в Главе 4 абстрагируемся от геолого-геофизических и геоморфологических параметров и имеем дело только с информацией об эпицентрах землетрясений.

5.1. Калифорния. $M \geq 6.5$

Ранее в работах [55, 263] распознавание мест возможного возникновения сильных (с магнитудой $M \geq 6.0$) землетрясений в Калифорнии было проведено только с помощью алгоритма DPS (см. пункт 3.3.1). В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из двух каталогов: каталога Центра данных о землетрясениях Северной Калифорнии (NCEDC) и каталога Центра данных по землетрясениям в Южной Калифорнии (SCEDC).

Позднее, создание алгоритма E²XТ (см. пункт 3.3.2) позволило говорить о разработке алгоритмической системы FCAZ (см. пункт 3.3) [70, 72], позволяющей проводить распознавание высокосейсмичных территорий методом, отличным от классического подхода ERA [62]. Описание системы FCAZ приведено в работе [72] и пункте 3.3 настоящей диссертационной работы. В [123, 124] система FCAZ использовалась для распознавания в Калифорнии мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из каталога ANSS [273].

В 2016 г. система FCAZ была модифицирована путем создания блоков искусственного интеллекта в структуре алгоритмов DPS и E²XТ (п. 3.3). Целью нового распознавания в Калифорнии является установление мест возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 6.5$ с помощью модифицированной версии системы FCAZ.

5.1.1. Объекты распознавания

В работе использовался ANSS каталог землетрясений в Калифорнии в пределах $31.0^\circ - 42.0^\circ$ с.ш., $114.0^\circ - 126.0^\circ$ з.д. за период 1960 – 2012 гг. [273].

Для того, чтобы выбрать нижний порог магнитуды землетрясений, начиная с которого эпицентры будут использоваться в качестве объектов распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) рассматриваемого каталога [273].

Для оценки значения M_c используемого каталога [273] Калифорнии был использован программный продукт ZMAP [323]. Вначале каталог был декластеризован по методике Резенберга [302]. После чего для оценки значения M_c был использован алгоритм MBS с критерием из [311]. Оказалось, что $M_c = 2.9$. Из работы [287] известно, что в большинстве случаев метод MBS дает верхнюю границу для M_c . Но учитывая результаты работы [271] полученное значение M_c считается удовлетворительным. Таким образом, было принято решение в Калифорнии использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 31 874 таких землетрясениях. Расположение их эпицентров, являющихся объектами FCAZ-распознавания, на карте рассматриваемого региона показано на рис. 5.1.

Каталог сильных коровых землетрясений в Калифорнии с $M \geq 6.5$ был сформирован на основе каталога землетрясений, используемого для обучения

алгоритма «Подклассы» при распознавании в Калифорнии методом ЕРА [98], и рассматриваемого каталога ANSS [273] (табл. 5.1) [55, 98, 123, 128, 263].

Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии, выполненное методом ЕРА, было опубликовано в 1976 г. [98]. С момента публикации в Калифорнии произошел целый ряд новых сильных землетрясений. Их эпицентры хорошо согласуются с результатами распознавания в работе [98].

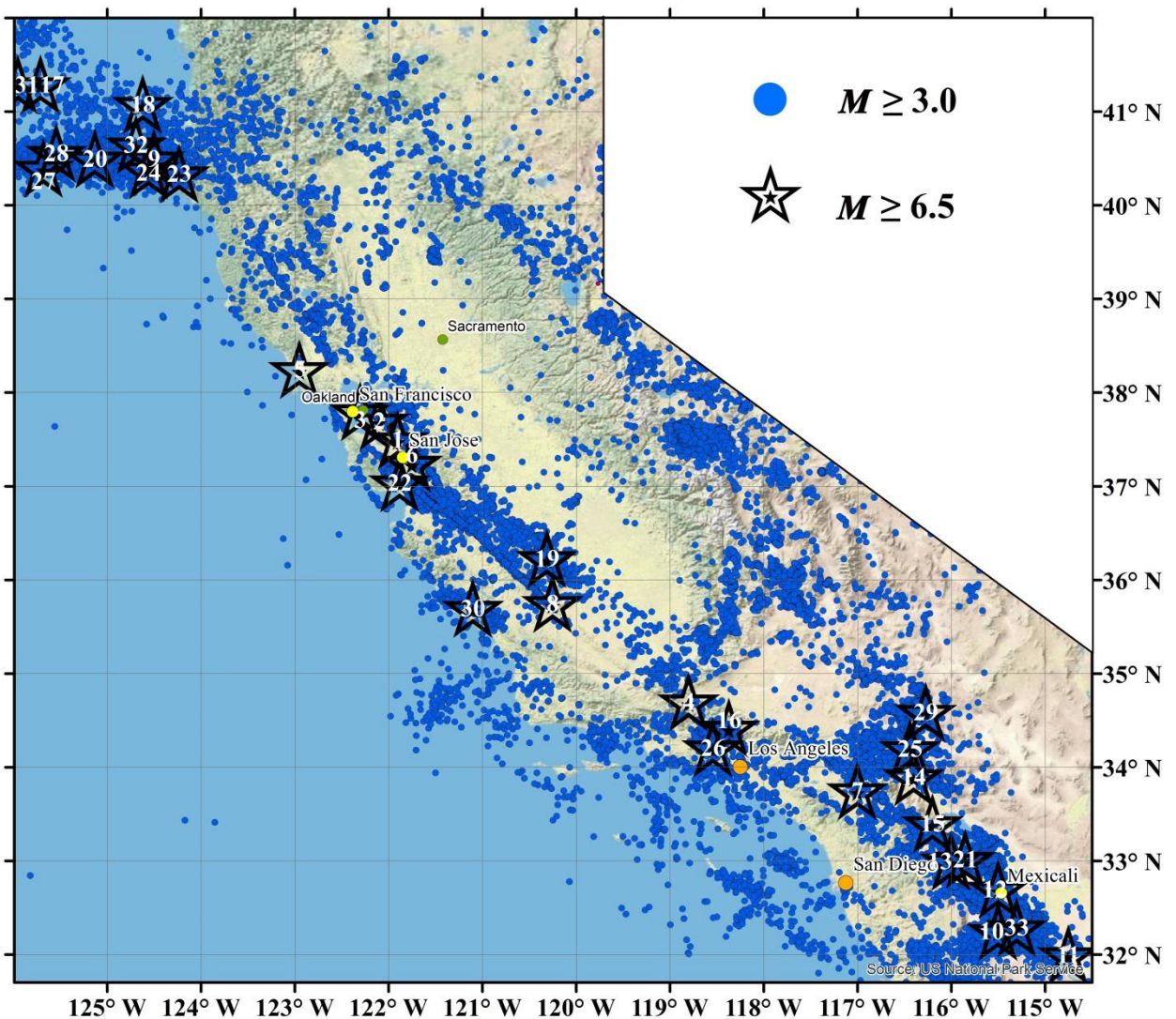


Рис. 5.1. Объекты распознавания системы FCAZ в Калифорнии (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$ (табл. 5.1)

Сформированный каталог (табл. 5.1) содержит 33 сильных

землетрясения в Калифорнии. Первое из них произошло в 1836 г., а последнее 4 апреля 2010 г. Тем самым, каталог содержит все сильные землетрясения за 177 лет на рассматриваемой территории [55, 128, 263]. Расположение эпицентров землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии показано на рис. 5.1.

Таблица 5.1

Каталог сильных землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии [98, 273]

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M	№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	1836	37.50	-121.90	>7	18.	08.11.1980	41.08	-124.62	7.2
2.	1836	37.70	-122.10	>7	19.	02.05.1983	36.23	-120.31	6.7
3.	1836	37.80	-122.30	>7	20.	10.09.1984	40.50	-125.13	6.6
4.	1857	34.70	-118.80	>7	21.	24.11.1987	33.02	-115.85	6.6
5.	18.04.1906	38.25	-122.95	8.25	22.	18.10.1989	37.04	-121.88	7.0
6.	01.07.1911	37.25	-121.75	6.6	23.	25.04.1992	40.34	-124.23	6.7
7.	21.04.1918	33.75	-117.00	6.8	24.	26.04.1992	40.38	-124.56	6.6
8.	10.03.1922	35.75	-120.25	6.5	25.	28.06.1992	34.20	-116.44	7.3
9.	22.01.1923	40.50	-124.50	7.2	26.	17.01.1994	34.21	-118.54	6.7
10.	30.12.1934	32.25	-115.50	6.5	27.	01.09.1994	40.40	-125.68	7.0
11.	31.12.1934	32.00	-114.75	7.0	28.	19.02.1995	40.56	-125.54	6.8
12.	19.05.1940	32.70	-115.50	6.7	29.	16.10.1999	34.59	-116.27	7.1
13.	21.10.1942	33.00	-116.00	6.5	30.	22.12.2003	35.70	-121.10	6.5
14.	04.12.1948	33.90	-116.40	6.5	31.	15.06.2005	41.29	-125.95	7.2
15.	09.04.1968	33.40	-116.20	6.9	32.	10.01.2010	40.65	-124.69	6.5
16.	09.02.1971	34.42	-118.37	6.6	33.	04.04.2010	32.29	-115.30	7.2
17.	26.11.1976	41.29	-125.71	6.8					

5.1.2. FCAZ-зоны

К множеству объектов распознавания был применен алгоритм DPS. Было выполнено 3 итерации алгоритма. DPS-кластеризация эпицентров землетрясений осуществлялась с использованием разработанного критерия выбора уровня максимальной плотности (см. п. 3.3.3). В DPS-кластеры вошло 75% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$). На рис. 5.2 зеленым цветом показаны распознанные DPS-кластеры. Вычисленные оптимальные значения параметра β на итерациях имели следующие значения: $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = -0.1$, $\beta_3 = -0.1$. Радиус локализации алгоритма на итерациях равнялся: $r_1 = 11.69$ км, $r_2 = 21.35$ км, $r_3 = 25.72$ км ($q_1 = q_2 = q_3 = -2.0$).

К DPS-кластерам был применен алгоритм E²ХТ. Оптимальные значения входных параметров алгоритма подбирались автоматически с помощью блока искусственного интеллекта [71]. Картированные таким образом FCAZ-зоны показаны на рис. 5.3 совокупностью зеленого и красного цветов. Внутри FCAZ-зон попадает 28 из 33 (85%) рассматриваемых сильных землетрясений с $M \geq 6.5$ (табл. 5.1, рис. 5.3). Отметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 83% землетрясений с $M \geq 4.5$ из числа имеющихся в рассматриваемом инструментальном каталоге. При этом распознанные зоны занимают незначительную площадь сейсмоопасной части Калифорнии. Все это дает возможность с большой степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны (рис. 5.3) как зоны возможного возникновения сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$ в Калифорнии.

Из 33 рассматриваемых сильных землетрясений эпицентры только 5 (15%) не попали в распознанные FCAZ-зоны. При этом надо заметить, что три эпицентра (№ 17, 18 и 31 в табл. 5.1), расположенные на северо-западе региона (рис. 5.3), находятся в акватории Тихого Океана на достаточно большом (особенно, № 17 и 31) расстоянии от берега. Так же во FCAZ-зоны не попали два эпицентра исторических землетрясений. Это землетрясение у

Форт-Техона, произошедшее в 1857 г. (№ 4 в табл. 5.1) с $M > 7.0$, и землетрясение в Сан-Франциско 18 апреля 1906 г. (№ 5 в табл. 5.1) с $M = 8.25$. Эти землетрясения произошли задолго до начала систематизированных инструментальных наблюдений за сейсмичностью Калифорнии. Поэтому не имеется достаточного числа объектов (эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$) для их распознавания. Таким образом, если исключить из рассмотрения перечисленные землетрясения, то придем к тому, что, по сути, в выполненном для Калифорнии распознавании мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ отсутствуют ошибки типа «пропуск цели» [55, 128, 263].

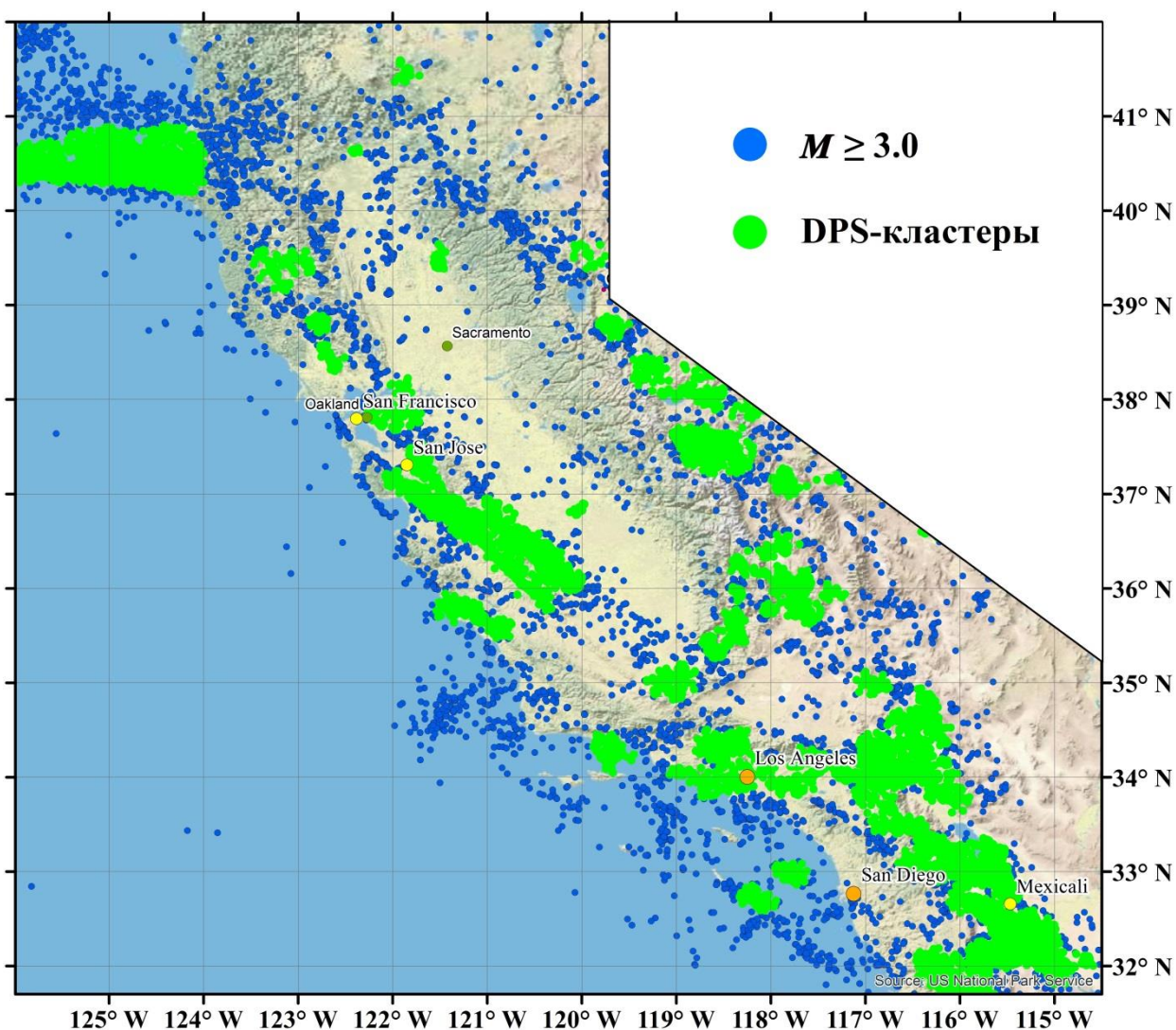


Рис. 5.2. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$ в Калифорнии

После 2012 г. в Калифорнии произошло два землетрясения с $M \geq 6.5$. Это землетрясение 10 марта 2014 г. с $M = 6.8$. Его эпицентр показан на рис. 5.3 синей звездой и расположен на северо-западе региона в акватории Тихого океана внутри FCAZ-зоны. Второе землетрясение произошло 6 июля 2019 г. и имело магнитуду $M = 7.1$. Эпицентр этого землетрясения также расположен внутри FCAZ-зон и показан белой звездой на рис. 5.3. Тем самым результат чистого экзамена следует признать успешным.

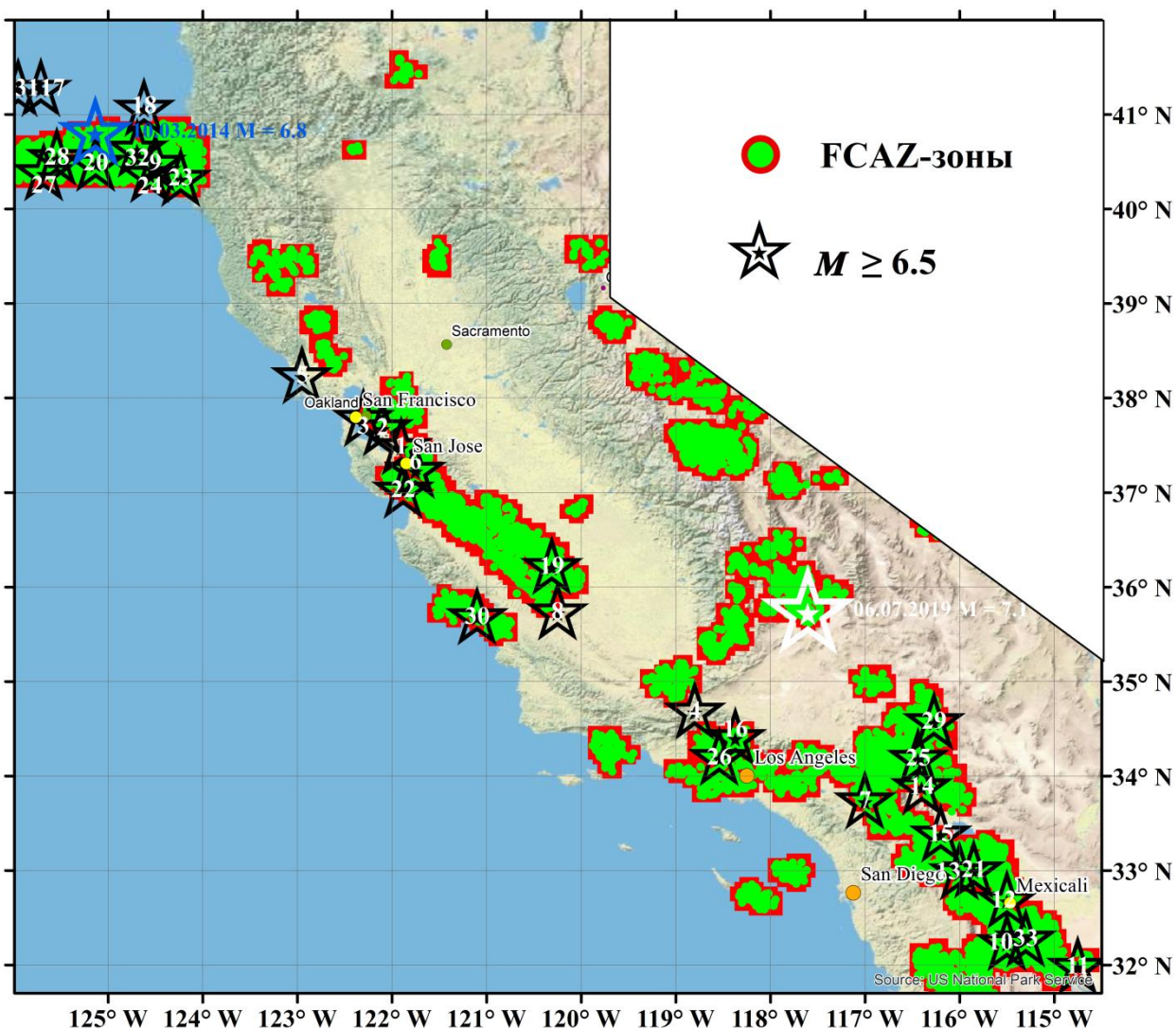


Рис. 5.3. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$ (табл. 5.1)

5.2. Алтай-Саяны. $M \geq 5.5$

Рассматриваемая территория лежит в пределах $45.5^{\circ} - 53.0^{\circ}$ с.ш., $84.0^{\circ} - 101.0^{\circ}$ в.д. и является частью сейсмически активного региона Северной Евразии «Алтай и Саяны» [13, 147, 148, 215]. По сути задачи, из рассмотрения были исключены части региона со слабой сейсмичностью и, в силу недостатка данных, территории, относящиеся к другим государствам: Казахстану, Китаю и Монголии.

Алтае-Саянская складчатая область (горная страна) находится в центре Азии, занимая среднюю часть Урало-Монгольского пояса гор, протянувшегося от Урала до берегов Тихого океана. Эти горы относятся к новейшему орогеническому поясу Внутренней Азии, расположенному между Сибирской и Индостанской платформами [117]. Изучаемая территория представляет собой крупную блоковую морфоструктуру со сложным горно-котловинным рельефом. Ее границы определены разломами и смещениями блоковых структур в результате многократных тектонических движений.

В Алтае-Саянской области сложно сочетаются разновозрастные складчатые сооружения – добайкальские срединные массивы, салаирские (на северо-востоке), каледонские (в средней части), ранне- и позднегерцинские (на западе и юго-западе) складчатые системы самых различных простираний, а также наложенные сингерцинские впадины и прогибы [174]. В течение мезозоя и палеогена эти горы под воздействием экзогенных сил постепенно разрушались и превратились в денудационные равнины. Возникли поверхности выравнивания (пенеплены) с корой выветривания [117]. Современный горный рельеф Алтае-Саянская область приобрела в позднем кайнозое в результате тектонической активизации [31, 174]. Основная стадия неотектонической активизации охватывает вторую половину плиоцена – плейстоцен [118, 150, 189]. Особенностью этой стадии является усиление вертикальных движений в областях поднятий и прогибаний, дальнейшая дифференциация структур, особенно в приразломных зонах сопряжения

хребтов и впадин, энергичное эрозионное расчленение поднятий и снос обломочного материала во впадины. Амплитуды неотектонических движений составляли в среднем 2 000 – 3 000 м. Древние складчатые горы в результате этих новейших поднятий превратились в высокоподнятые ступенчатые плоскогорья с плоскими вершинами и крутыми склонами [117].

В наше время Алтайские горы представляют сложную систему самых высоких в Сибири хребтов, разделённых глубокими долинами рек и обширными внутригорными и межгорными котловинами. Наибольших высот Алтай достигает в южной части, где находятся высшие точки – гора Белуха 4 506 м и г. Табын-Богдо-Ула 4 358 м. Это высокие, типично альпийские горы с острыми вершинами и ледниками. В остальных частях Алтая горы гораздо ниже – высоты около двух километров. Хребты Западного и Восточного Саяна достигают высот 3 000 – 3 500 м, постепенно снижаясь к северу и на юг.

Западный Саян представляет собой горную систему протяжённостью 650 км, состоящую из вытянутых в северо-восточном направлении хребтов, разделённых речными долинами, и ограниченную со всех сторон разломами. На юге система относительно плавно переходит в Тувинскую котловину, а с запада – ограничивается Шапшальским хребтом Восточного Алтая и Абаканским хребтом Кузнецкого Алатау. Тянется в широтном направлении от верховьев реки Абакан до хребтов Восточного Саяна.

Восточный Саян – горная система протяжённостью свыше 1 000 км от левобережья р. Енисей в юго-восточном направлении почти до южной оконечности озера Байкал. Восточный Саян имеет складчатую структуру северо-западного и субширотного направления. Основные направления главных хребтов совпадают с простираем тектонических структур и разломов.

Тувинская котловина – межгорное понижение рельефа в верховьях Енисея, ограниченное хребтами Западного Саяна, Восточного Саяна, Алтая и Танну-Ола, протяженностью около 400 км и шириной от 25 до 60 – 70 км.

Высота котловины колеблется от 600 до 900 м. Восточно-Тувинское нагорье состоит из нескольких горных хребтов разделенных многочисленными впадинами. Средняя высота нагорья 1 500 – 1 600 м.

В масштабе региона сложное сочетание разломной тектоники разных этапов развития Алтае-Саянской горной страны, их активизация в разное время определяют направление и масштабы вертикальных и горизонтальных движений и весьма значительно современную сейсмичность рассматриваемого региона [117].

Алтае-Саянская горная страна неоднородна по степени сейсмической активности, хотя землетрясения здесь возникают повсеместно. В качестве основных эпицентральных зон выделяют Восточно-Тувинские нагорья, район сопряжения Алтая с Западным Саяном и Западным Танну-Ола, Монгольский Алтай, северные районы Монголии и Восточный Казахстан. В каждом из этих районов наряду с большим числом относительно слабых толчков зарегистрированы также сильные землетрясения с $M \geq 6.0$ ($K \geq 16$) [132]. В этих районах в последнее время произошли сильные землетрясения: Чуйское 2003 г. ($M_s = 7.3$) в Горном Алтае и Тувинские 2011 – 2012 гг. ($M_s = 6.7$ и 6.8) в зоне Каахемского глубинного разлома.

У исследователей нет единого мнения относительно приуроченности очагов землетрясений к каким-либо конкретным геологическим структурам. Многие ученые связывают пространственное распределение землетрясений с глубинными разломами. По мнению Лукиной Н.В. [169] большинство эпицентров крупных землетрясений Алтая ($K \geq 13$) приурочены к зонам активных разломов и к узлам пересечения молодых активных разломов разных направлений.

В работе [131] показано, что наиболее сейсмоактивные зоны Алтае-Саянской области связаны с системой впадин. Эпицентры сильных событий концентрируются вокруг крупных впадин (Тувинской котловины, котловины Убсу-Нур и котловины Больших озер) и приурочены к их горному

обрамлению. Большая часть землетрясений приурочена к коре областей поднятий и хребтов [192].

Изучение механизмов очагов крупных землетрясений и расчет сейсмостектонической деформации земной коры показали, что земная кора разбита на множество по-разному деформированных блоков, кора находится в состоянии горизонтального сжатия, оси которого в западной зоне (Монгольский Алтай, Горный и Рудный Алтай, оз. Зайсан с горным обрамлением) имеют ССЗ направление, а в восточной зоне (Западный и Восточный Саян, Тува, северная часть Монголии) – ССВ направление [132], что нашло подтверждение в работах [130, 192, 200].

В работах [195, 200] даны детальные характеристики основных сейсмоактивных зон региона. Сейсмостектонические и палеосейсмогеологические исследования в местах исторических (Фуяньское 1931 г, Зайсанское 1990 г.) и современных (Чуйское, 2003 г., Тувинские, 2011 – 2012 гг.) землетрясений Алтае-Саянской области позволили найти свидетельства древней сейсмической активности большой интенсивности – были выявлены очаги древних высокомагнитудных землетрясений, определено время возникновения крупных доисторических сейсмических событий и оценен период их повторяемости [5, 184, 195, 198, 199, 200, 235, 244, 292]. Эти результаты свидетельствуют о высоком сейсмическом потенциале Алтае-Саянской области.

5.2.1. Объекты распознавания

Объекты распознавания в регионе Алтай-Саяны формировались на основе каталога землетрясений за период 1962 – 2009 г., полученного путем объединения каталогов «Землетрясения в СССР» (1962 – 1991 гг.) [147] и «Землетрясения Северной Евразии» (1992 – 2009 гг.) [148]. Сформированный каталог содержит данные о 15 639 сейсмических событиях за рассматриваемый период. Наиболее сильным землетрясением в Алтае-

Саянском регионе является Болнайское землетрясение 1905 г., произошедшее на северо-западе Монголии и имевшее магнитуду $M = 8.2$.

Магнитудные пороги M_R , начиная с которого эпицентры землетрясений будут использоваться как объекты распознавания, и M_0 , начиная с которого места возможного возникновения землетрясений распознаются, выбирались на основе теоретического и практического анализов графиков повторяемости для рассматриваемого региона.

Для выбора порога M_R была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude). Вначале каталог был декластеризован по методике Резенберга [302]. Затем применение программы ZMAP [323] показало, что для рассматриваемого каталога $M_c = 2.8$. Тем самым определяем объекты распознавания как события с $M \geq 2.8$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 3 647 таких землетрясениях. Ниже они используются как объекты распознавания. Расположение их эпицентров на карте рассматриваемого региона показано на рис. 5.4.

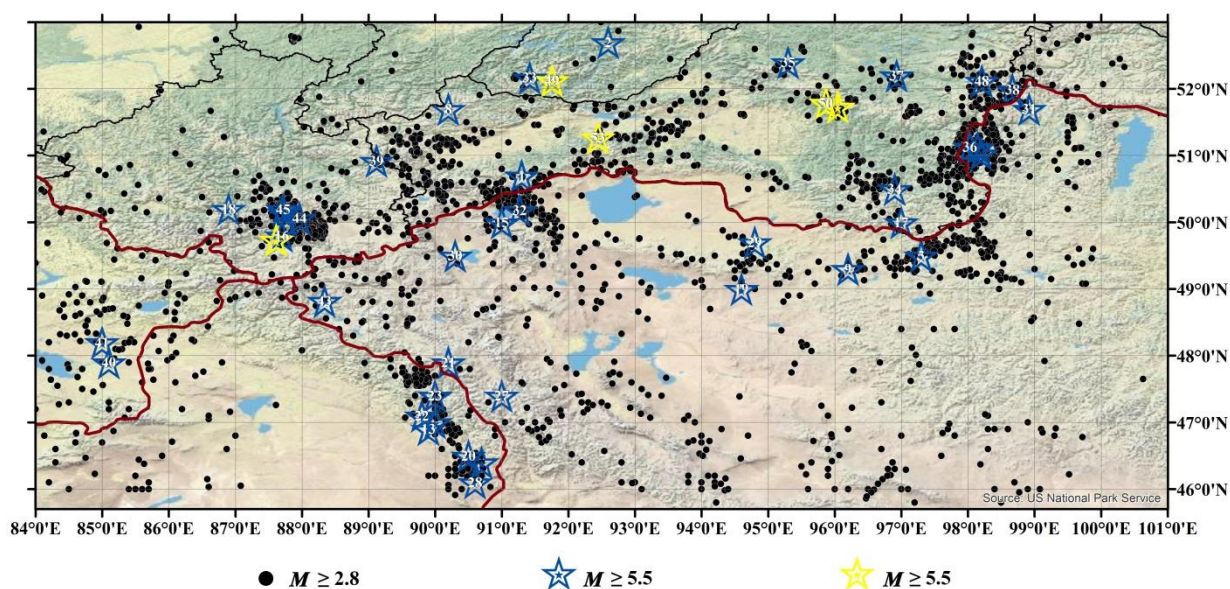


Рис. 5.4. Объекты распознавания системы FCAZ в регионе Алтай-Саяны (эпицентры землетрясений с $M \geq 2.8$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ (синим – до 2009 г. включительно, желтым – после 2009 г.) (табл. 5.2)

Порог магнитуды M_0 должен быть таким, чтобы землетрясения с $M \geq M_0$ не являлись очевидно возможными на всей рассматриваемой территории. Исходя из этого и анализа кумулятивного и дискретного частотно-магнитудных распределений землетрясений в регионе Алтай-Саяны был взят порог $M_0 = 5.5$. Землетрясения с $M \geq 5.5$ будем называть значительными. Каталог землетрясений с $M \geq 5.5$ (табл. 5.2) рассматриваемого региона за период 1900 – 2013 гг. был сформирован на основе каталога сильных землетрясений на территории СССР [183], каталогов [147, 148] и Оперативного каталога ГС РАН (рис. 5.4).

Таблица 5.2

Каталог землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны [147, 148, 183]

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M	№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	28.12.1902	50.7	91.3	6.6	28.	13.02.1933	46.1	90.6	6.2
2.	15.03.1905	52.7	92.6	6.1	29.	30.01.1935	49.7	94.8	5.8
3.	09.07.1905	49.5	97.3	7.6	30.	19.10.1938	49.5	90.3	6.6
4.	09.07.1905	49.5	97.3	6.7	31.	10.05.1966	51.7	98.92	5.8
5.	09.07.1905	49.5	97.3	6.8	32.	15.05.1970	50.18	91.27	7.0
6.	11.07.1905	49.5	97.3	7.0	33.	24.08.1971	52.17	91.42	5.6
7.	14.07.1905	49.5	97.3	6.5	34.	26.02.1972	50.5	96.9	5.7
8.	16.07.1905	51.7	90.2	6.0	35.	31.08.1972	52.4	95.3	5.5
9.	23.07.1905	49.3	96.2	8.2	36.	01.04.1976	51.13	98.03	5.5
10.	23.07.1905	49.3	96.2	6.4	37.	03.08.1978	52.2	96.93	5.8
11.	23.07.1905	49.3	96.2	6.0	38.	29.11.1974	51.99	98.67	5.5
12.	01.09.1905	49.3	96.2	6.1	39.	04.11.1986	50.92	89.12	5.6
13.	31.07.1917	46.9	89.9	5.5	40.	14.06.1990	47.9	85.1	6.9
14.	28.11.1917	46.9	89.9	6.1	41.	03.08.1990	48.2	85.0	5.9
15.	25.08.1922	50.0	91.0	6.5	42.	27.12.1991	51.12	98.15	6.7
16.	21.09.1923	49.8	87.7	6.0	43.	12.03.1996	48.82	88.34	5.7
17.	24.03.1926	50.0	97.0	5.9	44.	27.09.2003	50.06	87.97	7.2
18.	21.04.1927	50.2	86.9	6.0	45.	27.09.2003	50.2	87.72	7.0
19.	23.05.1927	49.0	94.6	5.6	46.	01.10.2003	50.15	87.73	6.9
20.	10.08.1931	46.5	90.5	7.8	47.	27.04.2005	51.03	98.2	5.5
21.	11.08.1931	47.9	90.2	5.6	48.	16.08.2008	52.12	98.21	6.1
22.	16.08.1931	47.1	89.8	5.6	49.	10.02.2011	52.13	91.76	5.5
23.	18.08.1931	47.4	90.0	6.7	50.	27.12.2011	51.79	95.87	6.3
24.	26.08.1931	47.9	90.2	5.7	51.	26.02.2012	51.73	96.05	6.6
25.	05.11.1931	47.0	90.0	6.3	52.	24.01.2013	49.74	87.61	5.5
26.	17.01.1933	46.4	90.7	5.6	53.	30.04.2013	51.27	92.45	5.5
27.	21.01.1933	47.4	91.0	5.8					

5.2.2. FCAZ-зоны

Было выполнено 4 итерации алгоритма DPS. Вычисленные оптимальные значения параметра β на итерациях равнялись: $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 0.1$, $\beta_3 = 0.0$, $\beta_4 = 0.0$. Параметр q имел следующие значения: $q_1 = -2.0$, $q_2 = -2.5$, $q_3 = -2.25$, $q_4 = -2.25$ (соответствующие значения радиуса локализации: $r_1 = 27.5$ км, $r_2 = 36$ км, $r_3 = 74$ км, $r_4 = 88$ км). DPS-кластеры содержат 72% объектов распознавания. На рис. 5.5 зеленым цветом показаны распознанные DPS-кластеры, черным цветом – эпицентры землетрясений с $M \geq 2.8$ не вошедшие в DPS-кластеры.

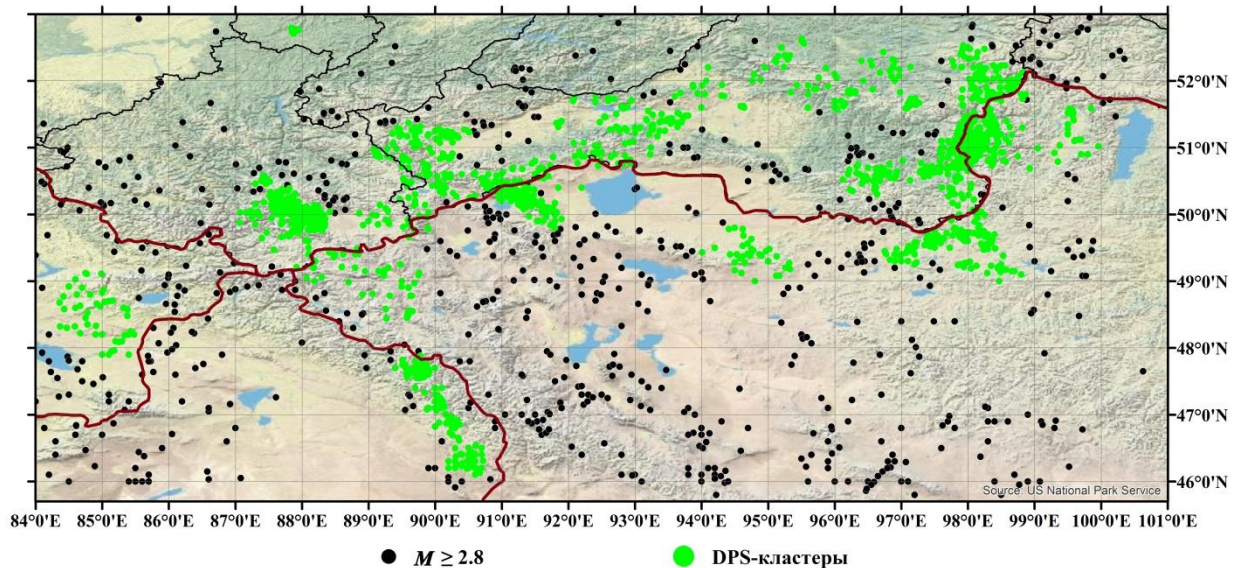


Рис. 5.5. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 2.8$ в регионе Алтай-Саяны

К распознанным DPS-кластерам эпицентров землетрясений (рис. 5.5) был применен алгоритм E^2XT [71, 72]. Оптимальные значения его входных параметров вычислены с помощью блока искусственного интеллекта: $\omega = -4$ и $\nu = -2.25$. Этот блок реализует поиск оптимального сочетания окончательной связности пиксельной оболочки и сканируемости первоначального результата алгоритма DPS [71]. Использовался шаг географической сетки на карте региона 0.05° .

На рис. 5.6 совокупностью зеленого и красного цветов показаны распознанные двумерные FCAZ-зоны. Внутрь зон попадает 45 из 53 (85%) рассматриваемых землетрясений с $M \geq 5.5$ (табл. 5.2). При этом FCAZ-зоны содержат в себе 67% землетрясений с $M \geq 4.0$ из числа имеющихся в используемом инструментальном каталоге. Это позволяет интерпретировать FCAZ-зоны как места возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны.

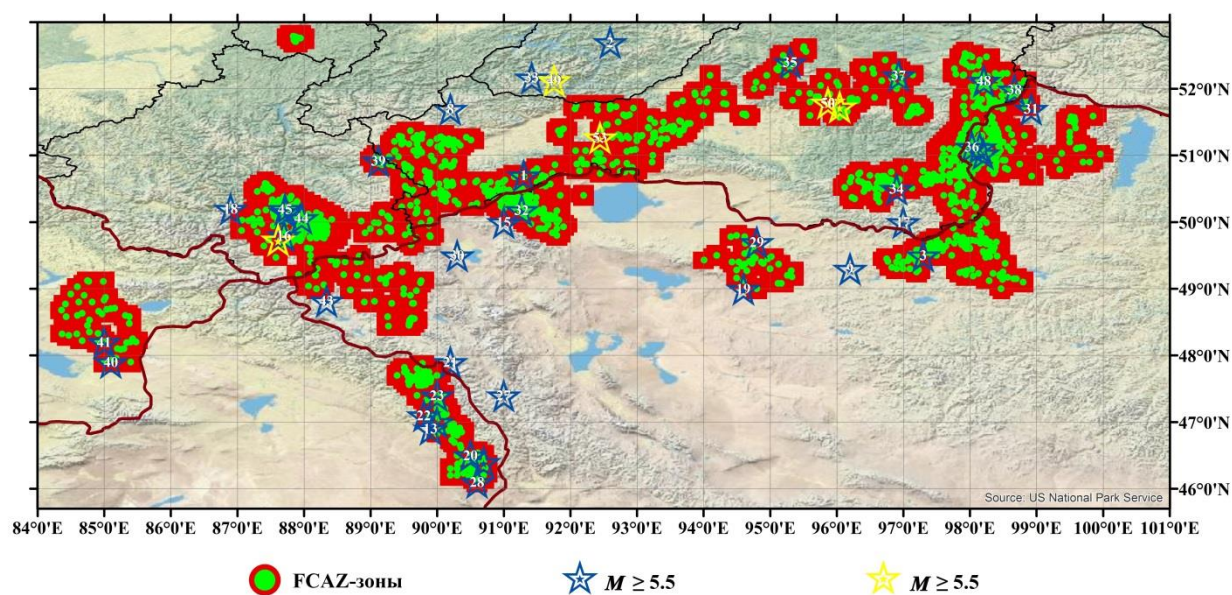


Рис. 5.6. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ (синим – до 2009 г. включительно, желтым – после 2009 г.) (табл. 5.2)

Из рассматриваемых 53 землетрясений (рис. 5.6, табл. 5.2) эпицентры 8 (15%) не попадают в распознанные FCAZ-зоны (табл. 5.2, № 2, 8, 9, 17, 27, 30, 33, 49). При этом следует заметить, что землетрясения № 2, 8, 9, 17, 27 и 30 произошли до начала активных сейсмологических наблюдений в регионе и локации их эпицентров, с существенной вероятностью, могут быть недостоверными. Более того, эпицентры землетрясений № 9, 27, 30 находятся на территории Монголии.

Землетрясения № 2, 33, 49 произошли на юге Красноярского края, где и

сегодня расположено малое количество сейсмических станций. Соответственно, в каталоге не имеется достаточного количества землетрясений (объектов) с $M \geq 2.8$ для проведения распознавания в этом районе. Последнее обосновывает возможность изъятия эпицентров № 2, 33 49 из множества «пропущенных целей», что снижает процент ошибок до 9.5%. Приведенные аргументы делают возможным рассмотрение результата, показанного на рис. 5.6, как основного варианта распознавания.

Диссертантом впервые предпринята попытка распознать FCAZ-зоны с наименьшим из всех возможных количеством ошибок типа «пропуск цели». Для этого в алгоритме DPS был взят параметр q , дискретно изменяющийся на отрезке $[-1, -4]$ с шагом 0.1. Для каждого значения q_i было выполнено три DPS-итерации. На каждой итерации выбор оптимального значения параметра β осуществлялся с помощью автоматизированной процедуры искусственного интеллекта [71]. Объединение результатов всех трех итераций считалось распознанными DPS-кластерами при $q = q_i$. Из множества полученных вариантов распознавания, вычисленных при различных значениях q , был выбран оптимальный вариант, отвечающий $q = q^*$, с наименьшим количеством пропусков эпицентров значительных землетрясений с $M \geq 5.5$, т.е. ошибок типа «пропуск цели» (рис. 5.7). К выбранному набору DPS-кластеров был применен алгоритм E²XТ [71, 72].

На рис. 5.7 показаны FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с наименьшим количеством ошибок типа «пропуск цели» (землетрясений с $M \geq 5.5$). DPS-кластеры содержат 77.5% объектов распознавания. При этом значения параметров алгоритмов DPS и E²XТ были следующими: $q_1 = q_2 = q_3 = -2.0$, $\beta_1 = 0.0$, $\beta_2 = -0.1$, $\beta_3 = -0.1$, $\omega = -4.25$, $\nu = -2.0$ и шаг географической сетки 0.05° .

FCAZ-зоны, показанные на рис. 5.7, могут интерпретироваться как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны, по тем же причинам, что и зоны на рис. 5.6. При этом, количество «пропусков цели» в этом варианте распознавания составило 6.

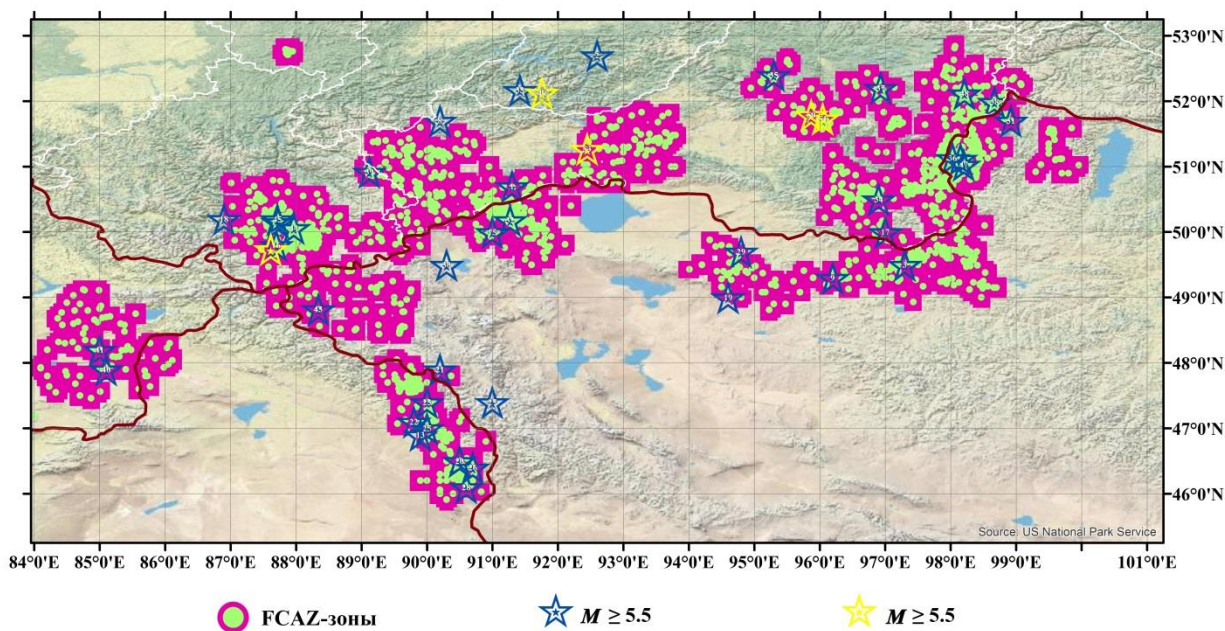


Рис. 5.7. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны с наименьшим возможным количеством ошибок типа «пропуск цели» и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ (синим – до 2009 г. включительно, желтым – после 2009 г.) (табл. 5.2)

Оптимальные FCAZ-зоны на рис. 5.7 хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$. Из 53 эпицентров (рис. 5.7, табл. 5.2) только 6 (11%) не попадают во FCAZ-зоны (табл. 5.2, № 2, 8, 27, 30, 33, 49). Как и выше, следует заметить, что землетрясения № 2, 8, 27 и 30 произошли до начала активных сейсмологических наблюдений в регионе, при этом эпицентры № 27 и 30 находятся на территории Монголии, а № 33 и 49 расположены на юге Красноярского края. По сравнению с основным вариантом распознавания, показанным на рис. 5.6, на рис. 5.7 на два «пропуска цели» меньше (№ 9 и 17).

Сравнение FCAZ-зон на рис. 5.6 и рис. 5.7 показало их хорошее совпадение. Однако, вторые преимущественно содержат первые внутри себя, занимая, при этом, площадь в 1.45 раза больше, чем первые. Тем самым, в случае оптимальных FCAZ-зон (рис. 5.7) неизбежно возрастает число ложных тревог, что негативно влияет на достоверность распознавания. При этом отношение площади пересечения FCAZ-зон (рис. 5.6 и рис. 5.7) к

площади их объединения равно 0.71.

Возвращаясь к пропуску 8 эпицентров в основном варианте распознавания подчеркнем, что фундаментальной причиной этого факта является недостаточность объектов вблизи этих эпицентров. Действительно, оптимизация «пропусков цели» за счет расширения ложных тревог улучшила ситуацию всего на 2 эпицентра.

Из этих соображений делаем вывод о том, что FCAZ-зоны возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны, полученные в основном варианте распознавания (рис. 5.6), являются наиболее достоверным результатом. Подтверждающим аргументом служит и то, что FCAZ-зоны на рис. 5.6 занимают существенно меньшую площадь, чем соответствующие зоны на рис. 5.7. В то же время, в основном варианте распознавания допускается лишь на 2 ошибки больше, по сравнению с оптимальным. При этом следует заметить, что эпицентры землетрясений № 9 и 17 (табл. 5.2), которые не попадают внутрь FCAZ-зон на рис. 5.6, но попадают на рис. 5.7, находятся на территории и на границе Монголии.

Напомним, что используемый для распознавания инструментальный каталог охватывает период 1962 – 2009 г. [147, 148]. В списке землетрясений с $M \geq 5.5$ (табл. 5.2) имеется пять землетрясений, произошедших после 2009 г. (табл. 5.2, № 49 – 53, показаны на рис. 5.6 – 5.7 желтыми звездами), информация о которых никак не использовалась при распознавании. Как на рис. 5.6, так и на рис. 5.7 внутрь распознанных FCAZ-зон попадают четыре из пяти эпицентров, что является объективным аргументом в пользу достоверности результатов проведенного распознавания.

Отметим также, что результаты FCAZ-распознавания хорошо согласуются с особенностями геологического строения региона. Значительная сейсмическая активность региона определяется сложным горно-котловинным рельефом с системой разрывных нарушений. К наиболее мощным сейсмичным разломам относятся разломы между Восточным Саяном и Тувой, Западным Саяном и Горной Шорией. Результаты

распознавания высокосейсмичных зон хорошо коррелируются с системами разрывных нарушений и, как следствие, с районами высокой тектонической активности.

5.3. Кавказ. $M \geq 5.0$

В конце 80-х годов прошлого века под руководством А.Д. Гвишиани было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений на Кавказе методом ЕРА [62]. Для двух порогов магнитуды $M_0 = 5.0$ и $M_0 = 5.5$ было независимо выполнено распознавание опасных морфоструктурных узлов ($M \geq 5.5$) [58, 62] и высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линеаментов ($M \geq 5.0$) [62]. Оба распознавания дали успешные результаты и хорошо согласуются между собой.

В [72, 123, 124, 263] было выполнено распознавание мест возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ с помощью алгоритмической системы FCAZ в ее первоначальном виде. Распознавание дало хорошие результаты.

В диссертационной работе на Кавказе проведено независимое распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ путем применения модернизированной системы FCAZ [71] (см. п. 3.3.3).

5.3.1. Объекты распознавания

В качестве объектов распознавания на Кавказе использовались эпицентры землетрясений за период 1962 – 2008 г., взятые из каталогов «Землетрясения в СССР» (1962 – 1991 гг.) [147] и «Землетрясения Северной Евразии» (1992 – 2008 гг.) [148], в пределах 37.9° с.ш. – 44° с.ш. и 41.5° в.д. – 52.2° в.д. В каталогах содержатся данные о 38 800 землетрясениях в рассматриваемом регионе за 1962 – 2008 гг. Так как магнитуда в каталогах указана не для всех событий, то она пересчитывалась из энергетического

класса [71, 72, 203].

Для выбора порога магнитуды, M_R , начиная с которого эпицентры землетрясений использовались как объекты распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды M_c . Для этого использовался программный продукт ZMAP [323]. Вначале каталог был декластеризован по методике Резенберга [302]. Затем использованием алгоритмов MAXC, GFT90% и EMR было показано, что для рассматриваемого каталога $M_c = 2.7 - 2.8$. В большинстве случаев методы MAXC и GFT90% дают нижнюю границу для M_c [287]. По этой причине было принято решение использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$. В рассматриваемых каталогах содержится информация о 6 980 таких событиях. Расположение их эпицентров на карте изучаемого региона показано на рис. 5.8.

Каталог значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе (до 2008 г., включительно) был сформирован на основе рассматриваемых инструментальных каталогов [147, 148] и субкаталога, использованного для распознавания на Кавказе методом ЕРА [62] (табл. 5.3). Расположение эпицентров значительных землетрясений на карте изучаемого региона показано на рис. 5.8.

В северо-западном районе рассматриваемого региона Кавказа (красный треугольник на рис. 5.8) наблюдается нехватка объектов, необходимых для FCAZ-распознавания. В силу объективных причин, включая недостаточную плотность сейсмических наблюдений в этом районе, число эпицентров событий с $M \geq 3.0$, являющихся объектами распознавания системы FCAZ, существенно меньше, чем в других частях Кавказа. По этим причинам этот подрегион был исключен из рассмотрения. В нем наблюдается 3 эпицентра землетрясений с $M \geq 5.5$ и 4 эпицентра землетрясений с $5.0 \leq M < 5.5$ (рис. 5.8, табл. 5.3). Таким образом, этот подрегион остается актуальным с точки зрения распознавания в нем мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$. Из-за недостатка объектов сегодня нет возможности

применить здесь систему FCAZ. Однако со временем, по мере расширения исходного каталога землетрясений это станет возможным. Отметим, что исключенный здесь из рассмотрения подрегион вошел в объединенный регион Крым – северо-запад Кавказа, в котором проведено FCAZ-распознавание для $M_0 = 4.5$ (см. п. 5.4).

Таблица 5.3

Каталог землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе [62, 147, 148]

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M	№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	650	42.60	47.70	6.1	58.	26.05.1978	41.91	46.48	5.3
2.	743	42.10	48.20	5.5	59.	01.03.1983	43.20	45.30	5.4
3.	918	42.10	48.20	5.5	60.	04.09.1962	39.90	44.10	5.2
4.	957	41.50	49.00	5.5	61.	27.01.1963	40.80	49.80	5.5
5.	1250	41.60	47.20	5.7	62.	02.03.1966	42.90	45.60	5.0
6.	1350	43.00	43.00	6.5	63.	30.01.1967	40.80	44.10	5.0
7.	1530	42.00	45.40	5.7	64.	29.04.1968	39.30	44.30	5.5
8.	08.06.1652	42.10	47.70	5.8	65.	09.06.1968	39.30	46.10	5.0
9.	17.12.1667	41.70	47.30	6.5	66.	05.10.1968	41.80	49.40	5.0
10.	1667	40.90	48.20	7.0	67.	23.12.1970	41.90	50.70	5.0
11.	14.01.1669	40.60	48.60	6.0	68.	14.06.1972	40.30	51.80	5.0
12.	24.07.1742	42.10	45.20	6.2	69.	14.12.1973	41.90	49.00	5.4
13.	09.08.1828	40.70	48.40	5.7	70.	13.11.1974	42.70	46.40	5.0
14.	09.03.1830	43.00	47.00	6.3	71.	25.03.1976	40.90	42.80	5.0
15.	11.06.1859	40.70	48.50	5.9	72.	29.04.1976	40.80	42.90	5.0
16.	28.01.1872	40.60	48.70	5.7	73.	27.07.1976	40.10	48.60	5.0
17.	04.05.1878	41.60	48.10	5.7	74.	24.11.1976	38.90	43.80	7.0
18.	26.06.1889	42.50	48.00	5.9	75.	12.12.1976	38.90	44.10	5.0
19.	13.02.1902	40.70	48.60	6.9	76.	17.01.1977	39.30	43.70	5.2
20.	21.02.1902	41.80	48.60	5.6	77.	14.07.1977	42.45	47.21	5.0
21.	18.06.1902	43.00	42.00	5.2	78.	15.12.1977	43.20	45.00	5.0
22.	05.07.1903	41.80	48.70	5.5	79.	02.01.1978	41.40	44.10	5.2
23.	02.11.1903	41.10	47.10	5.0	80.	04.08.1981	38.21	49.47	5.4
24.	28.04.1904	40.70	48.50	5.1	81.	19.11.1981	40.50	49.00	5.0
25.	05.07.1904	40.80	48.70	5.1	82.	29.11.1981	40.75	48.00	5.2
26.	21.10.1905	43.30	41.70	6.4	83.	02.12.1981	40.68	47.93	5.0
27.	20.02.1906	41.50	48.40	5.9	84.	30.10.1983	40.31	42.10	6.8
28.	25.09.1906	43.40	42.80	5.0	85.	04.03.1984	42.88	45.50	5.2
29.	21.08.1907	42.70	48.30	5.3	86.	18.09.1984	40.50	42.30	5.0
30.	30.10.1909	42.40	48.00	5.8	87.	18.10.1984	40.72	42.25	5.0
31.	25.03.1913	41.80	48.30	5.7	88.	06.03.1986	40.30	51.60	6.1
32.	14.01.1915	42.80	44.70	5.4	89.	13.05.1986	41.45	43.70	5.6
33.	09.10.1924	40.90	48.60	5.2	90.	07.12.1988	40.92	44.23	6.8
34.	10.02.1929	43.10	43.90	5.3	91.	03.08.1989	43.49	45.23	5.0

35.	05.12.1930	41.40	48.70	5.2	92.	16.09.1989	40.20	51.60	5.4
36.	17.05.1931	40.50	48.50	5.0	93.	17.09.1989	40.10	52.10	5.2
37.	24.10.1933	42.90	45.90	5.2	94.	29.04.1991	42.40	43.69	6.9
38.	02.09.1936	41.50	46.60	5.3	95.	29.04.1991	42.72	43.93	5.6
39.	15.08.1947	42.50	45.00	5.5	96.	29.04.1991	42.38	43.48	6.1
40.	29.06.1948	41.60	46.40	6.1	97.	03.05.1991	42.52	43.27	5.3
41.	30.08.1948	41.90	48.00	5.4	98.	15.06.1991	42.36	43.99	6.3
42.	02.11.1951	42.30	45.30	5.3	99.	04.07.1991	42.31	44.06	5.0
43.	30.04.1953	41.00	48.10	5.0	100.	30.01.1992	39.80	45.10	5.0
44.	21.03.1956	40.92	48.39	5.3	101.	08.05.1992	43.22	45.54	5.0
45.	26.01.1957	42.58	42.30	5.3	102.	23.10.1992	42.43	45.08	6.3
46.	29.01.1957	42.47	42.45	5.1	103.	09.12.1992	40.13	45.25	5.0
47.	06.05.1958	43.15	47.77	5.5	104.	28.02.1997	37.95	48.20	5.8
48.	16.07.1963	43.25	41.58	6.4	105.	27.11.1997	41.80	45.30	5.0
49.	20.04.1966	41.79	48.15	5.4	106.	09.07.1998	38.76	48.42	5.1
50.	17.06.1969	43.27	45.19	5.1	107.	23.12.1998	40.54	42.13	5.0
51.	14.05.1970	43.00	47.09	6.6	108.	31.01.1999	43.11	46.96	5.7
52.	17.05.1970	42.98	46.92	5.2	109.	25.11.2000	40.00	50.00	6.1
53.	20.12.1971	41.23	48.38	5.5	110.	02.12.2001	38.48	43.05	5.0
54.	04.08.1974	42.20	45.90	5.1	111.	01.07.2004	39.76	44.15	5.0
55.	23.12.1974	42.95	46.82	5.0	112.	26.09.2005	40.60	42.90	5.0
56.	09.01.1975	43.09	47.10	5.2	113.	11.10.2008	43.24	46.17	5.7
57.	28.07.1976	43.10	45.50	6.4					

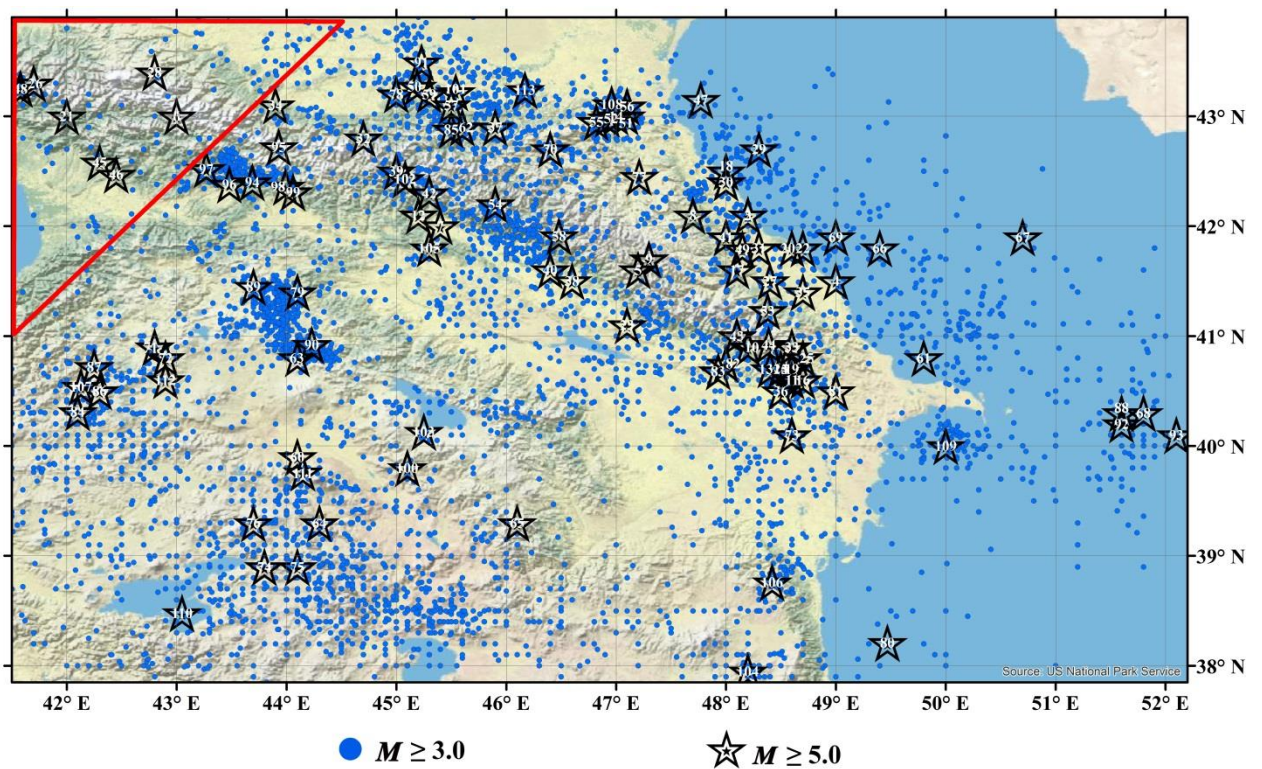


Рис. 5.8. Объекты распознавания системы FCAZ на Кавказе (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$ (табл. 5.3)

5.3.2. FCAZ-зоны

Было выполнено 5 итераций алгоритма DPS. На каждой итерации алгоритм применялся последовательно при значениях β , дискретно изменяющихся на отрезке $[-1, 1]$ с шагом 0.1. Затем с помощью блока искусственного интеллекта выбиралось оптимальное значение уровня максимальности плотности β [71].

Рассчитанные оптимальные значения параметра β на итерациях оказались следующими: $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 0.0$, $\beta_3 = 0.1$, $\beta_4 = 0.1$ и $\beta_5 = 0.2$. Значения параметра q были взяты такими же, как в [72], а именно: $q_1 = -3.0$, $q_2 = -3.0$, $q_3 = -3.5$, $q_4 = -3.5$ и $q_5 = -4.0$ (при этом $r_1 = 24.15$ км, $r_2 = 33.35$ км, $r_3 = 21.56$ км, $r_4 = 22.15$ км и $r_5 = 15.41$ км). Отметим, что в DPS-кластеры вошло 70.6% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$). На рис. 5.9 зеленым цветом показаны распознанные DPS-кластеры.

К DPS-кластерам на Кавказе был применен алгоритм E²XТ [71]. Оптимальные значения его входных параметров оказались следующими: $\omega = -4.25$ и $\nu = -3.75$. При этом использовалась регулярная сетка с шагом 0.05° и тип связности C_8 . На рис. 5.10 совокупностью зеленого и красного цветов показаны двумерные непрерывные FCAZ-зоны мощности континуум. Внутри FCAZ-зон находятся 98 из 106 (92.5%) рассматриваемых значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ (рис. 5.10, табл. 5.3). При этом FCAZ-зоны содержат в себе 68% землетрясений с $M \geq 4.0$ из числа имеющихся в рассматриваемом каталоге. Это позволяет интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как места возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе.

Как видно из рис. 5.10, на Кавказе высокосейсмичные FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров исторических и инструментальных значительных землетрясений. Эпицентры практически всех землетрясений, используемых в работе [62] для обучения алгоритма

дихотомии в методе ERA, попадают во FCAZ-зоны или располагаются на их границах. То же самое можно сказать и про эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$, не участвовавшие в формировании обучающих выборок в [62] или произошедшие после опубликования результатов [62] в 1988 г.

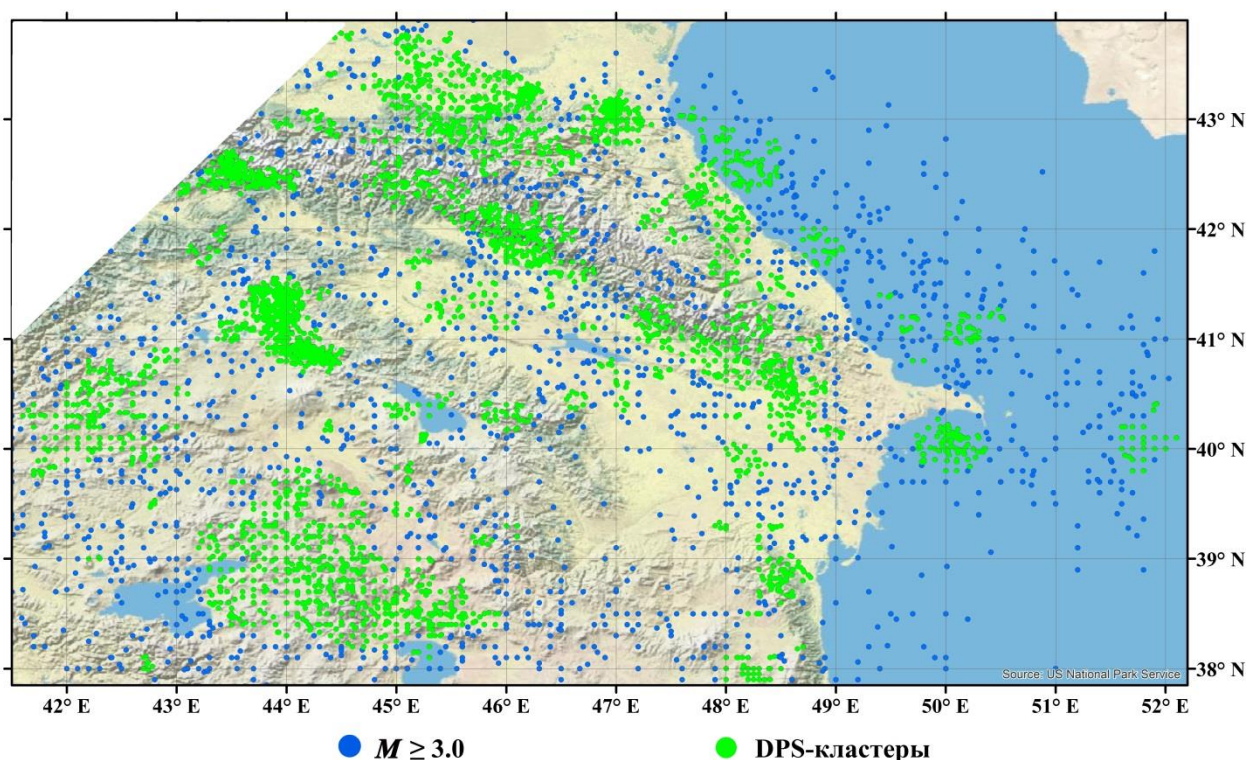


Рис. 5.9. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$ на Кавказе

Из 106 землетрясений (рис. 5.10, табл. 5.3) с $M \geq 5.0$ (отметим тут, что события № 6, 21, 26, 28, 45, 46 и 48 (табл. 5.3) находятся в подрегионе, который был исключен из рассмотрения) эпицентры только 8 (7.5%) находятся вне границ распознанных FCAZ-зон. Объясняя эти «пропуски цели», отметим, что землетрясения № 4, 5 и 9 (табл. 5.3) произошли задолго до начала активных систематизированных инструментальных наблюдений (в 957, 1250 и 1667 годах, соответственно). При этом эпицентр № 4 лежит вблизи границы распознанной FCAZ-зоны. Учитывая допустимую неточность в определении координат эпицентров столь исторических землетрясений, можно предположить, что эти три «пропуска цели» таковыми на самом деле могут не являться.

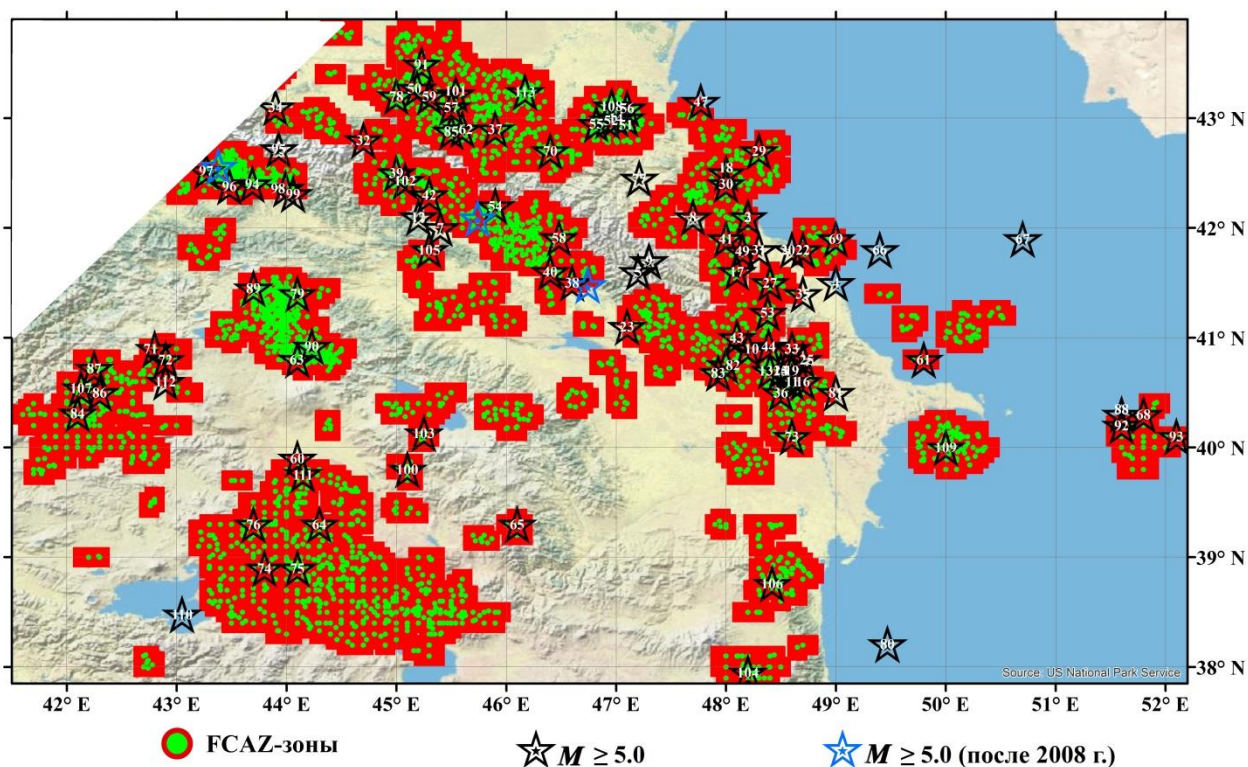


Рис. 5.10. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$

Эпицентры № 67, 80 и 110 (табл. 5.3) располагаются на значительном расстоянии от сейсмических сетей, на базе которых создавались использованные при распознавании каталоги. При расширении, в будущем, каталога землетрясений эти «пропуски цели» могут оказаться внутри новых DPS-кластеров и соответствующих непрерывных FCAZ-зон. Таким образом, можно считать, что, по сути, двумя «пропусками цели» (1.9%) являются эпицентр землетрясения № 77 в Дагестане и эпицентр № 66 в акватории Каспийского моря.

При распознавании использовался каталог землетрясений Кавказа за период 1962 – 2008 гг. Диссертантом была предпринята попытка проследить согласованность распознанных FCAZ-зон и эпицентров значительных землетрясений, произошедших после 2008 г. и зафиксированных сейсмическими сетями Геофизической службы РАН. По ежегодникам Геофизической службы РАН «Землетрясения России» за 2009 – 2013 гг. был сформирован список землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе начиная с 2009 г.

(рис. 5.10). Таким образом, оказался доступным материал чистого экзамена. Эпицентры этих землетрясений показаны на рис. 5.10 синими звездами. Как видно, все три эпицентра располагаются внутри распознанных FCAZ-зон (рис. 5.10). Такой успех на чистом экзамене есть объективный, независимый от проведенного распознавания аргумент в пользу достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе.

5.4. Крым и северо-запад Кавказа. $M \geq 4.5$

Исследуемый регион расположен в пределах $41.0^\circ - 46.0^\circ$ с. ш. и $30.0^\circ - 44.5^\circ$ в. д., охватывает два сейсмически активных региона Северной Евразии: Крым и западную часть Северного Кавказа и является районом сопряжения мегантиклинорий Горного Крыма и гор Западного Кавказа (рис. 5.11). Он включает в себя полуостров Крым, полуострова Керченский и Таманский, Предкавказье и горы Западного Кавказа, Черноморское побережье Кавказа, и части акваторий Черного и Азовского морей, включая Керченский пролив.

Крымский полуостров отвечает южной части Украинского кристаллического щита Восточно-Европейской платформы. В геологическом строении Крыма выделяется несколько крупных геотектонических структур различного возраста [152]. Северная часть полуострова расположена в зоне субширотного прогиба Причерноморской платформенной впадины. Южнее находится Равнинный Крым, расположенный на складчатом фундаменте Скифской плиты из палеозойских кристаллических пород, перекрытых мощной толщей мезо-кайнозойских осадочных пород. Наиболее крупными тектоническими структурами этой области являются Альминская впадина на западе и Индольская впадина на востоке, между которыми расположено Симферопольское поднятие. Крайнюю восточную часть района занимает Северо-Керченская надвиговая зона.

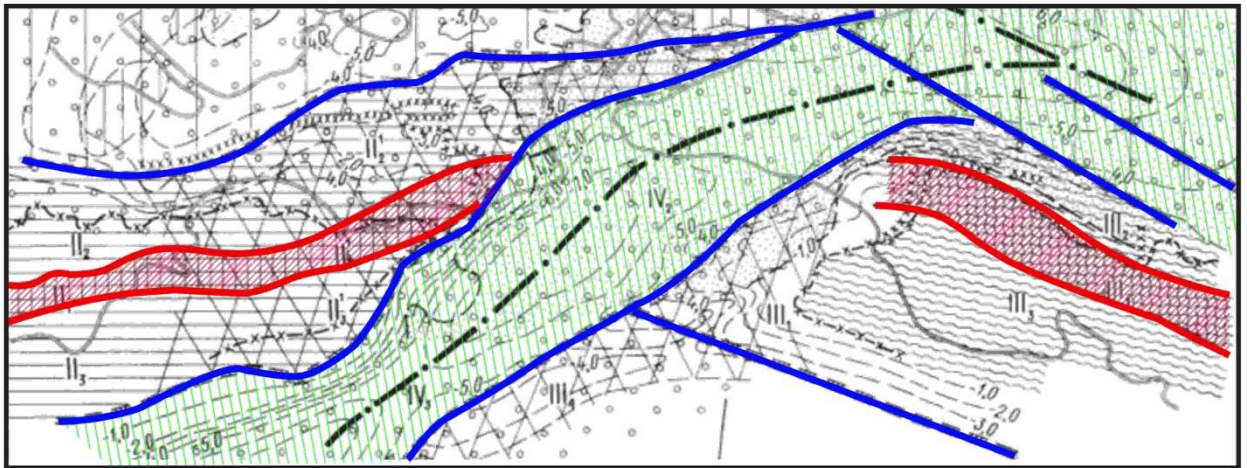


Рис. 5.11. Схема расположения основных тектонических элементов района сопряжения мегантиклинорий Горного Крыма и Северо-Западного Кавказа (по Полухтовичу и др. [187]). Красным цветом показаны антиклинорные зоны, синим – главные разломы и зоны разломов, зеленым – районы значительных прогибаний в майкопское время

Южная горная часть Крымского полуострова простирается тремя грядами – Главной (южной), Внутренней и Внешней (северной), разделёнными продольными равнинами. Это крупное и сложное антиклинальное поднятие, относящееся к альпийской геосинклинальной складчатой области, южная часть которого опущена под уровень Черного моря [307]. Складки гор разбиты на крупные блоки поперечными тектоническими разломами. Внутренняя и Внешняя гряды образуют Крымское предгорье. С севера Горный Крым ограничен Симферопольским глубинным разломом [24], возникшим в результате схождения края Евразийской плиты с субконтинентальным фрагментом коры Горного Крыма [227] (рис. 5.11). На востоке горного массива находится Индольский передовой прогиб, который продолжается на восток в виде Западно-Кубанского, составляя общий Индо-Кубанский прогиб для Крымского и Кавказского орогенов [221].

В основании большей части Предкавказья на севере и в срединной части лежит Скифская молодая эпигерцинская платформа [91, 220]. На этой

территории выделяется Таманский полуостров, Кубано-Приазовская и Терско-Кумская низменности, Ставропольская возвышенность и Минераловодская группа островных гор (лакколитов).

Горы Западного Кавказа образованы несколькими хребтами, вытянутыми параллельно друг другу. Вдоль горных массивов Крыма и Кавказа на юге расположены глубокие прогибы Восточно-Черноморской впадины: прогиб Сорокина и Туапсинский прогиб. Альпийские передовые прогибы выражены двумя глубокими предгорными депрессиями – Индоло-Кубанским краевым прогибом, общим для восточного Крыма и западной части Северного Кавказа, и Терско-Кумской впадиной.

Керченско-Таманский прогиб разделяет складчатые сооружения Горного Крыма и гор Западного Кавказа, а в меридиональном сечении впадины Азовского и Черного морей, и представляет собой порог между Индоло-Кубанским прогибом и Черноморской впадиной. В его структуру входят Таманский полуостров, юго-восточная часть Керченского полуострова и смежный Керченско-Таманский шельф Черного моря. Керченско-Таманский прогиб протягивается на 130 – 140 км и имеет ширину около 50 км. По данным сейсмических исследований мощность осадочных толщ, выполняющих прогиб, превышает 10 км. Ахтанизовско-Казилташская зона занимает основную часть Таманского полуострова и распространяется на юго-запад в акваторию Черного моря. Ахтанизовско-Казилташская зона рассматривается как продолжение зоны Южного склона Большого Кавказа [223].

Тектоническое строение Крыма и западной части Северного Кавказа, расположенных в зоне сочленения Скифской плиты с зоной Альпийской геосинклинальной складчатой области, их высокая сейсмическая активность, которая в основном определяется Южнобережным глубинным разломом и фрагментом Одесско-Синопского глубинного разлома, делает оправданным решение задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясений для всего рассматриваемого региона. По данным некоторых

исследователей, эта область также отвечает району подвига Черноморской плиты под массив Горного Крыма. Это также может быть причиной высокой сейсмической активности южного побережья [227, 330].

Рассматриваемый Крым-Кавказский сегмент альпийского складчатого пояса (см. рис. 5.11 – 5.12) требует комплексной оценки сейсмической опасности как единый регион, в первую очередь в связи с его тектоническим строением. Территория, на которой в работе проводится распознавание мест возможного возникновения землетрясений, отвечает району сочленения двух мегантиклинорий, находящихся в состоянии сжатия. Единые активные процессы тектоногенеза подтверждаются наличием действующих грязевых вулканов как на Таманском полуострове, так и в Крыму. Это свидетельствует о повышенной тектонической активности всего изучаемого региона и наличии в глубине повышенного всестороннего давления [119].

В работах [70, 71, 72, 123, 124, 263] и в п. 5.3 настоящей диссертационной работы, с помощью метода FCAZ было проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ на Кавказе. В качестве объектов распознавания при этом использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$. Достоверность этих результатов подтверждается целым рядом контрольных экспериментов, хорошей согласованностью с независимыми результатами классического метода EPA (Earthquake-Prone Areas) [58, 60, 62, 84, 206, 242, 266] и расположением эпицентров исторических и инструментальных землетрясений с $M \geq 5.0$.

В [140, 201] показано, что прогнозный сейсмический потенциал центральной части запада Северного Кавказа составляет $M_{\max} = 6.5 - 6.8$. В то же время уровень зарегистрированной сейсмичности в этом районе достаточно низок. Таким образом, можно говорить о существовании области длительного сейсмического затишья в западной части Северного Кавказа [4]. Это делает поставленную задачу распознавания мест возможного возникновения землетрясений в западной части Северного Кавказа еще более

актуальной. Жирная черная линия на юго-востоке региона (рис. 5.12) показывает границу между регионом, рассматриваемым здесь, и основным регионом Кавказа, изученным выше и в работах [70, 71, 72, 123, 124, 263].

5.4.1. Объекты распознавания

В качестве объектов распознавания в изучаемом регионе использовались эпицентры инструментальных землетрясений с магнитудой $M \geq M_R$. Порог M_R является региональной характеристикой и его выбор для того или иного региона представляет собой самостоятельную задачу.

В работе использовался каталог землетрясений Крыма и Северного Кавказа за 1962 – 2008 гг., созданный на базе региональных каталогов ежегодников «Землетрясения в СССР» [147] и «Землетрясения Северной Евразии» [148]. Каталог включает в себя 5 601 сейсмическое событие. Для событий с отсутствующими значениями магнитуды в каталоге, магнитуда была пересчитана из энергетического класса [203]. В качестве объектов FCAZ-распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 2.0$. Это связано с тем, что достаточно «жесткая» оценка полноты каталога M_c (completeness magnitude) колеблется в пределах 2.3 – 2.5.

Выбор $M_R = 2.0$ согласуется, с другой стороны, и с [180], где авторы используют землетрясения с $M \geq 2.0$ для расчета коэффициентов общего закона подобия землетрясений, тщательно обосновывая, что представительность таких землетрясений достаточно высока. В рассматриваемом нами регионе в используемом каталоге имеется 2 398 землетрясений с $M \geq 2.0$, ставших объектами распознавания (рис. 5.12).

Количество землетрясений с $M \geq M_0$ должно быть достаточным для оценки степени их согласованности с распознанными зонами. Напомним, что на основной части Кавказа, изученной методом FCAZ в [70, 71, 72, 123, 124, 263] использовался порог $M_0 = 5.0$. В используемом каталоге для рассматриваемого здесь региона имеется всего 5 землетрясений с $M \geq 5.0$, а

начиная с 1900 г. их всего 17. При этом магнитуды исторических землетрясений могут оказаться завышенными [101, 183]. По этой причине здесь в качестве распознаваемых землетрясений рассматриваются землетрясения двух уровней: с $M \geq 5.0$ и с $M \geq 4.5$ (и те и другие будем называть значительными). Расположение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$ (табл. 5.4) на карте региона показано на рис. 5.12.

Общий каталог значительных землетрясений с $M \geq 4.5$ за период 1900 – 2008 гг. для рассматриваемого региона (табл. 5.4, рис. 5.12) был сформирован на основе исторического каталога под редакцией Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина [183] и рассматриваемого инструментального каталога.

Таблица 5.4

Землетрясения с $M \geq 4.5$ в Крыму и западной части Северного Кавказа
(жирным шрифтом выделены землетрясения с $M \geq 5.0$)

№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M	№	Дата	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	M
1.	06.05.1900	45.0	35.4	4.5	23.	25.12.1955	42.7	42.3	4.8
2.	08.01.1902	44.6	35.8	5.5	24.	26.01.1957	42.58	42.3	5.3
3.	18.06.1902	43.0	42.0	5.2	25.	29.01.1957	42.47	42.45	5.1
4.	04.10.1905	44.7	37.4	5.1	26.	18.03.1957	44.5	33.0	5.5
5.	21.10.1905	43.3	41.7	6.4	27.	05.07.1958	42.7	41.65	4.6
6.	25.09.1906	43.4	42.8	5.0	28.	20.05.1959	41.87	41.86	5.1
7.	30.05.1908	44.54	34.3	4.7	29.	25.09.1959	44.0	39.4	4.5
8.	06.10.1908	44.6	33.4	4.5	30.	16.07.1963	43.25	41.58	6.4
9.	18.04.1909	44.1	42.0	4.6	31.	12.07.1966	44.7	37.3	5.8
10.	04.07.1912	44.1	43.1	4.7	32.	13.05.1968	43.5	40.6	4.5
11.	16.08.1914	44.8	37.6	4.7	33.	08.01.1969	44.8	37.1	4.9
12.	25.12.1919	44.6	34.9	5.7	34.	04.12.1970	43.6	39.3	5.5
13.	29.06.1921	43.9	42.8	5.6	35.	26.01.1971	43.4	39.4	4.5
14.	11.09.1927	44.3	34.3	6.8	36.	02.10.1971	44.7	42.3	4.5
15.	07.11.1930	42.7	42.0	4.8	37.	22.07.1972	44.8	37.2	5.2
16.	26.12.1934	44.4	34.3	4.6	38.	28.02.1978	44.1	42.8	4.5
17.	11.09.1938	43.4	43.2	4.6	39.	03.09.1978	44.38	38.03	5.5
18.	15.06.1941	42.3	42.1	4.7	40.	06.09.1988	41.98	41.77	4.7
19.	06.03.1949	42.3	41.4	4.6	41.	16.08.1990	44.7	35.06	4.5
20.	26.12.1949	44.3	34.4	4.5	42.	09.11.2002	45.12	37.84	4.8
21.	24.11.1953	42.7	43.3	4.7	43.	15.11.2004	44.18	39.71	4.9
22.	12.11.1954	43.9	40.9	4.6	44.	07.05.2008	45.34	30.95	4.5

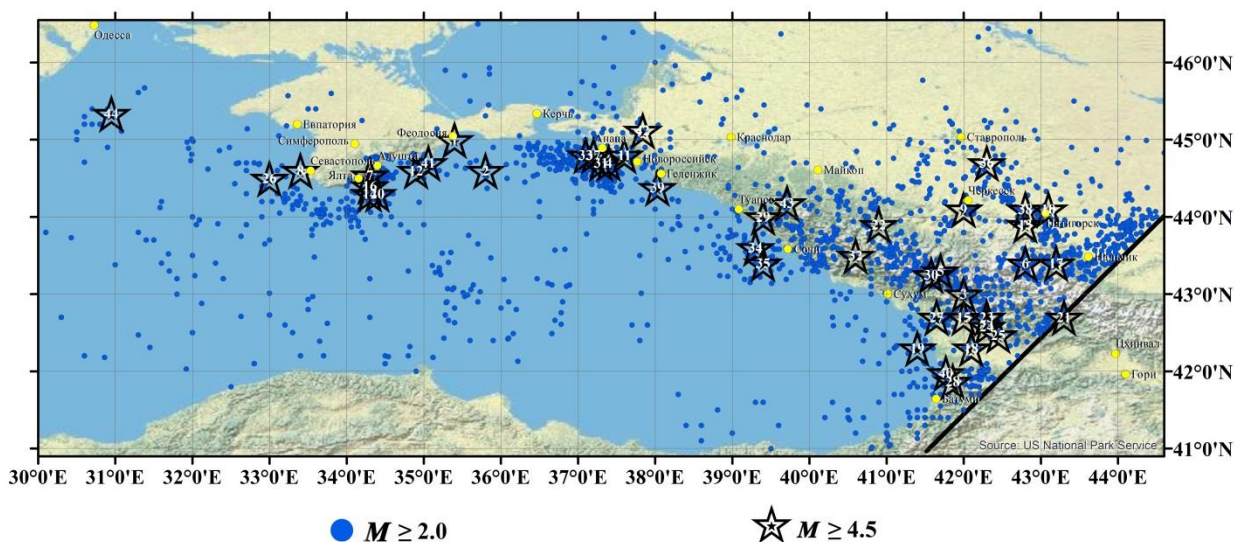


Рис. 5.12. Объекты распознавания системы FCAZ в регионе Крым и северо-запад Кавказа (эпицентры землетрясений с $M \geq 2.0$) и эпицентры землетрясений с $M \geq 4.5$ (табл. 5.4)

5.4.2. FCAZ-зоны

Было выполнено 5 итераций алгоритма DPS. Вычисляемые оптимальные значения параметра β на итерациях оказались следующими: $\beta_1 = 0.2$, $\beta_2 = 0.1$, $\beta_3 = 0.1$, $\beta_4 = 0.1$ и $\beta_5 = 0.2$. Значения параметра q равнялись, соответственно: $q_1 = -2.5$, $q_2 = -3.0$, $q_3 = -3.0$, $q_4 = -3.0$ и $q_5 = -3.0$ ($r_1 = 15.07$ км, $r_2 = 21.20$ км, $r_3 = 24.39$ км, $r_4 = 25.35$ км и $r_5 = 25.55$ км). В DPS-кластеры вошло 76% объектов распознавания. На рис. 5.13 зеленым цветом показаны DPS-кластеры. Их расположение соответствует имеющимся на сегодня представлениям о сейсмической опасности изучаемого региона. Отметим, что в связи со строительством моста через Керченский пролив, особый интерес может представлять большой распознанный кластер юго-западнее Таманского полуострова в акватории Черного моря.

К DPS-кластерам был применен алгоритм E^2XT . Оптимальные значения входных параметров $\omega = -6.0$ и $\nu = -3.5$ алгоритма вычислялись автоматически [71]. При этом использовалась регулярная сетка с шагом 0.05° и тип связности C_8 [71, 72]. На рис. 5.14 совокупностью зеленого и красного

цветов показаны распознанные FCAZ-зоны. Внутри FCAZ-зон находятся 39 из 44 (88.6%) эпицентров рассматриваемых землетрясений с $M \geq 4.5$ (табл. 5.4). При этом FCAZ-зоны содержат в себе 67% землетрясений с $M \geq 3.5$ из числа имеющихся в рассматриваемом каталоге. Это дает возможность интерпретировать FCAZ-зоны как места возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 4.5$ в регионе Крым и северо-запад Кавказа.

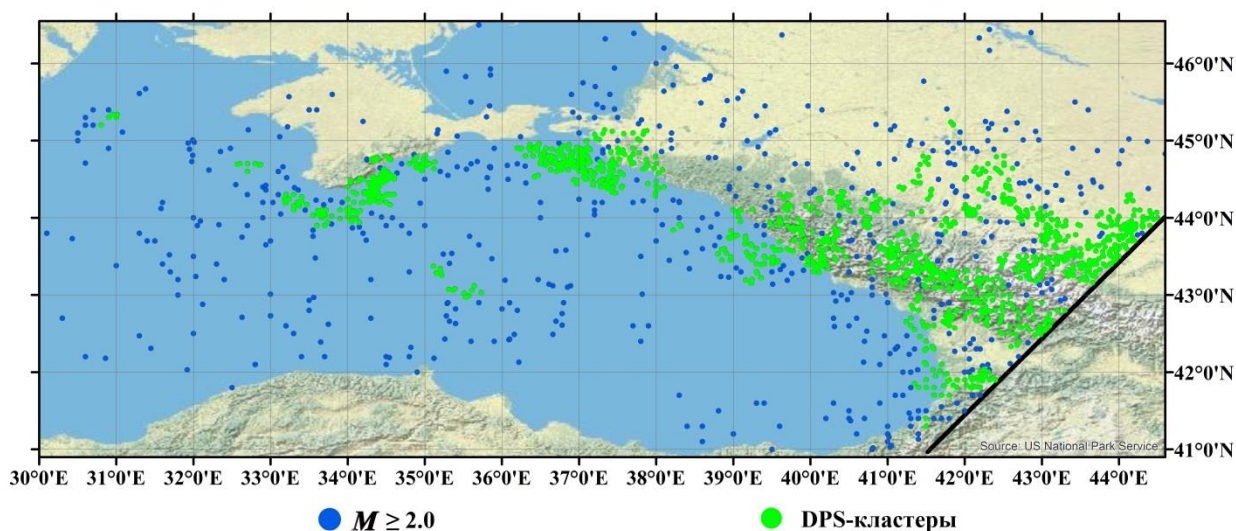


Рис. 5.13. DPS-кластеры эпицентров землетрясений с $M \geq 2.0$ в регионе Крым и северо-запад Кавказа

Из 44 землетрясений с $M \geq 4.5$ (рис. 5.14, табл. 5.4) эпицентры только пяти (11.4%) землетрясений (№ 1, 2, 8, 18 и 26 в табл. 5.4) находятся вне границ распознанных зон. Однако некоторые из этих «пропусков цели» могут и не быть таковыми. Все пропущенные землетрясения относятся к исторической части каталога (табл. 5.4) и произошли до начала систематизированных инструментальных наблюдений в регионе и, тем самым, могут не являться объектами распознавания. Определение их эпицентров проводилось приблизительно [101]. Реальные координаты всех пяти «пропусков цели» могут достаточно существенно отличаться от нанесенных на рис. 5.14 и, в частности, входить в границы распознанных

FCAZ-зон. Более того, землетрясения № 1, 8 и 18 согласно [183] имеют магнитуды $M = 4.5 - 4.7$, определенные с погрешностью ± 0.5 . Соответственно, с существенной долей вероятности эти три землетрясения (№ 1, 8, 18) могут иметь магнитуды $M < 4.5$.

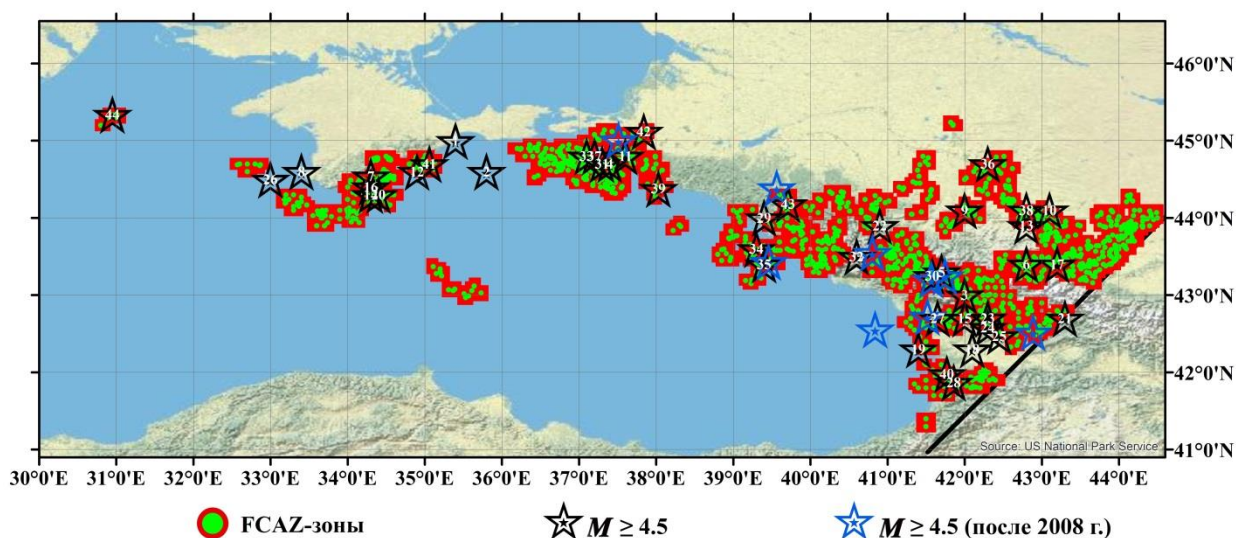


Рис. 5.14. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 4.5$ в регионе Крым и северо-запад Кавказа и эпицентры землетрясений с $M \geq 4.5$

Таким образом, можно достаточно уверенно говорить лишь о двух (из 44) «пропусках цели» FCAZ-распознавания. Это эпицентры № 2 и № 26, находящиеся в акватории Черного моря. Соответственно, вероятность «пропуска цели» снижается до $p_1 = 4.5\%$. При этом остается неопределенность, связанная с неточностью определения эпицентров исторических землетрясений № 2 и № 26. Ее уточнение может еще более уменьшить полученную оценку вероятности «пропуска цели» $p_1 = 4.5\%$.

Распознанные FCAZ-зоны можно трактовать и более узко. Они также оказываются связанными и с событиями более высокого порога магнитуды $M_0 = 5.0$. В рассматриваемом регионе насчитывается 17 инструментальных и исторических землетрясений с $M \geq 5.0$ (выделены жирным в табл. 5.4). Как видно из рис. 5.14 все эти эпицентры, кроме № 2 и № 26, расположены внутри или на границах распознанных FCAZ-зон. Таким образом, если

рассматривать землетрясения с $M \geq 5.0$, то распознанные FCAZ-зоны могут интерпретироваться как места их возможного возникновения. При этом имеем 2 «пропуска цели», т.е. $p_2 = 11.8\%$. Заметим, что здесь речь идет о тех же двух эпицентрах № 2 и № 26, что и в предыдущем рассуждении относительно $M \geq 4.5$. Таким образом, оценка $p_2 = 11.8\%$ и здесь может оказаться существенно ниже.

В рассматриваемом регионе после 2008 г. произошло 9 землетрясений с $M \geq 4.5$. Их эпицентры показаны на рис. 5.14 синими звездами. Эпицентры 8 (88.9%) из них находятся строго внутри распознанных FCAZ-зон. Единственной ошибкой типа «пропуск цели» является эпицентр землетрясения с $M = 4.6$, расположенный в акватории Черного моря. Таким образом, получен объективный и независимый от результатов исследования аргумент в пользу достоверности результатов FCAZ-распознавания.

5.5. Прибайкалье-Забайкалье. Последовательное распознавание: $M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$

В настоящем разделе диссертационной работы приводятся результаты впервые проведенного последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений для нескольких магнитудных порогов в одном и том же сейсмоопасном регионе. Последовательное распознавание осуществлялось с помощью алгоритма SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning), описанного в пункте 3.3.4 диссертационной работы и являющегося дальнейшим развитием FCAZ. Диссертантом последовательно изучены места возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$ и $M \geq 6.0$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье.

Исследуемый регион Прибайкалье-Забайкалье ($47^\circ - 60^\circ$ с.ш., $95^\circ - 123^\circ$ в.д.) – горная область на юге Восточной Сибири, охватывающая территории Иркутской и Читинской областей, а также Республики Бурятия. Прибайкалье включает южную часть Сибирской платформы и Байкальскую

рифтовую зону. К Забайкалью относят территории к востоку и юго-востоку от озера Байкал. Эта площадь занята Витимским плоскогорьем и примыкающими к нему на севере и северо-востоке хребтами северо-восточного простирания, разделёнными низкогорными котловинами в бассейнах рек.

Территория Прибайкалья и Забайкалья характеризуется разнородным геологическим строением. Она включает в себя крупные структурные элементы, завершившие геосинклинальное развитие в разное время: Прибайкалье и северо-западная часть Забайкалья относятся к системам байкальской и каледонской эпох складчатости (~ 650 – 350 млн. лет); вся юго-восточная часть Забайкалья представляет собой герцинскую Монголо-Охотскую складчатую область (~ 350 – 250 млн. лет) [174].

Главной структурой региона является **Байкальская рифтовая зона – глубинный разлом земной коры**, протяженностью около 1 500 км. Это **дивергентная граница** между Евразийской плитой и Амурской микроплитой, **расположенная в районе озера Байкал и Восточных Саян**. **Байкальская рифтовая зона** состоит из серии впадин и разделяющих их довольно высоких (2 – 3 км) хребтов. **Её центральная часть** Байкальская котловина **располагается под озером** и состоит из двух впадин – Южнобайкальской и Северобайкальской, отделенных друг от друга Академическим подводным хребтом.

Для всей зоны в целом характерны большие величины поднятий в северных и северо-западных хребтах, ограничивающих впадины, по сравнению с южными и юго-западными. **Байкальской рифтовой зоне свойственна высокая тектоническая подвижность, сопровождающаяся интенсивной сейсмичностью: здесь происходит наибольшее количество слабых и сильных землетрясений** региона Прибайкалья и Забайкалья. Скорость расширения Байкальской котловины по данным GPS / ГЛОНАСС составляет 4 мм в год [202].

5.5.1. Объекты распознавания

В качестве объектов распознавания в регионе Прибайкалье-Забайкалье использовались эпицентры из каталога землетрясений за период 1962 – 2010 гг., полученного объединением двух источников-каталогов «Землетрясения в СССР» (1962 – 1991 гг.) [147] и «Землетрясения Северной Евразии» (1992 – 2010 гг.) [148]. Объединенный каталог содержит информацию о 35 708 сейсмических событиях. Так как для большей части землетрясений в каталоге отсутствует значение магнитуды, то она пересчитывалась из энергетического класса [203]. Основываясь на результатах оценки полноты объединенного каталога, $M_c = 2.7$, было принято решение использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq 2.7$. Таких землетрясений в каталоге оказалось 11 297.

В качестве распознаваемых землетрясений рассматривались значительные землетрясения с $M \geq 5.5$. Их каталог, начиная с 1900 г., насчитывает 71 событие (табл. 5.5). Он был сформирован на основе вышеуказанного инструментального объединенного каталога [147, 148] и каталога исторических сильных землетрясений на территории СССР [183].

5.5.2. FCAZ-зоны. $M \geq 5.5$

На первом этапе исследования решалась классическая задача ЕРА для $M \geq M_0 = 5.5$. К множеству объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 2.7$) был применен алгоритм DPS. Было выполнено 4 итерации алгоритма (рис. 5.15). Входной параметр q имел для всех четырех итераций единое значение: $q_1^1 = q_2^1 = q_3^1 = q_4^1 = -2.25$. Вычисленные оптимальные значения параметра β оказались равными: $\beta_1^1 = 0.1$, $\beta_2^1 = -0.2$, $\beta_3^1 = 0.0$ и $\beta_4^1 = 0.0$. При этом DPS-кластеры содержат 89% объектов распознавания.

Таблица 5.5

Каталог землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье

№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M	№	Дата	$\varphi,^\circ$	$\lambda,^\circ$	M
1.	11.04.1902	51.60	104.50	6.6	37.	05.01.1967	48.10	102.90	7.8
2.	17.08.1902	56.70	112.70	6.5	38.	18.01.1967	56.50	121.00	6.1
3.	26.11.1903	52.70	107.60	6.7	39.	31.08.1968	56.40	115.78	5.5
4.	09.05.1907	52.20	106.50	5.8	40.	26.11.1968	55.90	111.49	5.5
5.	29.08.1907	56.50	114.50	5.6	41.	28.03.1970	52.23	106.01	5.5
6.	10.01.1915	49.60	99.70	5.8	42.	15.05.1970	56.93	117.78	5.5
7.	25.09.1915	50.50	105.00	5.5	43.	26.02.1972	50.55	96.83	5.5
8.	29.04.1917	56.00	113.80	6.6	44.	09.08.1972	52.80	107.73	5.5
9.	10.05.1929	50.20	106.30	5.6	45.	21.06.1974	56.35	117.70	5.5
10.	06.08.1931	55.30	109.40	5.9	46.	29.11.1974	51.79	98.47	5.5
11.	15.10.1934	50.90	109.90	5.6	47.	18.12.1974	48.40	103.20	5.6
12.	27.05.1936	51.50	105.00	5.5	48.	01.04.1976	51.20	98.00	5.5
13.	25.12.1937	55.60	111.70	6.5	49.	02.11.1976	56.19	111.59	5.5
14.	19.05.1939	52.30	98.60	6.0	50.	03.08.1978	52.30	96.90	5.5
15.	26.05.1939	53.90	108.80	6.0	51.	06.02.1979	48.95	116.68	5.5
16.	23.09.1940	56.10	112.10	5.7	52.	17.01.1981	56.39	117.98	5.5
17.	01.07.1941	52.60	106.80	5.8	53.	22.05.1981	51.96	105.52	5.5
18.	06.05.1949	53.70	109.70	5.8	54.	27.05.1981	53.94	108.92	5.5
19.	06.02.1950	51.30	99.00	5.6	55.	16.08.1981	50.54	96.64	5.5
20.	04.04.1950	51.77	101.00	7.0	56.	01.03.1987	49.78	102.47	5.7
21.	06.02.1957	50.00	105.50	6.5	57.	13.05.1989	50.17	105.34	5.8
22.	27.06.1957	56.20	116.40	7.6	58.	25.10.1989	57.45	118.84	5.7
23.	29.06.1957	56.30	116.90	5.5	59.	26.10.1990	55.95	110.25	5.6
24.	31.08.1957	48.80	100.00	5.6	60.	14.02.1992	53.83	109.00	5.5
25.	03.01.1958	56.00	114.00	5.6	61.	26.04.1994	56.72	118.04	5.8
26.	24.01.1958	56.40	116.20	5.8	62.	21.08.1994	56.70	118.03	6.3
27.	10.04.1958	52.00	100.00	5.8	63.	29.06.1995	51.75	102.76	5.8
28.	23.06.1958	48.70	102.90	6.2	64.	13.11.1995	56.13	114.55	6.1
29.	29.08.1959	52.68	106.98	6.8	65.	25.02.1999	51.64	104.82	5.8
30.	06.10.1960	52.70	108.10	5.5	66.	21.03.1999	55.83	110.34	5.8
31.	28.10.1961	53.60	108.80	5.5	67.	21.03.1999	55.85	110.26	5.6
32.	22.01.1962	52.40	100.20	5.5	68.	16.09.2003	56.05	111.34	5.7
33.	11.11.1962	55.90	113.12	5.8	69.	04.07.2007	55.44	110.44	5.6
34.	10.02.1963	52.60	106.80	5.5	70.	20.05.2008	53.29	108.52	5.7
35.	21.11.1965	50.50	112.10	5.5	71.	27.08.2008	51.60	104.04	6.6
36.	30.08.1966	51.76	104.61	5.5					

К DPS-кластерам был применен алгоритм E^2XT . Оптимальные значения входных параметров алгоритма $\omega = -5$ и $\nu = -2.75$ были вычислены блоком искусственного интеллекта [71]. При этом использовалась регулярная сетка с шагом 0.05° .

На рис. 5.15 показаны FCAZ-зоны в регионе Прибайкалье-Забайкалье. Видно, что распознанные зоны хорошо согласуются с эпицентрами исторических и инструментальных землетрясений с $M \geq 5.5$. Из 71 рассматриваемого землетрясения с $M \geq 5.5$ (табл. 5.5) эпицентры только двух (2.8%) находятся вне распознанных FCAZ-зон, создавая тем самым ошибки типа «пропуск цели». Этот факт позволяет, с достаточно большой степенью достоверности, интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье.

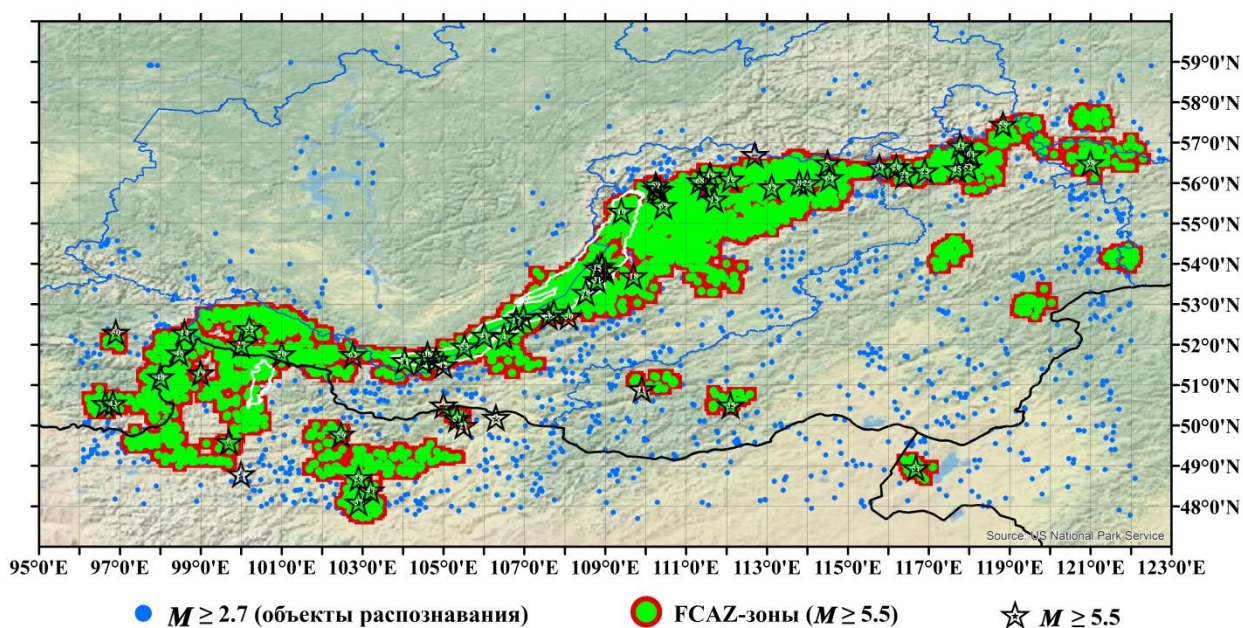


Рис. 5.15. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$ (табл. 5.5)

Эпицентры обоих землетрясений, не попавших во FCAZ-зоны, располагаются за пределами Российской Федерации. Эти землетрясения

произошли до начала инструментальных наблюдений в Прибайкалье-Забайкалье в 1929 и 1957 годах и имеют магнитуду $M = 5.6$, определенную с погрешностью ± 0.5 [183]. Таким образом, их реальная магнитуда может быть существенно меньше порога $M_0 = 5.5$ и, с большой степенью вероятности, проведенное распознавание может не иметь «пропусков цели».

5.5.3. FCAZ-зоны. $M \geq 5.75$

Принципиально новыми являлись 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 10 056 эпицентров землетрясений, вошедших в DPS-кластеры на первом этапе (рис. 5.15). Тем самым, внутри DPS-кластеров, распознанных ранее как определяющие зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$, распознаются подкластеры, определяющие места возможного возникновения более сильных землетрясений. К новому, более узкому множеству объектов распознавания вновь применялся алгоритм DPS. Было выполнено 4 итерации: $q_1^2 = q_2^2 = q_3^2 = q_4^2 = -2.25$, $\beta_1^2 = 0.1$, $\beta_2^2 = -0.1$, $\beta_3^2 = -0.1$ и $\beta_4^2 = 0.0$. Полученные DPS-кластеры содержат 79% объектов распознавания второго этапа (рис. 5.16).

К DPS-кластерам второго этапа распознавания был применен алгоритм E^2XT . Были взяты те же значения свободных входных параметров, что и вычисленные на первом этапе. Полученные на втором этапе FCAZ-зоны показаны на рис. 5.16.

Распознанные зоны FCAZ хорошо согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 5.75$ (рис. 5.16). Эпицентры лишь 3 (10%) из 30 рассматриваемых землетрясений с $M \geq 5.75$ (табл. 5.5) находятся за

пределами FCAZ-зон. Это дает основание рассматривать распознанные зоны, как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье. При этом, они вложены в распознанные на первом этапе высокосейсмичные зоны для магнитудного порога $M_0 = 5.5$.

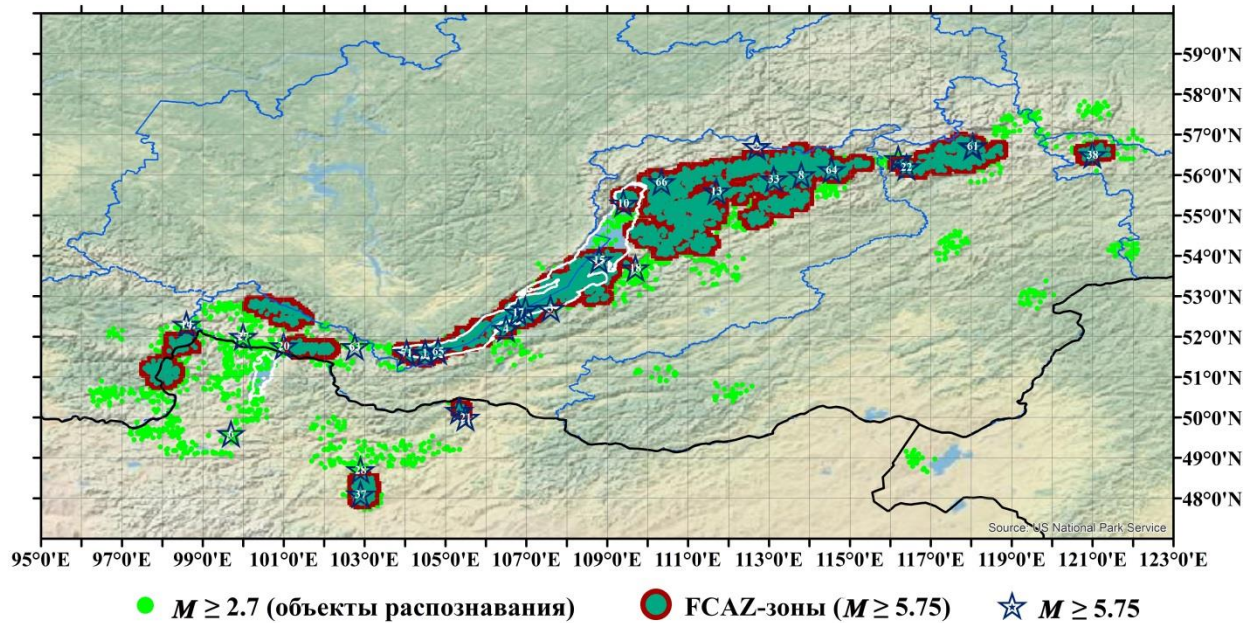


Рис. 5.16. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.75$ (табл. 5.5)

Более того, за границами FCAZ-зон находятся эпицентры землетрясений с весьма неточным определением магнитуды. Первое из них (№ 6 в табл. 5.5) имеет магнитуду $M = 5.8 \pm 0.5$ [183], второе (№ 27 в табл. 5.5) – $M = 5.8 \pm 0.2$ [183]. Тем самым с существенной долей вероятности, их магнитуды могут иметь значения $M < 5.75$. Отметим также, что оба этих землетрясения (№ 6 и № 27) произошли до начала инструментальных наблюдений в регионе, что делает определение их магнитуды еще менее надежным. Наконец землетрясение № 63 (табл. 5.5) имеет магнитуду $M = 5.8$, пересчитанную из энергетического класса. Таким образом, с определенной степенью вероятности распознавание второго этапа также может быть безошибочным.

5.5.4. FCAZ-зоны. $M \geq 6.0$

Дальнейшие этапы распознавания строились методом математической индукции. На третьем этапе исследования распознавались зоны возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 6.0$. В качестве объектов распознавания использовались 7 946 эпицентров, вошедших в DPS-кластеры на втором этапе исследования (рис. 5.16). К множеству объектов распознавания применялся алгоритм DPS. Было выполнено 4 итерации: $q_1^3 = q_2^3 = q_3^3 = q_4^3 = -2.25$, $\beta_1^3 = 0.1$, $\beta_2^3 = -0.1$, $\beta_3^3 = -0.1$ и $\beta_4^3 = -0.1$. DPS-кластеры (рис. 5.17) содержат 77% объектов распознавания этого этапа (54% эпицентров землетрясений с $M \geq 2.7$, являвшихся объектами распознавания на первом этапе).

К DPS-кластерам был применен алгоритм E^2XT с теми же значениями свободных параметров, что и на предыдущих этапах. Полученные FCAZ-зоны представлены на рис. 5.17.

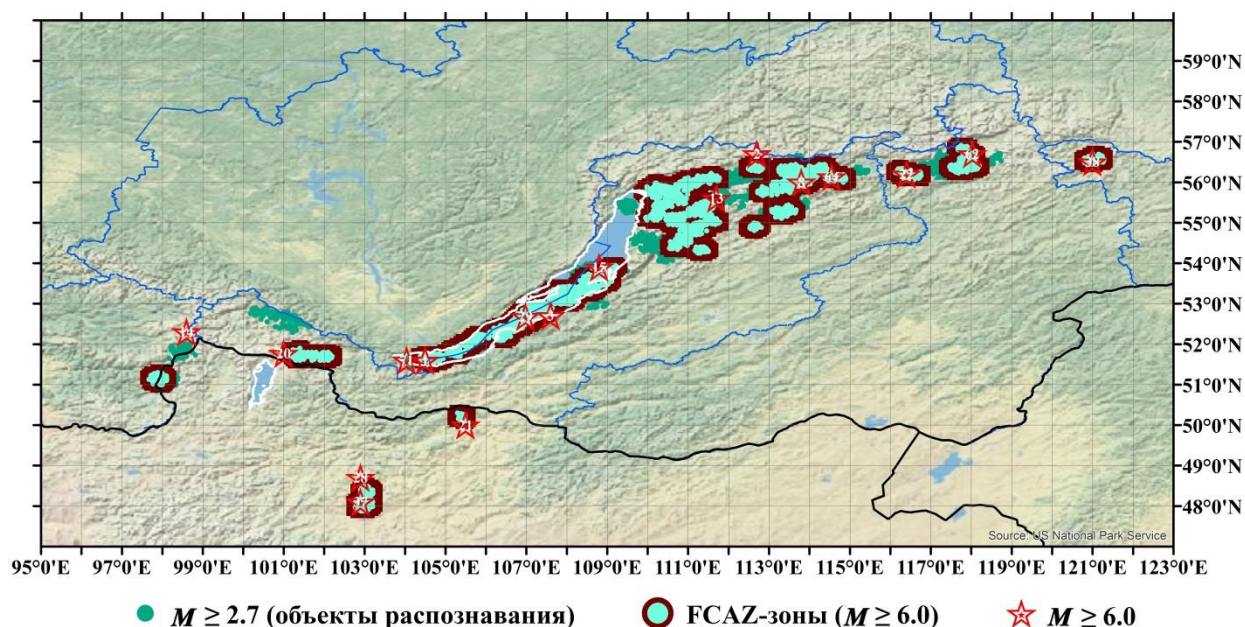


Рис. 5.17. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ (табл. 5.5)

Распознанные FCAZ-зоны хорошо согласуются с эпицентрами сильных землетрясений с $M \geq 6.0$ (рис. 5.17). Из 17 рассматриваемых землетрясений с $M \geq 6.0$ (табл. 5.5) эпицентры только двух (11.7%) находятся вне зон FCAZ. При этом, первый (№ 14 в табл. 5.5) – эпицентр землетрясения 1939 г. с $M = 6.0 \pm 0.3$ [170], произошедшего задолго до начала инструментальных наблюдений в регионе; второй (№ 71 в табл. 5.5) – 2008 г. с $M = 6.3$, находится на расстоянии порядка 0.15° от FCAZ-зон. Согласованность результатов распознавания и эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ позволяет интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье.

Наилучшим обоснованием достоверности результатов распознавания высокосейсмичных FCAZ-зон является анализ их согласованности с эпицентрами землетрясений, произошедших после окончания используемого для распознавания каталога. Напомним, что используемый объединенный каталог охватывает период 1962 – 2010 гг. [147, 148]. После 2010 г. в исследуемом регионе Прибайкалье-Забайкалье произошло три землетрясения $M \geq 5.5$. Эпицентры двух из них находятся строго внутри FCAZ-зон соответствующих их магнитудам.

5.6. Обсуждение

В настоящей Главе диссертационной работы приведены результаты FCAZ-распознавания мест возможного возникновения землетрясений в Калифорнии, в регионах Алтай-Саяны и Прибайкалье-Забайкалье, на Кавказе, а также на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа. Приведенные результаты говорят о высокой достоверности интерпретации FCAZ-зон как мест возможного возникновения землетрясений. Метод FCAZ позволяет эффективно распознавать места будущих сильных и значительных землетрясений исключительно по сейсмологическим данным.

В пользу достоверности результата, полученного для Крымского

полуострова и северо-запада Кавказа говорят и геолого-геофизические факты. Отмечается, что тектоническое строение Крым-Кавказского сегмента альпийского складчатого пояса усложнено процессами активного опускания Черноморской впадины. Это подтверждается современными геологическими исследованиями [21]. В свою очередь подобная тектоническая активность нашла своё отражение и в диссертационной работе. Действительно, три крупнейшие распознанные опасные FCAZ-зоны располагаются по активной границе континентального склона Черного моря. На юго-восточной границе Крыма FCAZ-зоны захватывают Ялту и Алушту, в юго-западной части Таманского полуострова включают прилегающую акваторию Черного моря, курортные города Сочи и Туапсе и большую часть побережья Абхазии (рис. 5.14).

Описываемый здесь Крым-Кавказский регион является первым регионом для которого распознанные FCAZ-зоны интерпретировались для двух различных порогов значительных землетрясений: $M_0 = 4.5$ и $M_0 = 5.0$. Иными словами, в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений была допущена вариация порога магнитуды M_0 . Варьирование пороговой магнитуды M_0 в рамках одной задачи ранее не проводилось ни при кластеризации методом FCAZ, ни при распознавании методом ЕРА.

Попытка перехода в Крым-Кавказском сегменте альпийского складчатого пояса от $M_0 = 4.5$ к $M_0 = 5.0$ оказалась весьма интересной. Распознанные 2D FCAZ-зоны (рис. 5.14) с близкой степенью достоверности могут интерпретироваться как области возможного возникновения значительных землетрясений для обоих порогов: $M_0 = 4.5$ и $M_0 = 5.0$.

Новизна полученного результата для региона Прибайкалье-Забайкалье базируется на идее многократного применения алгоритмической системы FCAZ к последовательно сужаемому путем топологической фильтрации множеству эпицентров достаточно слабых землетрясений в регионе. В результате был построен новый индукционный алгоритм последовательного распознавания в регионе мест возможного возникновения землетрясений –

SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning). Возможность последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений в других регионах, где ранее применялась система FCAZ, на сегодняшний день остается открытой.

В рассматриваемых в настоящей Главе регионах после окончания используемых для распознавания инструментальных каталогов землетрясений произошел целый ряд сейсмических событий с $M \geq M_0$. Эти события позволили провести чистый экзамен для FCAZ-распознавания. Суммарное количество таких землетрясений – 22. Отметим, что 19 (86.3%) из них расположены строго внутри высокосейсмичных зон, распознанных системой FCAZ. Таким образом, результат чистого экзамена следует признать успешным.

Отдельно необходимо отметить землетрясение с $M = 7.1$, произошедшее 6 июля 2019 г. в Калифорнии (белая звезда на рис. 5.3). Эпицентр этого землетрясения расположен внутри FCAZ-зон на территории, где ранее сильные ($M \geq 6.5$) землетрясения не происходили. Подчеркнем, что этот эпицентр расположен вне зон, распознанных для магнитуды $M \geq 6.5$ методом ERA с использованием алгоритмов «Кора-3» и «Подклассы» [98, 206, 252] (подробнее об этом будет сказано в Главе 6).

5.7. Выводы

- Приведены результаты FCAZ-распознавания мест возможного возникновения землетрясений в Калифорнии ($M \geq 6.5$), в регионах Алтай-Саяны ($M \geq 5.5$) и Прибайкалье-Забайкалье ($M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$), на Кавказе ($M \geq 5.0$), а также на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа ($M \geq 4.5$). Полученные результаты говорят о высокой достоверности интерпретации FCAZ-зон как мест возможного возникновения сильных и значительных землетрясений.

- В рассмотренных в Главе регионах после окончания используемых для

распознавания инструментальных каталогов произошло 22 землетрясения с $M \geq M_0$. Эпицентры 19 (86.3%) из них расположены строго внутри распознанных FCAZ-зон. Таким образом результаты чистого экзамена являются дополнительным аргументом в пользу достоверности результатов FCAZ-распознавания.

- Применение нового метода распознавания SFCAZ позволило получить в регионе Прибайкалье-Забайкалье цепочку высокосейсмичных ($M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$, $M \geq 6.0$) зон в которой зоны для большей пороговой магнитуды вложены в соответствующие зоны для меньшей.
- Картированные высокосейсмичные зоны включены в базу данных цифровых карт мест возможного возникновения землетрясений.

ГЛАВА 6. ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЯ

6.1. Контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история»

Землетрясения, происходящие в изученных методом FCAZ регионах после окончания используемых для распознавания инструментальных каталогов, позволяют провести чистый экзамен для FCAZ-распознавания (см. Главы 4 – 5). Заметим, что одновременно с чистым экзаменом или при его отсутствии оценка достоверности результатов распознавания потенциальных высокосейсмичных зон осуществляется контрольными экспериментами [71]. Если доступны данные, эффективным является и построение математических моделей необходимых условий в рамках теории динамических и предельных задач распознавания [65].

При распознавании методом FCAZ проводится два типа контрольных вычислительных экспериментов: «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» [71, 126].

В эксперименте «индивидуальная сейсмическая история» FCAZ-зоны распознаются 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, для которого эти зоны были определены [71, 126].

В эксперименте «полная сейсмическая история» из используемого каталога землетрясений исключаются эпицентры с $M \geq M_R$ за некоторое количество последних лет, в течение которых происходили сейсмические события с $M \geq M_0$. После этого FCAZ-зоны распознаются по результатам DPS-кластеризации оставшихся в каталоге эпицентров. Эксперимент

завершается анализом расположения эпицентров землетрясений с $M \geq M_0$ из отброшенной части каталога относительно распознанных зон [71, 126].

Следует отметить, что при проведении вычислительных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» с целью повышения их объективности в качестве значений свободных параметров ($q, \beta, \delta, C, \omega, \nu$) системы FCAZ (тем самым алгоритмов DPS и E²ХТ) берутся те же значения, что и при обработке всего каталога в основном варианте распознавания (см. Главы 4 – 5). Напомним, что значения параметров β, ω и ν в основном варианте распознавания вычисляются с помощью блоков искусственного интеллекта (см. п. 3.3.3).

В настоящем разделе диссертационной работы приводятся результаты контрольных вычислительных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» в следующих регионах: горный пояс Анд Южной Америки, Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка, Калифорния и Кавказ. К сожалению, проведение экспериментов для Тихоокеанского побережья Курильских островов, регионов Прибайкалье-Забайкалье и Алтай-Саяны, а также Крымского полуострова и северо-запада Кавказа оказалось невозможным в силу недостаточного для этого количества объектов распознавания (эпицентров слабых землетрясений).

6.1.1. Горный пояс Анд Южной Америки

В вычислительном эксперименте «индивидуальная сейсмическая история» FCAZ-зоны были распознаны по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$ только за 20 лет (примерно $\frac{1}{3}$ продолжительности используемого каталога землетрясений за период 1963 – 2013 гг., см. п. 4.1.1) перед сильнейшими (с магнитудой $M \geq 7.75$) землетрясениями горного пояса Анд Южной Америки. В работе рассматривается 24 землетрясения с $M \geq 7.75$ (табл. 4.1 в Главе 4). Немалая

часть из них произошла задолго до начала активных инструментальных наблюдений за сейсмичностью региона.

Для того, чтобы перед подлежащими эксперименту событиями имелась полноценная 20-летняя история сейсмологических наблюдений в эксперименте рассматривались только сильнейшие землетрясения, начиная с 1985 года. Тем самым, эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» в горном поясе Анд Южной Америки ограничивается 5-ю землетрясениями с $M \geq 7.75$ с номерами № 20 – 24 (табл. 4.1). Эксперимент не проводился для землетрясений, произошедших в 2014, 2015 и 2016 годах (см. п. 4.1.2. и рис. 4.3), т.к. они не рассматривались в основном варианте распознавания и произошли вне временного периода, охватываемого используемым при распознавании инструментальным каталогом.

Для каждого из выбранных пяти сильнейших землетрясений (№ 20 – 24 в табл. 4.1) в каталоге было выделено соответствующее подмножество землетрясений с $M \geq 4.5$ за 20 предшествующих лет. К полученным таким образом подмножествам объектов распознавания были последовательно применены алгоритмы DPS и E²XТ.

Для объективности вычислительного эксперимента во всех пяти вариантах были взяты те же значения свободных параметров, что и при обработке всего каталога, а именно: в алгоритме DPS – $\beta_1 = 0.3$, $\beta_2 = 0.0$, $\beta_3 = 0.0$, $\beta_4 = 0.2$, $q_1 = -3.0$, $q_2 = -2.5$, $q_3 = -2.5$ и $q_4 = -3.0$; в алгоритме E²XТ – $\delta = 0.1^\circ$, $\omega = -3.75$, $\nu = -2.25$ и тип связности C_8 .

На рис. 6.1 показан результат распознавания FCAZ-зон перед землетрясением № 23 (табл. 4.1) 15 августа 2007 г. с магнитудой $M = 8.0$ в Перу у города Лима (514 погибших; 1 090 раненных; разрушено 39 700 домов). На рис. 6.2 – зоны FCAZ, распознанные перед землетрясением № 24 (табл. 4.1) 27 февраля 2010 г. с $M = 8.8$ у побережья Чили (297 погибших; ранено около 12 000 человек; повреждено около 500 000 домов; ущерб оценивается в 30 млрд. долл.).

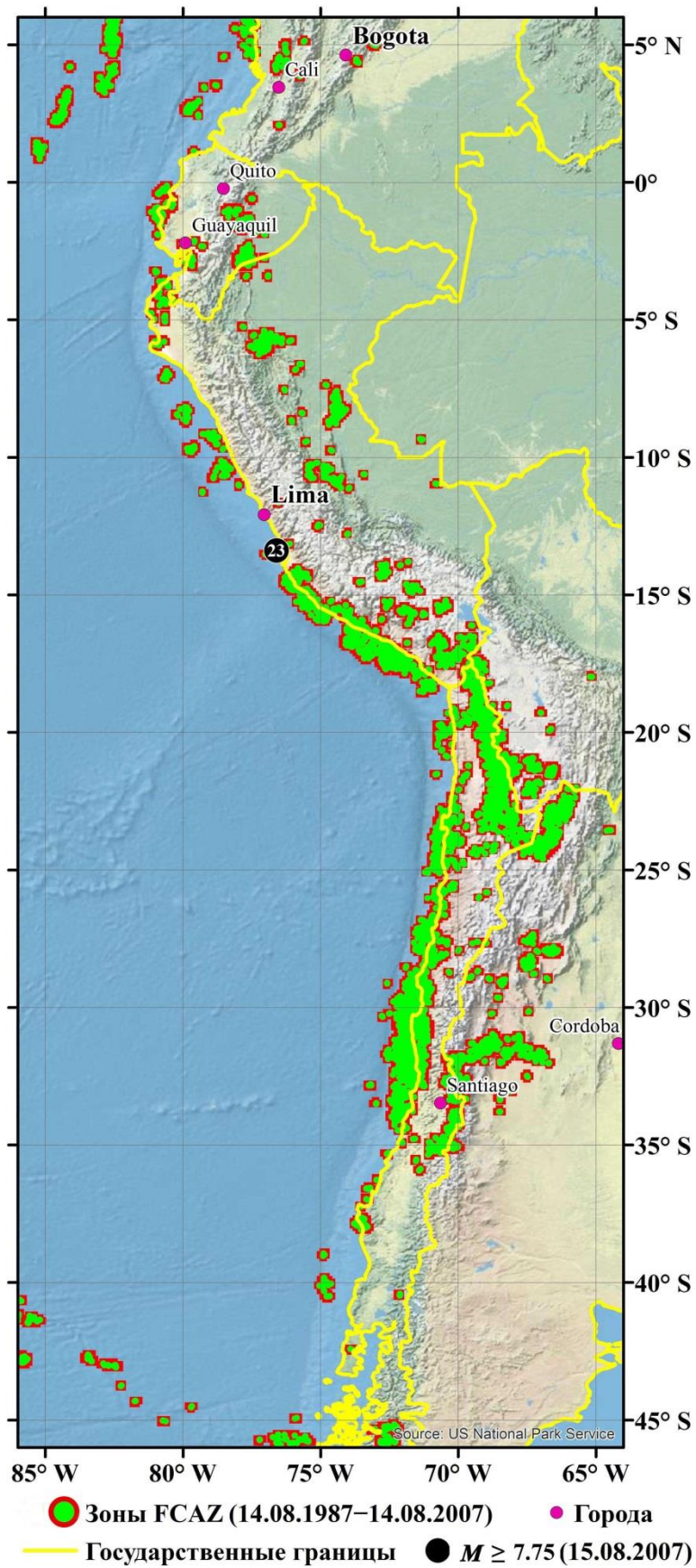


Рис. 6.1. Горный пояс Анд. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 15.08.2007 с $M = 8.0$ (Перу, № 23 в табл. 4.1)



Рис. 6.2. Горный пояс Анд. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 27.02.2010 с $M = 8.8$ (Чили, № 24 в табл. 4.1)

Из рис. 6.1 и 6.2 видно, что в горном поясе Анд пространственное распределение распознанных в соответствующих экспериментах высокосейсмичных FCAZ-зон подобно. При этом эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$, для которых проводился эксперимент, оказались внутри распознанных высокосейсмичных зон, либо на их границе (рис. 6.1 и 6.2). То же верно и для двух других землетрясений с $M \geq 7.75$, подвергнутых эксперименту (№ 20 и 22 в табл. 4.1).

Единственное исключение составляет эпицентр землетрясения с $M = 8.4$, произошедшего 30 июля 1995 г. (№ 21 в табл. 4.1) в Чили. Его эпицентр располагается на незначительном отдалении от распознанных в результате эксперимента FCAZ-зон. Этот «пропуск цели» можно объяснить тем, что в окрестности эпицентра этого землетрясения находится слишком мало известных эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$. Не имеем достаточно объектов, чтобы сформировалась FCAZ-зона.

Сравнение пространственного расположения FCAZ-зон основного результата распознавания (рис. 4.3) с результатами пяти контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» (рис. 6.1 и 6.2) показывает их близость. Это обстоятельство дает весомый аргумент в пользу устойчивости основного варианта распознавания.

В контрольном вычислительном эксперименте «полная сейсмическая история» из используемого инструментального каталога были исключены эпицентры за 13 последних лет. После этого были построены FCAZ-зоны на базе распознавания по каталогу за 1963 – 2000 гг. При этом использовались те же значения свободных параметров алгоритмов DPS и E²XT, что и при обработке всего каталога в основном варианте распознавания. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$ (начиная с 2001 г.) относительно распознанных зон (рис. 6.3).

Сравнение основного результата распознавания (рис. 4.3) и FCAZ-зон «полной сейсмической истории» (рис. 6.3) показывает, что они подобны.

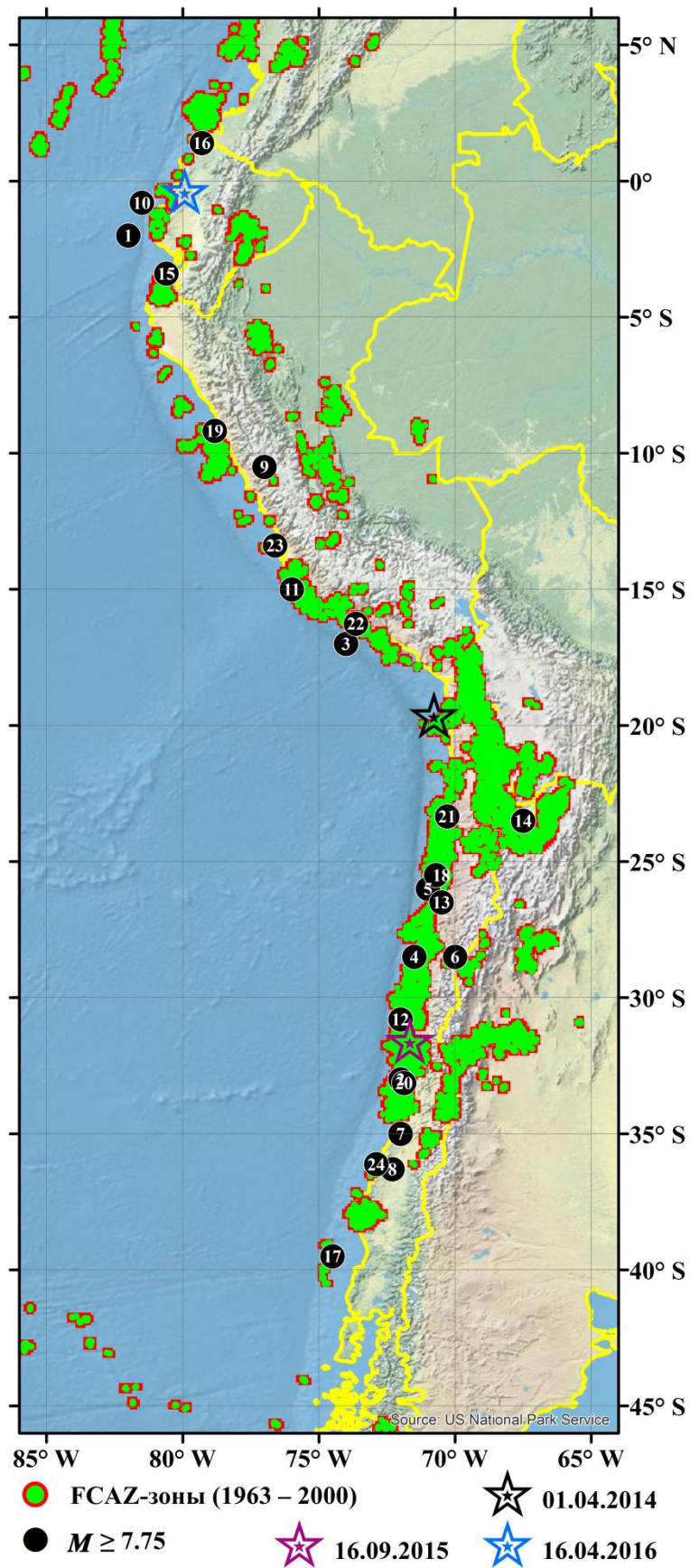


Рис. 6.3. Горный пояс Анд. Вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1963 – 2000 гг.) и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$

В горном поясе Анд Южной Америки, после 2000 г., произошло 6 землетрясений с $M \geq 7.75$. Все три эпицентра из табл. 4.1 (№ 22 – 24) находятся внутри распознанных в результате эксперимента FCAZ-зон, хотя информация о них никак не использовалась при распознавании. Эпицентры землетрясений, произошедших до 2000 г., находятся внутри распознанных зон или в непосредственной близости от их границ (большая часть последних в акватории океана). Исключение составляет все тот же эпицентр № 9 (табл. 4.1) вблизи города Лима, являющийся «пропуском цели» и в основном варианте распознавания. Этот «пропуск цели» может быть связан с объективной причиной слишком малой продолжительности имеющегося в распоряжении каталога землетрясений.

Отметим, что два из трех эпицентров землетрясений, произошедших после окончания используемого каталога и составляющих материал чистого экзамена в основном варианте распознавания, также находятся внутри FCAZ-зон, распознанных в эксперименте «полная сейсмическая история» (рис. 6.3). На некотором отдалении от распознанных зон находится эпицентр землетрясения 16.04.2016 (рис. 6.3).

Таким образом, результаты контрольных вычислительных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» следует признать успешными. Они говорят в пользу достоверности интерпретации распознанных FCAZ-зон как мест возможного возникновения сильнейших землетрясений в горном поясе Анд Южной Америки [71].

6.1.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка

Так как на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка за последние десятилетия произошло только одно сильнейшее землетрясение с $M \geq 7.75$, то вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» становятся, по сути, взаимно

заменяющими. По этой причине на Камчатке был проведен только эксперимент «полная сейсмическая история».

Из используемого инструментального каталога землетрясений были исключены эпицентры за последние 25 лет. После чего построены FCAZ-зоны по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 3.5$ за 1962 – 1990 гг. При этом использовались те же значения свободных параметров алгоритмов DPS и E²XТ, что и при обработке всего каталога в основном варианте распознавания (п. 4.2, рис. 4.6) [126]. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентра землетрясения, произошедшего 5 декабря 1997 г. с $M = 7.8$ (№ 8 в табл. 4.2). Распознанные FCAZ-зоны «полной сейсмической истории» показаны на рис. 6.4.

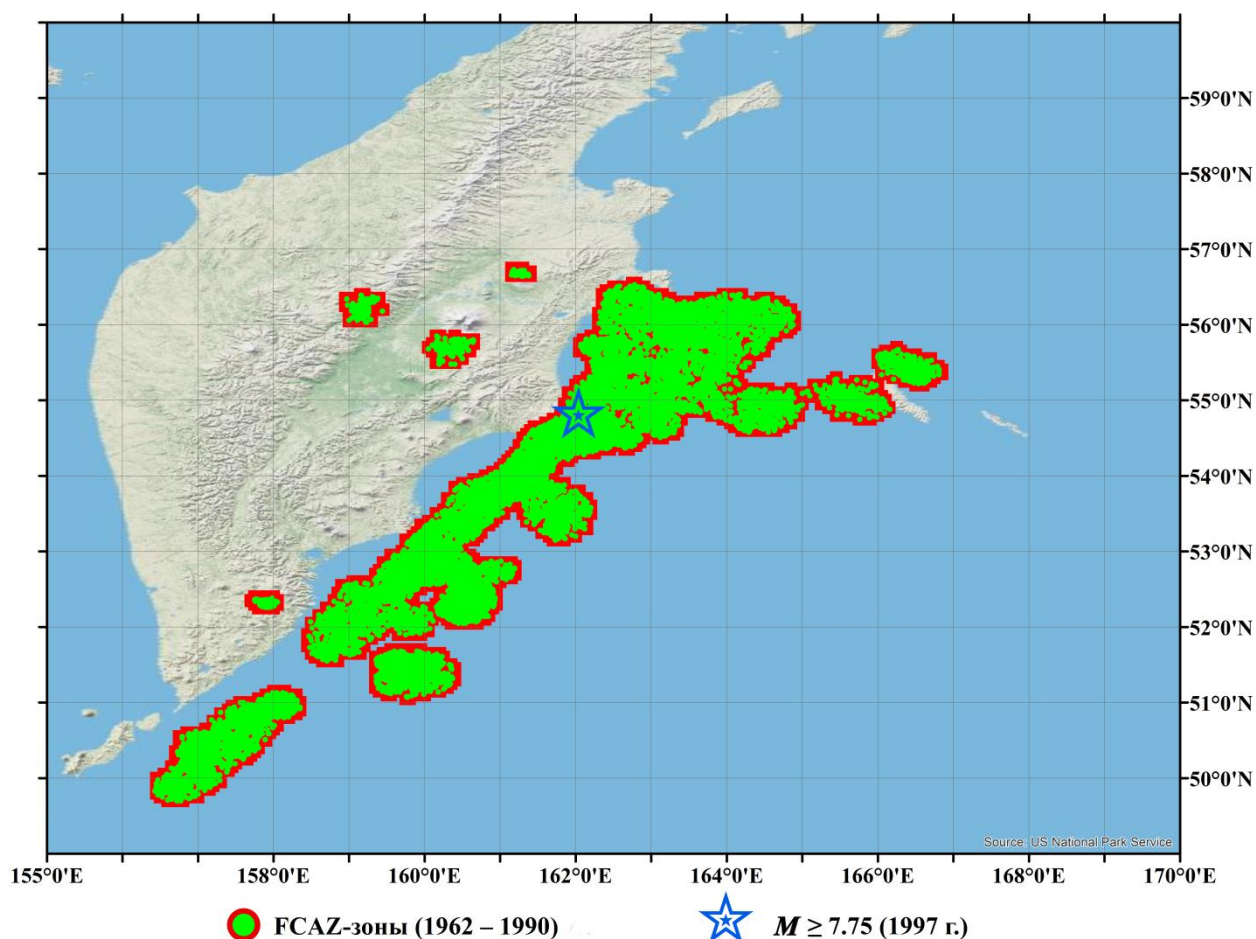


Рис. 6.4. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка. Вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1962 – 1990 гг.) и эпицентр землетрясения 05.12.1997 с $M = 7.8$ (табл. 4.2)

Сравнение основного результата распознавания (рис. 4.6) и FCAZ-зон «полной сейсмической истории» (рис. 6.4) показывает, что они подобны. Эпицентр землетрясения 1997 г. находится внутри распознанных в результате эксперимента FCAZ-зон, хотя информация о нем никак не использовалась при распознавании. То есть в распознанные зоны попал эпицентр землетрясения, произошедшего спустя 7 лет после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения с $M \geq 3.5$).

Таким образом, результат контрольного эксперимента следует признать успешным. Он говорит в пользу достоверности интерпретации распознанных FCAZ-зон как мест возможного возникновения сильнейших ($M \geq 7.75$) землетрясений на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка [126].

6.1.3. Калифорния

Для обоснования достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии были проведены контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история» [128].

Для того, чтобы перед подлежащими эксперименту «индивидуальная сейсмическая история» сильными ($M \geq 6.5$) событиями имелась полноценная 20-летняя история сейсмологических наблюдений (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$) было принято решение подвергнуть эксперименту сильные землетрясения начиная с 1990 г.: 9 землетрясений с $M \geq 6.5$ (№ 23(24) – 30, 32, 33 из табл. 5.1). Заметим, что землетрясения № 23 и № 24 (табл. 5.1) рассматривались в эксперименте как одно событие, а землетрясение № 31 не рассматривалось в силу его расположения в акватории Тихого океана на значительном отдалении от побережья Калифорнии.

При распознавании в эксперименте использовался единый для всех 9 случаев набор значений свободных параметров. Были взяты те же значения, что и в основном варианте распознавания (п. 5.1, рис. 5.3). На рис. 6.5 и 6.6

показаны, соответственно, FCAZ-зоны перед землетрясениями № 23(24) 25(26) апреля 1992 г. с $M = 6.7$ ($M = 6.6$) и № 30 22 декабря 2003 г. с $M = 6.5$.

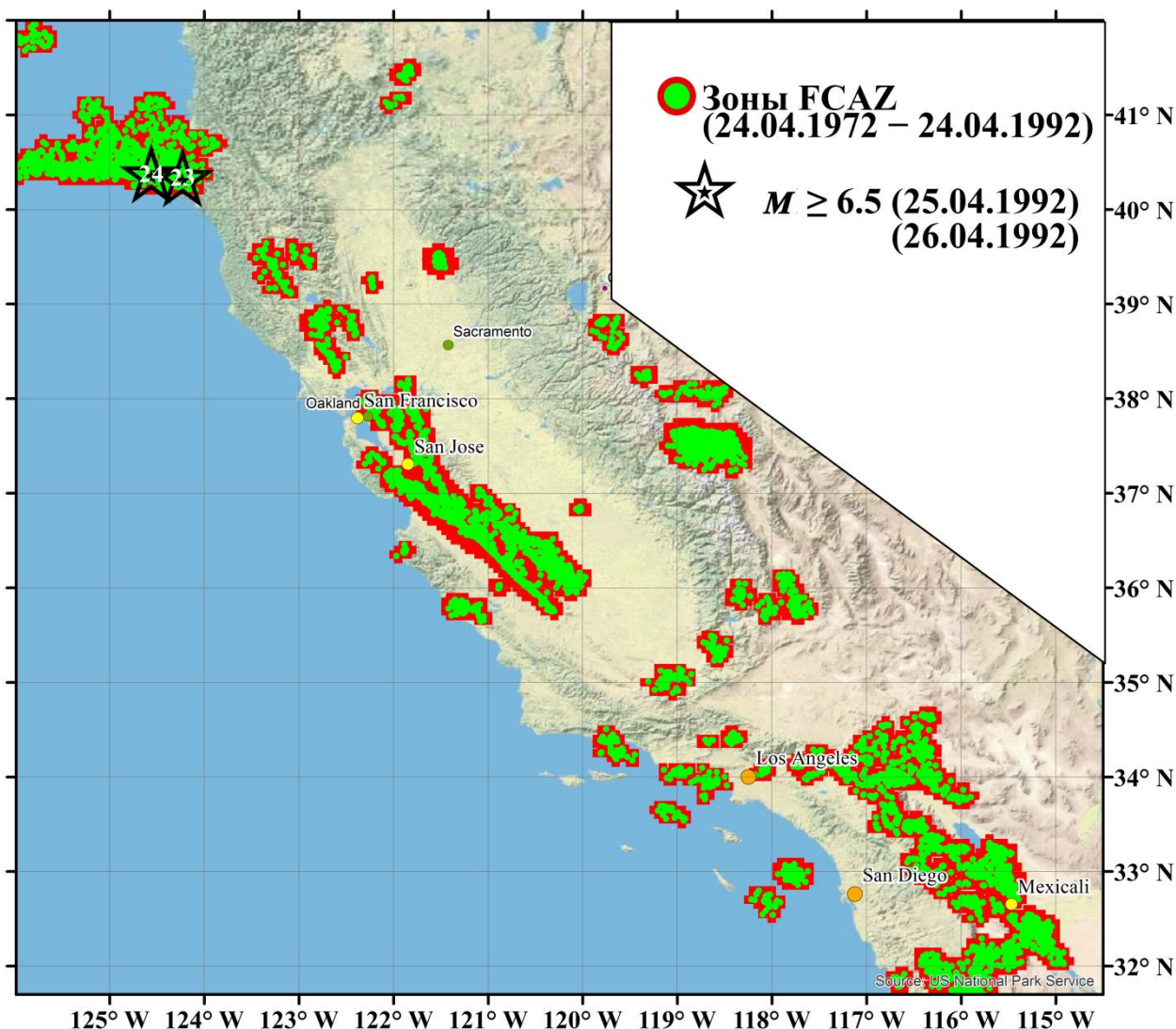


Рис. 6.5. Калифорния. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 25.04.1992 с $M = 6.7$ (26.04.1992 с $M = 6.6$), № 23(24) в табл. 5.1

Результаты экспериментов показали, что в Калифорнии пространственное расположение распознанных в девяти контрольных экспериментах «индивидуальная сейсмическая история» высокосейсмичных FCAZ-зон, хотя и различно, но подобно. При этом эпицентры подвергнутых эксперименту землетрясений с $M \geq 6.5$ расположены внутри FCAZ-зон, либо на их границах. Сравнение основного результата распознавания в

Калифорнии (рис. 5.3) и результатов 9 контрольных экспериментов (рис. 6.5 и 6.6) показало их схожесть. Это обстоятельство дает существенный аргумент в пользу достоверности FCAZ-распознавания как варианта определения мест возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии [128].

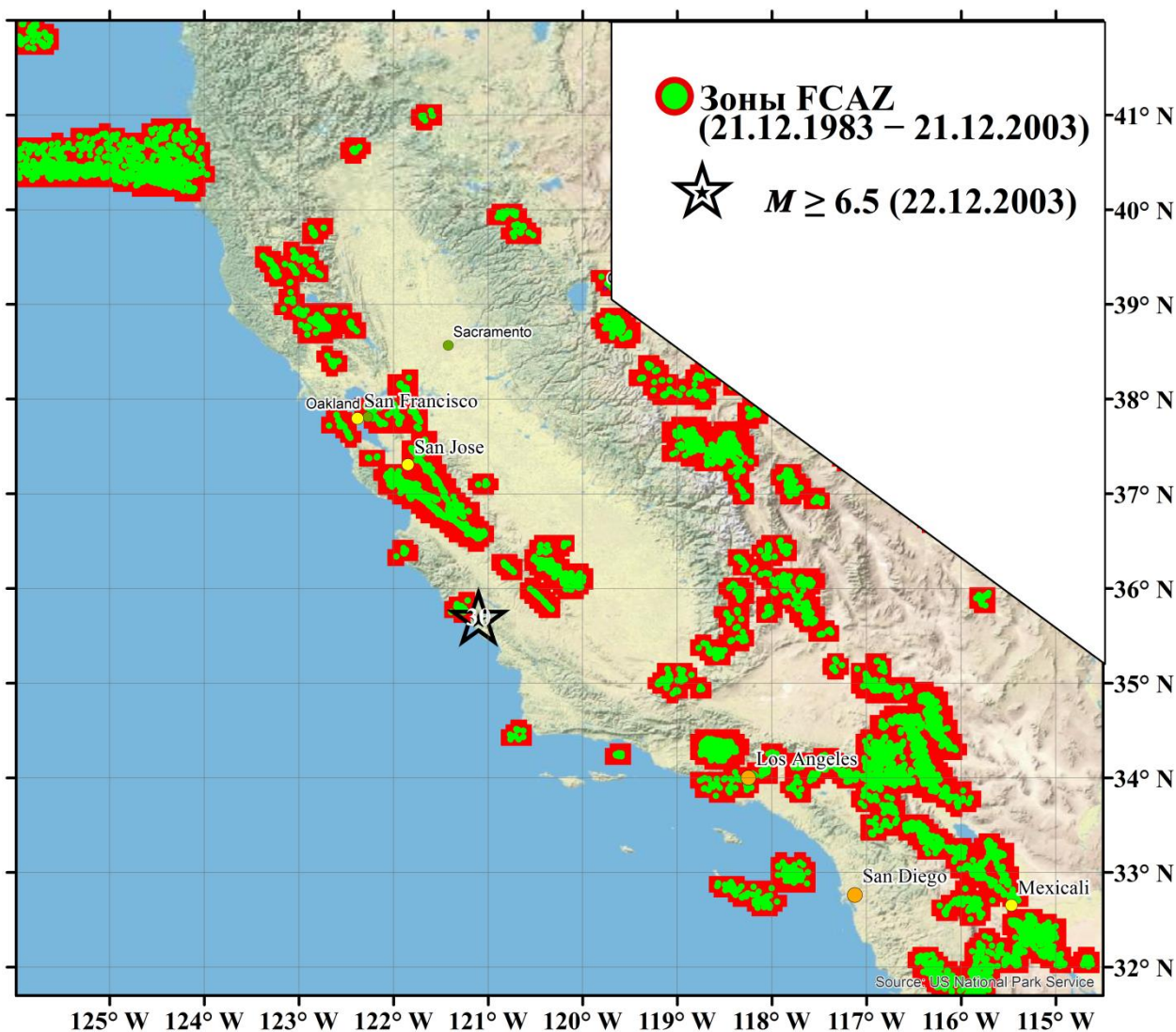


Рис. 6.6. Калифорния. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 22.12.2003 с $M = 6.5$ (№ 30 в табл. 5.1)

В Калифорнии было выполнено два эксперимента «полная сейсмическая история». В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$ за следующие временные периоды: 1960 – 1990 гг.

(рис. 6.7) и 1960 – 2000 гг. (рис. 6.8).

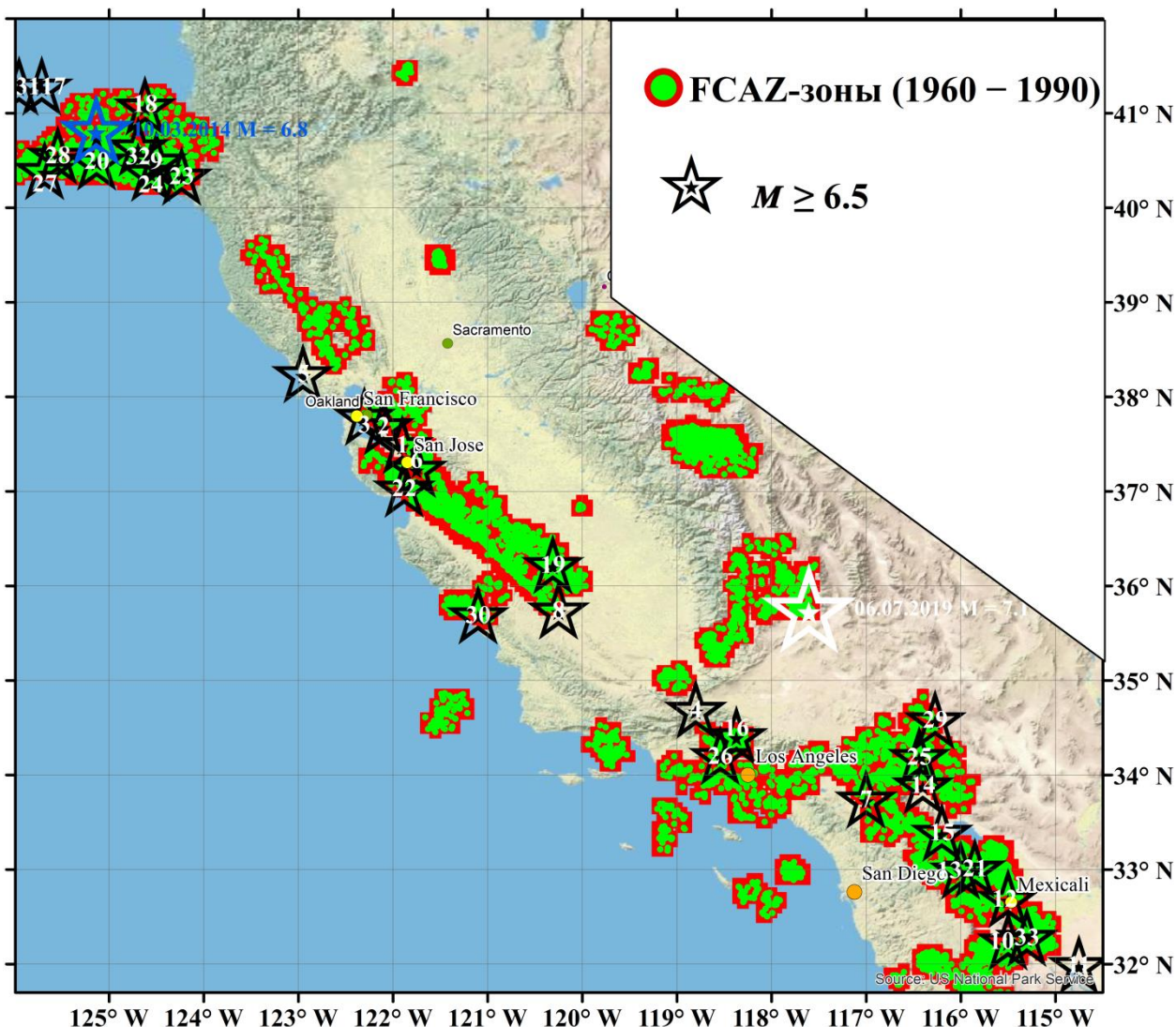


Рис. 6.7. Калифорния. Вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1960 – 1990 гг.) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$

Сравнение основного результата распознавания в Калифорнии (рис. 5.3) и полученных в эксперименте «полная сейсмическая история» FCAZ-зон (рис. 6.7 и 6.8) показало подобность их пространственного расположения. В Калифорнии после 1990 г. и 2000 г. произошло, соответственно, 13 и 6 землетрясений с $M \geq 6.5$. За исключением расположенного в акватории Тихого Океана на большом расстоянии от побережья Калифорнии эпицентра землетрясения 15 июня 2005 г. (№ 31 в табл. 5.1) эпицентры всех землетрясений, произошедших после 1990 г. и 2000 г., находятся внутри

соответствующих зон FCAZ, хотя информация о них никак не использовалась при распознавании.

Отметим, что эпицентры землетрясений, произошедших в 2014 и в 2019 годах после окончания используемого при распознавании инструментального каталога, располагаются внутри FCAZ-зон как на рис. 6.7, так и на рис. 6.8. То есть, внутри распознанных FCAZ-зон находятся эпицентры землетрясений, произошедших спустя годы (в частности, спустя 10 – 25 лет) после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения с $M \geq 3.0$).

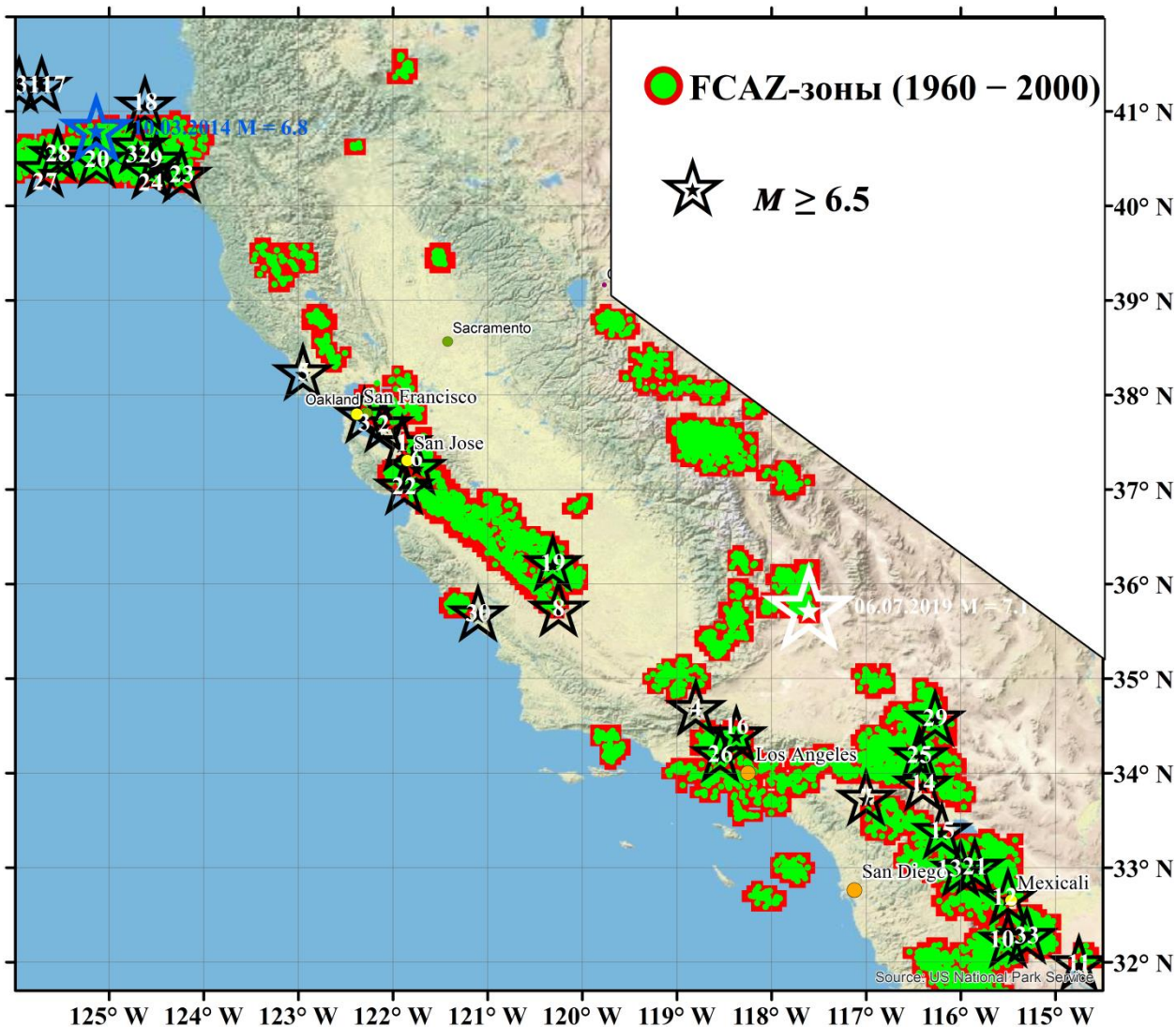


Рис. 6.8. Калифорния. Вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1960 – 2000 гг.) и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$

Согласованность эпицентров землетрясений, произошедших до 1990 г. и 2000 г., с пространственным расположением соответствующих FCAZ-зон не уступает их согласованности с FCAZ-зонами из основного варианта распознавания (рис. 5.3).

6.1.4. Кавказ

На Кавказе в рамках контрольного вычислительного эксперимента «индивидуальная сейсмическая история» распознаны зоны FCAZ используя объекты (эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$) только за 20 лет перед значительными землетрясениями с $M \geq 5.0$ (табл. 5.3), начиная с 1991 года. Тем самым была обеспечена ситуация, когда перед подлежащими эксперименту землетрясениями имеется полноценная 20-летняя история сейсмологических наблюдений, отраженная в каталоге землетрясений [71].

Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» был проведен для землетрясений с $M \geq 5.0$ с номерами № 94 – 113 (табл. 5.3). Отметим, что землетрясения № 94 – 99 рассматривались в эксперименте как одно событие. Тем самым эксперимент проводился для 15-ти землетрясений. Для каждого из них был сформирован подкаталог землетрясений с $M \geq 3.0$ за 20 предшествующих ему лет.

К каждому такому подкаталогу были последовательно применены алгоритмы DPS и E²XТ с едиными для всех 15 случаев значениями свободных параметров. Взяты те же их значения, что и при обработке всего каталога (п. 5.3), а именно: в алгоритме DPS – $\beta_1 = 0.1$, $\beta_2 = 0.0$, $\beta_3 = 0.1$, $\beta_4 = 0.1$ и $\beta_5 = 0.2$, $q_1 = -3.0$, $q_2 = -3.0$, $q_3 = -3.5$, $q_4 = -3.5$ и $q_5 = -4.0$; в алгоритме E²XТ – $\delta = 0.05^\circ$, $\omega = -4.25$, $\nu = -3.75$ и тип связности C₈.

На рис. 6.9 и 6.10, в качестве примера, приведены результаты эксперимента «индивидуальная сейсмическая история», соответственно, для землетрясений № 100 и № 113 (табл. 5.3).

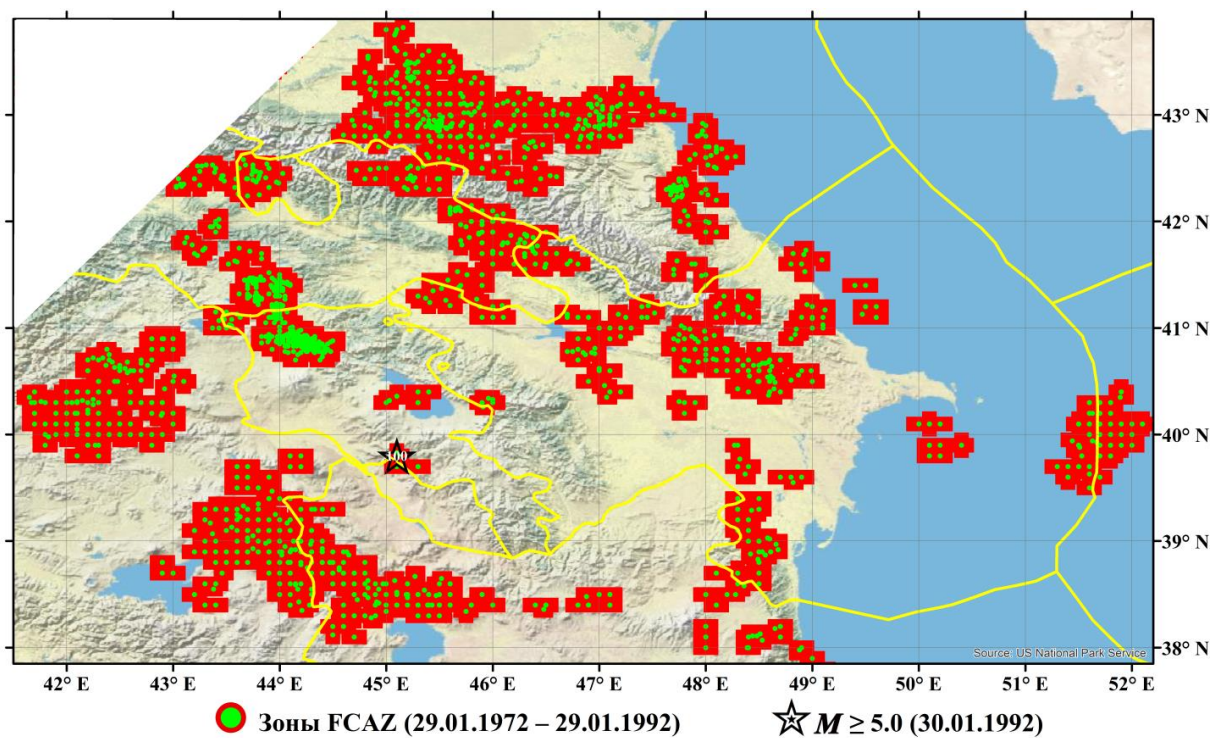


Рис. 6.9. Кавказ. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 30.01.1992 с $M = 5.0$ (№ 100 в табл. 5.3)

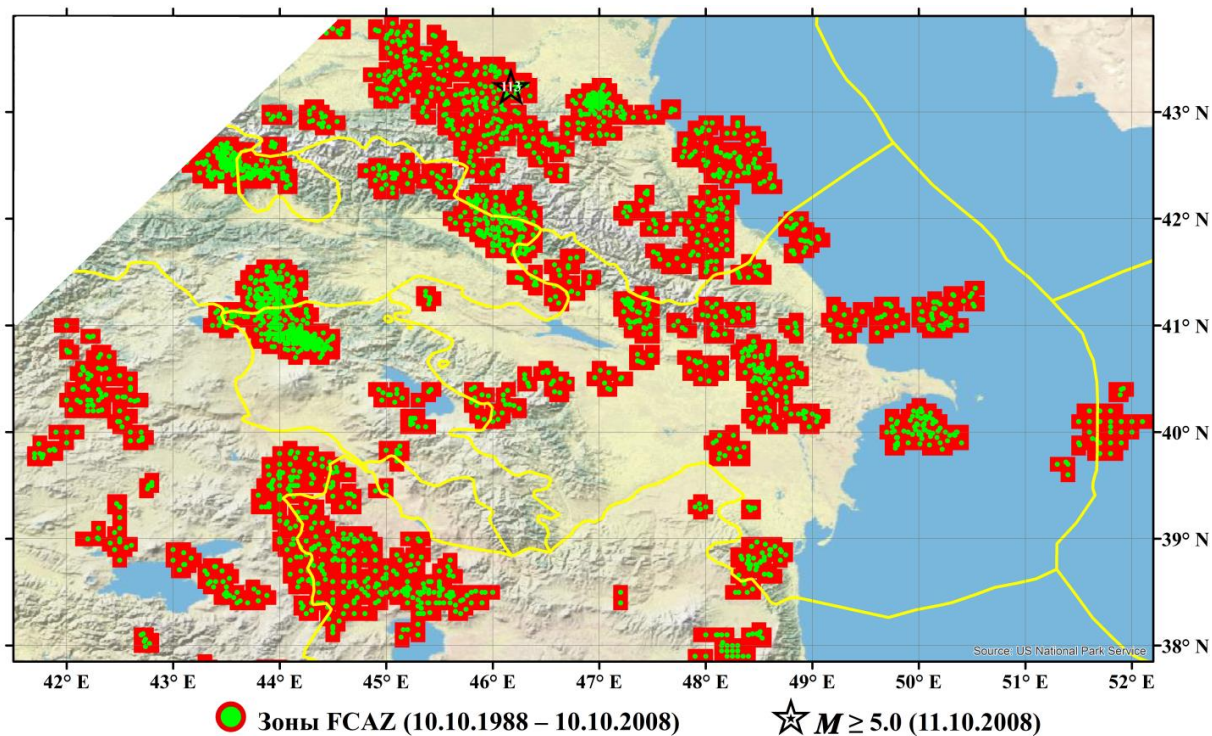


Рис. 6.10. Кавказ. Вычислительный эксперимент «индивидуальная сейсмическая история» для землетрясения 11.10.2008 с $M = 5.7$ (№ 113 в табл. 5.3)

На рис. 6.9 показан результат распознавания высокосейсмичных зон перед землетрясением 30 января 1992 г. с $M = 5.0$ в Армении. На рис. 6.10 – зоны, распознанные перед землетрясением 11 октября 2008 г. с $M = 5.7$ в Шелковском районе Чеченской Республики (согласно данным Правительственной комиссии, погибли 13 человек, 105 человек получили ранения и травмы различной степени тяжести, было повреждено 10 614 различных объектов и зданий). Как видно из рисунков, оба эксперимента удачны, т.к. эпицентры землетрясений № 100 и № 113 (табл. 5.3) находятся строго внутри FCAZ-зон, распознанных на базе соответствующих 20-летних подкаталогов.

Из общего анализа результатов 15-ти вычислительных контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» (в частности, из рис. 6.9 и 6.10) следует, что пространственное расположение FCAZ-зон на Кавказе, распознанных на базе различных 20-летних субкаталогов, подобно. Следует заметить, что эпицентры практически всех значительных землетрясений, для которых проводился эксперимент, оказались внутри соответствующих FCAZ-зон, либо на их границах (в трех случаях). Единственное исключение составляет событие, произошедшее 27 ноября 1997 г. с $M = 5.0$ (№ 105 в табл. 5.3, рис. 5.10) в Грузии. Его эпицентр находится восточнее Тбилиси и располагается на некотором отдалении от распознанных для него высокосейсмичных зон (≈ 35 км) [71].

Из сравнения на Кавказе основного результата распознавания методом FCAZ (рис. 5.10) и результатов 15-ти контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» (рис. 6.9 и 6.10) можно заключить, что они близки. Это является дополнительным серьезным аргументом в пользу достоверности полученного FCAZ-распознавания мест возможного возникновения значительных землетрясений с $M \geq 5.0$ на Кавказе.

В рамках эксперимента «полная сейсмическая история» построены FCAZ-зоны по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 3.0$ за 1962 – 2000 гг. Проведен анализ их согласованности с

эпицентрами землетрясений с $M \geq 5.0$, произошедших начиная с 2001 г.

При проведении эксперимента использовались значения свободных параметров, вычисленные блоками искусственного интеллекта алгоритмов DPS и E²ХТ в основном варианте распознавания (п. 5.3). На рис. 6.11 показаны распознанные FCAZ-зоны «полной сейсмической истории». Они очевидно подобны зонам, полученным в основном варианте распознавания (рис. 5.10).

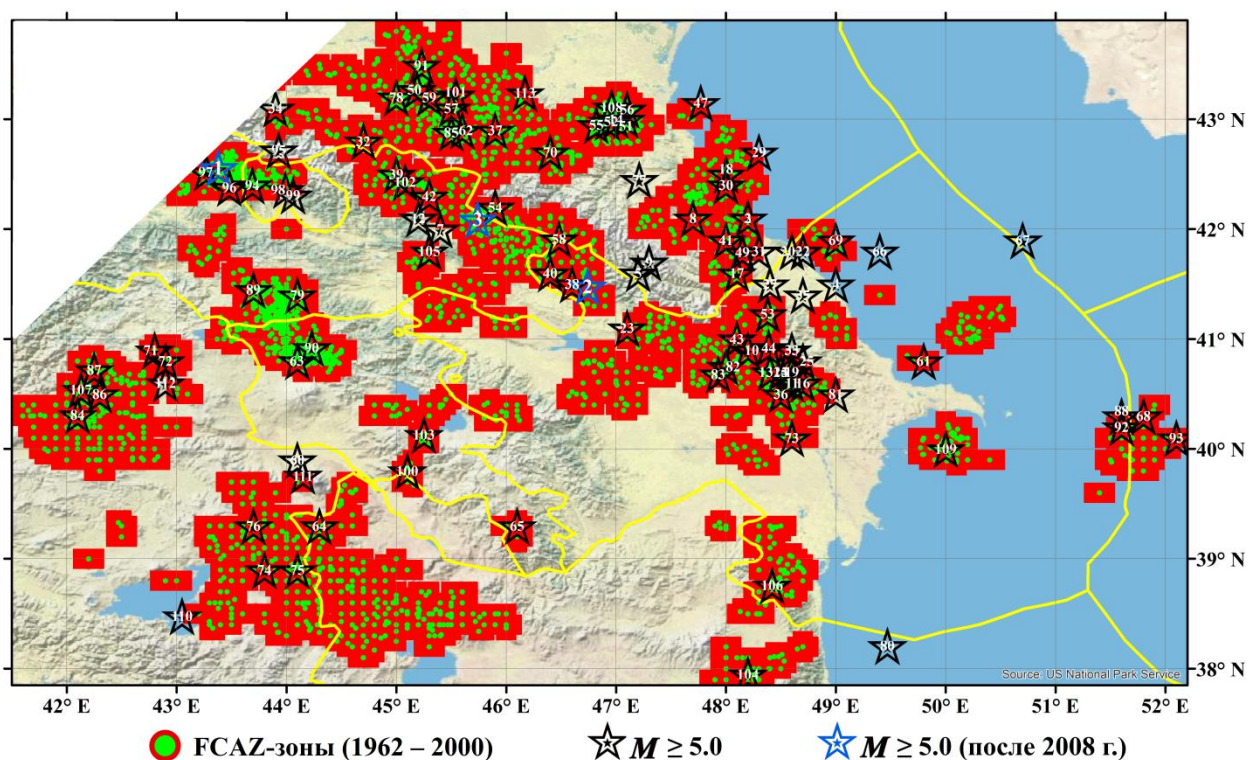


Рис. 6.11. Кавказ. Вычислительный эксперимент «полная сейсмическая история» (1962 – 2000 гг.) и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$

В рассматриваемом регионе Кавказа после 2000 г. произошло 7 землетрясений с $M \geq 5.0$. Их эпицентры находятся строго внутри зон «полной сейсмической истории», хотя информация о них никак не использовалась при распознавании в контрольном эксперименте. Эпицентры значительных землетрясений, произошедших до 2000 г. также хорошо согласуются с распознанными зонами. Исключение составляют лишь эпицентры, расположенные в акватории Каспийского моря или возникшие задолго до

начала сейсмологических наблюдений в регионе. Отметим, что эпицентры землетрясений, произошедших после окончания инструментального каталога, используемого при распознавании (см. п. 5.3), также находятся внутри распознанных в эксперименте FCAZ-зон [71].

Из рис. 6.11 видно, что внутри FCAZ-зон «полной сейсмической истории» находятся эпицентры землетрясений произошедших спустя годы после даты возникновения последнего объекта распознавания.

6.2. Сопоставление с результатами распознавая методом ERA

В данном разделе диссертационной работы приводятся результаты сравнения мест возможного возникновения землетрясений, определенных методом FCAZ, с высокосейсмичными зонами, распознанными методом ERA. Сравнение проводилось в горном поясе Анд Южной Америки, на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка, в Калифорнии и на Кавказе. В других рассматриваемых в диссертации (Главы 4 – 5) регионах сравнение не проводилось, т.к. в них FCAZ-зоны и зоны ERA были распознаны для разных магнитудных порогов M_0 .

6.2.1. Горный пояс Анд Южной Америки

В 1982 году А.Д. Гвишиани, Ал.Ан. Соловьев и М.П. Жидков опубликовали результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки [79]. Распознавание было выполнено по методике ERA [62, 96, 206] на базе морфоструктурного районирования [14] с использованием алгоритма дихотомии «Кора-3» [30]. В качестве объектов распознавания использовались пересечения морфоструктурных линеаментов.

Тридцать два года спустя в [206] был выполнен апостериорный анализ результатов [79]. Отметим, что в [79] рассматривался регион меньший по

площади, по сравнению с изучаемым в диссертационной работе, и находящийся в непосредственной близости от зоны субдукции. Естественно, что сравнение FCAZ и ERA результатов проводилось для пересечения регионов.

На рис. 6.12 показаны ERA-зоны в горном поясе Анд Южной Америки [79], оцифрованные в [206]. Согласно методике ERA, распознанные высокосейсмичные зоны интерпретируются как круги некоторого радиуса с центром в пересечении линеаментов, классифицированном алгоритмом дихотомии как высокосейсмичное. Радиус круга является, вообще говоря, свободным параметром метода ERA. Как правило, он выбирается пропорционально порогу магнитуды M_0 . Для горного пояса Анд были использованы круги радиусом $R = 75$ км.

Распознавание в горном поясе Анд методом ERA [79] имело ряд существенных особенностей. Среди них:

а) Схема морфоструктурных линеаментов построена без полевых наблюдений, что отчасти компенсируется ее недетальным масштабом (1 : 7.5 млн.).

б) Специфика строения региона и данные о землетрясениях не позволяли визуально установить приуроченность эпицентров землетрясений к пересечениям линеаментов. Такая приуроченность была установлена А.Д. Гвишиани и Ал.Ан. Соловьевым статистическими методами в [89].

в) Поскольку землетрясения с $M \geq 7.75$ имеют очаги достигающие размеров в сотни километров, ближайшие пересечения линеаментов, в некоторых случаях, объединялись в единый объект распознавания. Таким объектам присваивались координаты геометрического центра многоугольника с вершинами в пересечениях, образующих данный объект [79].

г) При определении объектов обучения $w \in B_0$ высокосейсмичного класса расстояние от объекта распознавания до эпицентра землетрясения определялось как минимальное из расстояний от пересечений линеаментов,

образующих объект, до этого эпицентра. При этом, учитывая размеры региона и очагов землетрясений, считалось, что эпицентр приурочен к объекту если расстояние между ними не превышает 100 км.

Этими особенностями распознавания [79] можно объяснить то, что эпицентры некоторых землетрясений (табл. 4.1) не попадают в зоны ЕРА, перенесенные с помощью современных ГИС-технологий, с учетом кривизны поверхности Земли, на карту (рис. 6.12). В тоже время, этот факт снижает достоверность результатов [79] по сравнению с полученным в диссертационной работе. Это есть следствие развития геофизики, геоинформатики и системного анализа. За прошедшие годы существенно улучшилось качество данных [321], были усовершенствованы методы распознавания образов и визуализации [25].

Эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$, произошедших до опубликования [79], но не используемые для обучения алгоритма «Кора-3» (№ 18 – 19 в табл. 4.1), а также эпицентры землетрясений, произошедших после опубликования [79] (начиная с № 20 в табл. 4.1), находятся внутри ЕРА-зон, на их границах или в непосредственной близости от них. Нахождение нескольких эпицентров вне зон ЕРА, но в непосредственной близости от них мы склонны оправдывать описанными выше особенностями распознавания в [79]. В тоже время, расположение внутри распознанных ЕРА-зон эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$, произошедших в течение прошедших с момента публикации [79] десятилетий, дает серьезные аргументы в пользу достоверности результата работы [79].

Сравнение зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд Южной Америки, распознанных сегодня методом FCAZ и в 1982 г. ЕРА-методом, приведено на рис. 6.12. На территории рассматриваемого в [79] региона площадь FCAZ-зон примерно в 1.5 раза больше площади ЕРА-зон. При этом 23 эпицентра из 24 (табл. 4.1) расположены внутри FCAZ-зон.

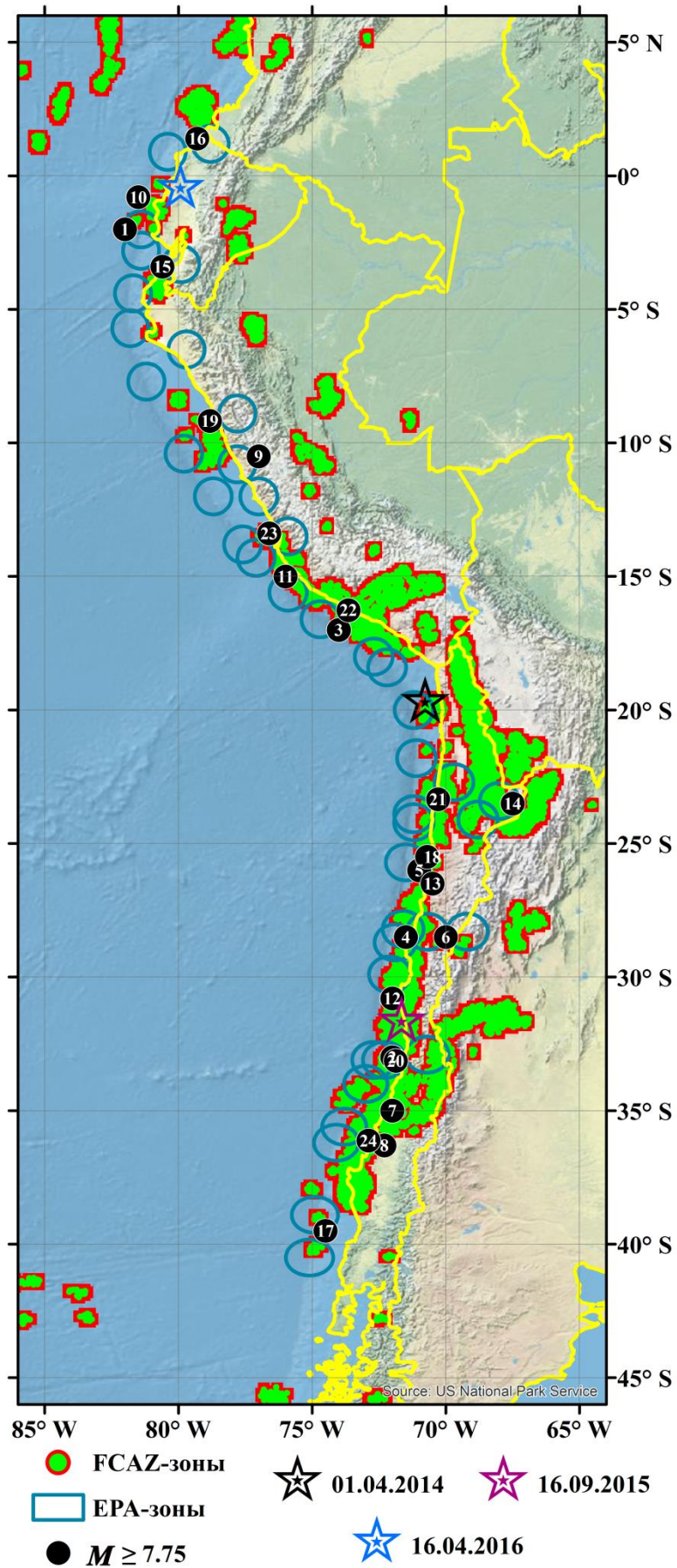


Рис. 6.12. Горный пояс Анд. Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$, распознанных методами FCAZ и ERA

Для ЕРА-зон подобная согласованность с эпицентрами землетрясений с $M \geq 7.75$ из табл. 4.1 не столь очевидна. Это может быть связано с недостатками метода ЕРА, в котором отсутствует формализованный переход от классификации точечных объектов к искомым реальным плоским высокосейсмичным зонам с однозначными границами (т.е., компонента системного анализа). В ЕРА эта нетривиальная задача решается тривиальным проведением кругов единого радиуса вокруг пересечений линеаментов класса *B*. Эти круги совпадают с областями, изначально используемыми для вычисления значений геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания. Обоснованность такого перехода является неочевидной.

В системе FCAZ переход от высокосейсмичных кластеров объектов распознавания к реальным плоским зонам осуществляется формализованным алгоритмом E²XТ. Это устраняет ненужную степень подгонки и существенно увеличивает достоверность, определенность и воспроизводимость результата.

Особо отметим расположение эпицентров двух чилийских землетрясений, произошедших в 2014 г. с $M = 8.2$ и в 2015 г. с $M = 8.3$, а также землетрясения в Эквадоре, произошедшего в 2016 г. с $M = 7.8$, информация о которых никак не использовалась при проведении исследований ни в [79], ни в настоящей диссертационной работе. Два эпицентра из трех (один находится на некотором отдалении) находятся внутри FCAZ-зон (рис. 6.12). При этом внутри ЕРА-зон [79] гарантировано попадает лишь эпицентр землетрясения 2014 г. (черная звезда на рис. 6.12). Эпицентры землетрясений 2015 г. и 2016 г. находится на сравнительно большом расстоянии от ЕРА-зон (рис. 6.12).

Резюмируя, можно утверждать, что полученный в диссертационной работе результат FCAZ-распознавания мест возможного возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.75$ в горном поясе Анд имеет целый ряд преимуществ по сравнению с результатом, полученным в [79] методом ЕРА.

6.2.2. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка

На Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка при проведении в 1984 г. распознавания мест возможного возникновения сильнейших землетрясений классическим методом ЕРА обучение алгоритма дихотомии «Кора-3» не проводилось [78]. Это было связано в первую очередь с малым количеством достоверно определенных эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$, необходимых для формирования множества объектов обучения. Для определения мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Камчатке переносились критерии высокой сейсмичности с горного пояса Анд Южной Америки [79].

Крайне сложной задачей на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка является проверка согласованности ЕРА-зон и эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$. Это связано с тем, что в [78] большая часть объектов распознавания, классифицированных как высокосейсмичные, представляет собой центры фигур, образованных пересечениями линеаментов, расположенных ближе 70 км по отношению друг к другу. Все это усложняет интерпретацию зон ЕРА [126].

На рис. 6.13 показаны ЕРА-зоны возможного возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Камчатки [78], оцифрованные в [206]. Как уже было сказано выше в методике ЕРА в качестве высокосейсмичных зон интерпретируются круги с центрами в пересечениях морфоструктурных линеаментов, классифицированных как высокосейсмичные [62]. При распознавании на Камчатке были использованы круги радиусом 75 км [78, 206].

Особенностями построения схемы морфоструктурного районирования Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и выбора объектов распознавания [78] можно объяснить то, что эпицентры землетрясений № 1 и № 6 (табл. 4.2) располагаются на некотором отдалении от ЕРА-зон (рис. 6.13).

Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка, распознанных сегодня алгоритмической системой FCAZ и в 1984 г. методом ERA, приведено на рис. 6.13. Видно, что зоны ERA и FCAZ хорошо согласовываются. Площадь FCAZ-зон занимает примерно 72% от площади зон ERA. При этом 7 эпицентров землетрясений с $M \geq 7.75$ из 8 рассматриваемых (табл. 4.2) расположены внутри зон FCAZ. Для ERA-зон подобная согласованность с эпицентрами землетрясений с $M \geq 7.75$ не столь очевидна [126].

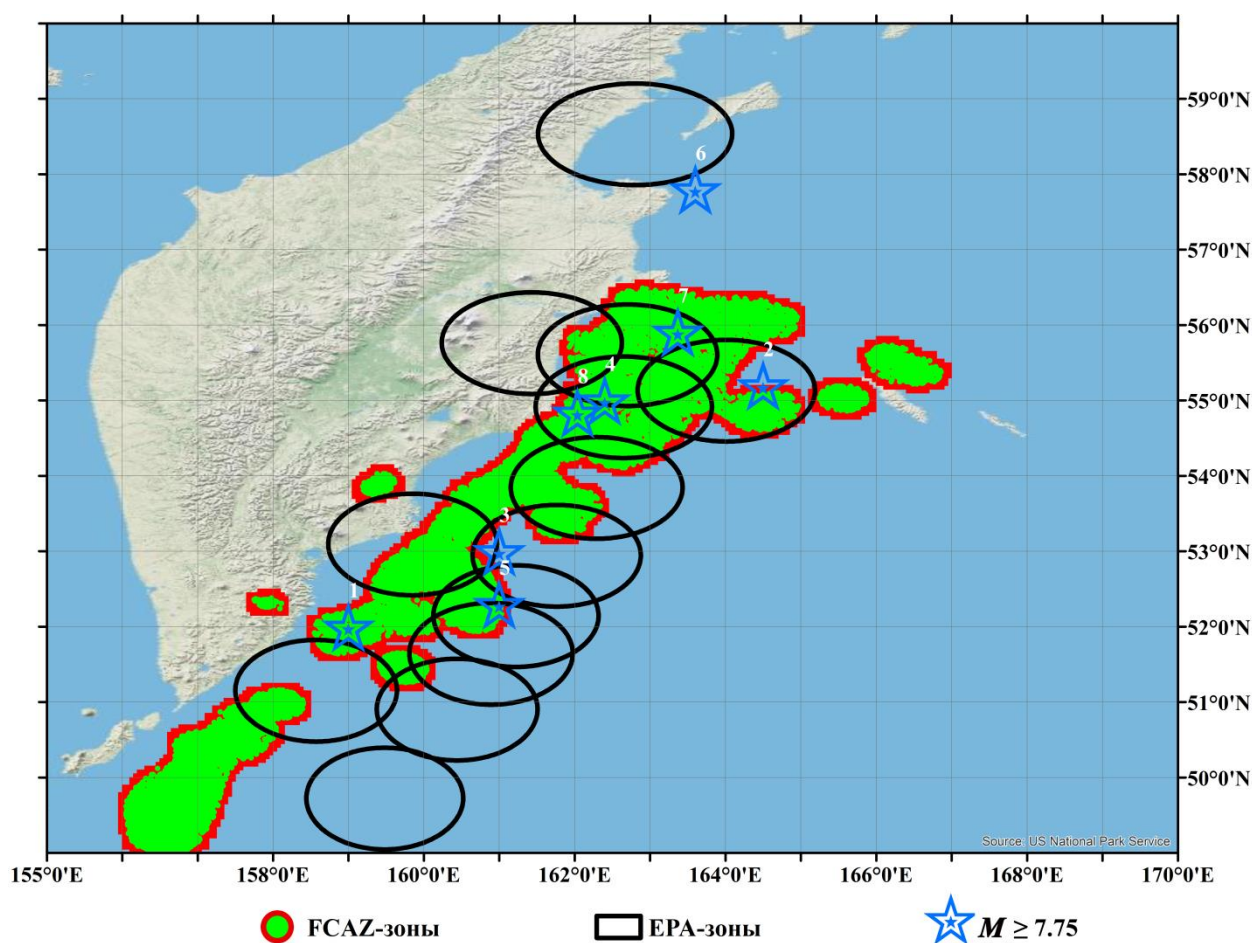


Рис. 6.13. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка. Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$, распознанных методами FCAZ и ERA, и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2)

Следует заметить, что FCAZ-зоны, как правило, расположены северозападнее зон ERA (рис. 6.13). Это связано с тем, большая часть пересечений

морфоструктурных линеаментов, распознанных как высокосейсмичные методом ЕРА, образованы пересечением глубоководного желоба с линеаментами II-го и III-го рангов [78]. А основная часть сейсмических событий, служащих объектами распознавания системы FCAZ, расположена в зоне Беньофа (сейсмофокальной зоне) в пределах континентального склона до желоба и порождается конвергентным взаимодействием двух литосферных плит [222].

6.2.3. Калифорния

В 1976 г. советско-американской группой ученых было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии классическим методом ЕРА [98, 206, 252]. Результаты этого распознавания показаны на рис. 6.14 в виде желтых зон. В качестве объектов распознавания [98, 252] использовались пересечения морфоструктурных линеаментов [14, 231]. Расположение эпицентров землетрясений с $M \geq 6.5$, произошедших в течение прошедших с момента публикации [98, 252] десятилетий, внутри распознанных ЕРА-зон дают серьезные аргументы в пользу достоверности результата [98, 252].

Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии, распознанных методами FCAZ [128] и ЕРА [98, 206, 252], приведено на рис. 6.14. Видно, что FCAZ-зоны, полученные DPS-кластеризацией эпицентров слабых землетрясений и последующим их оконтуриванием, занимают меньшую площадь, чем зоны ЕРА [128].

На рис. 6.14 внутри ЕРА-зон находится 26 из 35 эпицентров (33 в табл. 5.1 и 2, произошедших в 2014 и 2019 годах) рассматриваемых землетрясений с $M \geq 6.5$. При этом непопадание в зоны ЕРА эпицентров 5 землетрясений (№№ 17, 18, 27, 28 и 31 в табл. 5.1) можно объяснить их расположением вне территории охватываемой схемой МСР на базе которой проводилось распознавание. Соответственно, явными ошибками типа

«пропуск цели» для ЕРА можно считать эпицентры 4 землетрясений с $M \geq 6.5$.

В свою очередь внутри высокосейсмичных FCAZ-зон находятся эпицентры 30 землетрясений с $M \geq 6.5$ и, следовательно, ошибками типа «пропуск цели» являются 5 землетрясений. Тем самым можно заключить, что результаты FCAZ и ЕРА распознаваний имеют, по сути, одинаковое количество «пропусков цели». При этом заметим, что на территории рассматриваемого региона Калифорнии площадь FCAZ-зон оказывается в 2 раза меньше площади ЕРА-зон, а площадь DPS-кластеров меньше площади зон ЕРА в 3.5 раза. Отметим, что по большей части FCAZ-зоны находятся внутри зон ЕРА.

Внутри FCAZ-зон находится эпицентр землетрясения вблизи г. Сан-Симеон, произошедшего 22 декабря 2003 г. с магнитудой $M = 6.5$ (№ 30 в табл. 5.1), не попавший в зоны, распознанные методом ЕРА [98, 252] (рис. 6.14). В левом верхнем углу карты (рис. 6.14) внутри FCAZ-зон находятся эпицентры двух морских землетрясений (№ 20 в табл. 5.1 и землетрясение 2014 года – синяя звезда), также не вошедшие в зоны, распознанные как высокосейсмичные методом ЕРА [98, 128, 252].

Отдельно необходимо отметить расположение эпицентра землетрясения, произошедшего 6 июля 2019 г. с $M = 7.1$. Эпицентр этого землетрясения расположен строго внутри зон FCAZ, но при этом за границами ЕРА-зон. Если эпицентр землетрясения 2014 года расположен в акватории океана у внешней границы схемы МСР и по этой причине метод ЕРА мог не распознать ближайшее к этому эпицентру пересечение линеаментов, то эпицентр 2019 года расположен строго внутри схемы МСР и это землетрясение является очевидной ошибкой метода ЕРА.

Тем самым можно заключить, что оба сильных для Калифорнии землетрясения, произошедших после окончания используемого для распознавания методом FCAZ каталога, расположены внутри FCAZ-зон и за пределами зон ЕРА.

Таким образом, можно утверждать, что на территории Калифорнии высокосейсмичные зоны, распознанные системой FCAZ, занимая существенно меньшую площадь региона, согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 6.5$ не хуже, чем зоны, распознанные классическим методом ERA [98, 252].

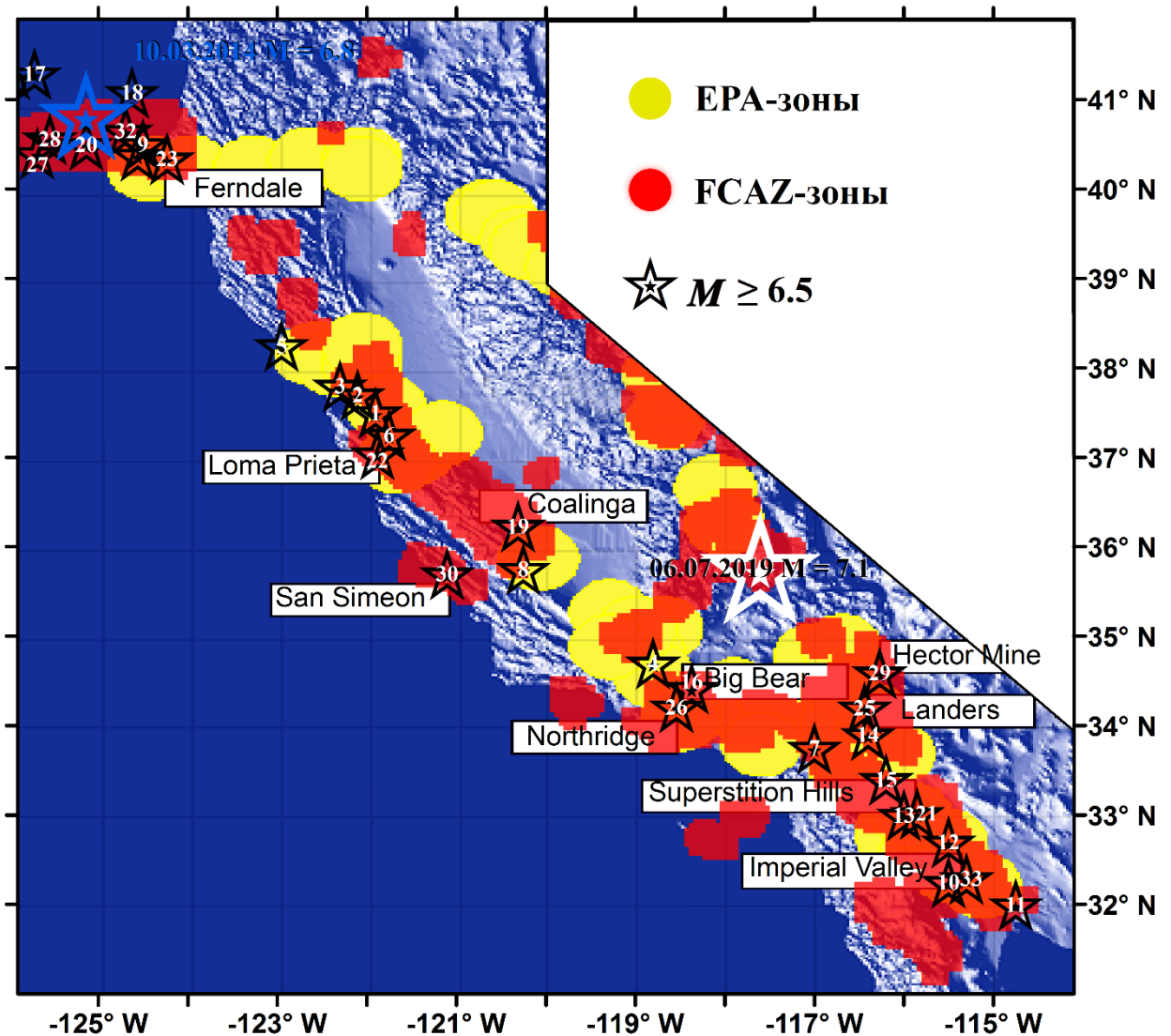


Рис. 6.14. Калифорния. Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$, распознанных методами FCAZ и ERA, и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$

6.2.4. Кавказ

В конце 1980-х годов в рамках советско-французского проекта под научным руководством А.Д. Гвишиани (ИФЗ АН СССР) и А. Систернаса (Институт физики Земли, Страсбург) [35, 58, 60, 62, 242, 266 и др.] классический метод ЕРА был применен для распознавания мест возможного возникновения землетрясений в трех областях Альпийского орогенного пояса Евразии, обладающих умеренным уровнем сейсмичности: Большой Кавказ, Западные Альпы и Пиренеи.

В работе [206] был выполнен апостериорный анализ и верификация результатов ЕРА-распознавания на Большом Кавказе, полученных в [62]. На рис. 6.15 показаны ЕРА-зоны на Большом Кавказе [62], оцифрованные в [206]. В качестве зон ЕРА рассматриваются круги 25-ти километрового радиуса с центрами в точках пересечения осей морфоструктурных линеаментов, классифицированных как высокосейсмичные. Тот факт, что эпицентры некоторых землетрясений (табл. 5.3), используемых в [62] для обучения алгоритма дихотомии «Кора-3», не попадают в зоны ЕРА, по-видимому, может быть объяснен отсутствием в ЕРА формализованного перехода от распознанных высокосейсмичных точечных объектов к реальным плоским зонам возможного возникновения землетрясений.

Сравнение зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ на Большом Кавказе, распознанных алгоритмической системой FCAZ [71] и методом ЕРА [62], приведено на рис. 6.15. Распознавание методом ЕРА в работе [62] проводилось для территории Большого Кавказа в пределах горной страны, выделенной в рамках морфоструктурного районирования и располагающейся преимущественно вдоль Главного Кавказского хребта. Эта горная страна значительно меньше территории, на которой распознавались FCAZ-зоны. На остальной части рассматриваемого нами региона высокосейсмичные зоны, распознанные методом ЕРА в работе [62], отсутствуют. Соответственно, сравнительный анализ результатов ЕРА и

FCAZ проводился только в подрегионе Кавказа (Большой Кавказ), рассматриваемом в [62].

В центральной и восточной частях Большого Кавказа наблюдается хорошее согласование высокосейсмичных зон, распознанных методами ЕРА и FCAZ. В пределах территории (горной страны), исследуемой в [62] площади зон FCAZ и ЕРА примерно равны. Отношение площади FCAZ-зон к площади зон ЕРА – 1.08.

Эпицентры почти всех рассматриваемых землетрясений (92.4%) с $M \geq 5.0$ (табл. 5.3), произошедших на территории горной страны из [62], попадают в зоны FCAZ и ЕРА. Для FCAZ-зон исключение составляют лишь несколько эпицентров исторических землетрясений. Эпицентры некоторых землетрясений находятся на малом расстоянии от ЕРА-зон, что объясняется описанными выше особенностями ЕРА-распознавания.

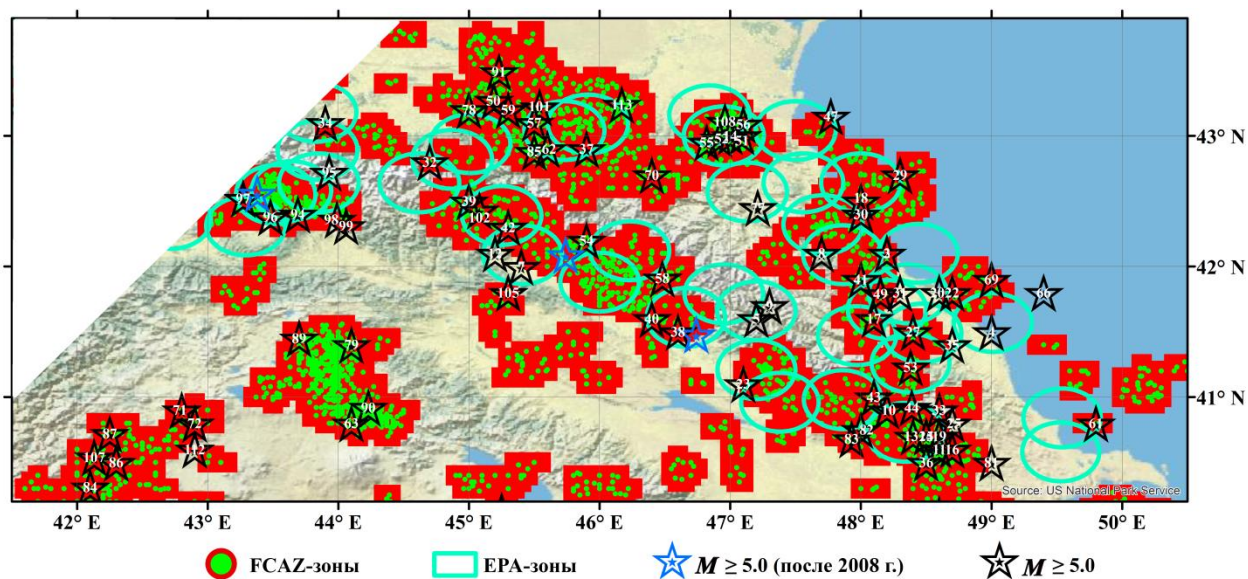


Рис. 6.15. Сравнение мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.0$ на Большом Кавказе, распознанных методами FCAZ и ЕРА, и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$

Следует заметить, что внутри FCAZ-зон попали эпицентры № 70 и № 81 (табл. 5.3), которые находятся на достаточно больших расстояниях от

ближайших к ним ЕРА-зон. Эти землетрясения произошли до 1988 г., но не использовались авторами в [62] в качестве материала обучения. Причиной этого мог быть тот факт, что, по некоторым данным, магнитуда этих землетрясений $M = 4.8 - 4.9$. Эпицентр № 77 (табл. 5.3), составляющий единственную очевидную ошибку типа «пропуск цели» во FCAZ-распознавании, находится внутри зон ЕРА.

Отметим, что эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$, произошедших после 2008 г. (при FCAZ распознавании использовался каталог землетрясений за период 1962 – 2008 гг.), попадают как в зоны ЕРА, так и во FCAZ-зоны [71].

6.3. FCAZ-распознавание на базе декластеризованного каталога землетрясений

Для целей установления вклада форшоковых и афтершоковых последовательностей в формирование конечного результата распознавания методом FCAZ было принято решение декластеризовать используемые ранее для распознавания на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка [126] и в Калифорнии [128] каталоги землетрясений и впервые применить декластеризованные каталоги в качестве входных данных системы FCAZ [247].

6.3.1. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка

В 2018 г. на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ методом FCAZ [126]. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры 44 113 землетрясений с магнитудой $M_L \geq 3.5$ (M_L – камчатская региональная магнитуда [3]) и глубиной гипоцентров не превосходящей 70 км за период 1962 – 2015 гг. [153].

Опорная региональная магнитудная шкала M_L землетрясений Камчатки

и Командорских островов [153] в отличие от классических магнитудных шкал не имеет самостоятельного характера [3]. Она получается из значений энергетического класса Федотова [217] пересчетом по формуле Гордеева [102]. В работе [3] определена средняя связь моментной магнитуды M_W с камчатской региональной магнитудой M_L для диапазона $M_W = 3.0 - 6.0$ (или $M_L = 3.4 - 6.4$): $M_W = M_L - 0.4$.

Расположение эпицентров землетрясений с $M_L \geq 3.5$, являвшихся объектами распознавания системы FCAZ в [126] (Глава 4, п. 4.2), на карте региона было показано на рис. 4.4.

Для декластеризации каталога землетрясений Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка (1962 – 2015 гг.) [153] использовался подход Заляпина-Бен-Зиона [325]. В итоге декластеризованный каталог содержит 24 937 эпицентров землетрясений с $M_L \geq 3.5$ и $h \leq 70$ км. Оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) показала, что магнитуда $M_L = 3.5$ является представительной. В связи с этим, в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M_L \geq 3.5$. Расположение эпицентров землетрясений из декластеризованного каталога на карте региона показано на рис. 6.16.

К множеству эпицентров землетрясений (24 937 эпицентров из декластеризованного каталога) с $M_L \geq 3.5$, являющихся объектами распознавания, был применен алгоритм DPS. Также как и при распознавании по полному каталогу ([126] и Глава 4) было выполнено две итерации DPS-кластеризации. Вычисленные оптимальные значения максимальной плотности β распознаваемых DPS-кластеров и радиуса r локализации на итерациях равнялись: $\beta_1 = -0.2$ и $\beta_2 = -0.2$, $r_1 = 34.47$ км и $r_2 = 37.6$ км. В распознанные DPS-кластеры вошло 76% рассматриваемых объектов распознавания. DPS-кластеры показаны на рис. 6.17 светло зеленым цветом. К DPS-кластерам был применен алгоритм E²XТ. Вычисленные в автоматическом режиме оптимальные значения его входных параметров равнялись: $\omega = -3.75$ и $\nu = -2.0$. При этом шаг географической сетки был

0.05°. На рис. 6.17 совокупностью светло зеленого и коричневого цветов показаны распознанные FCAZ-зоны.

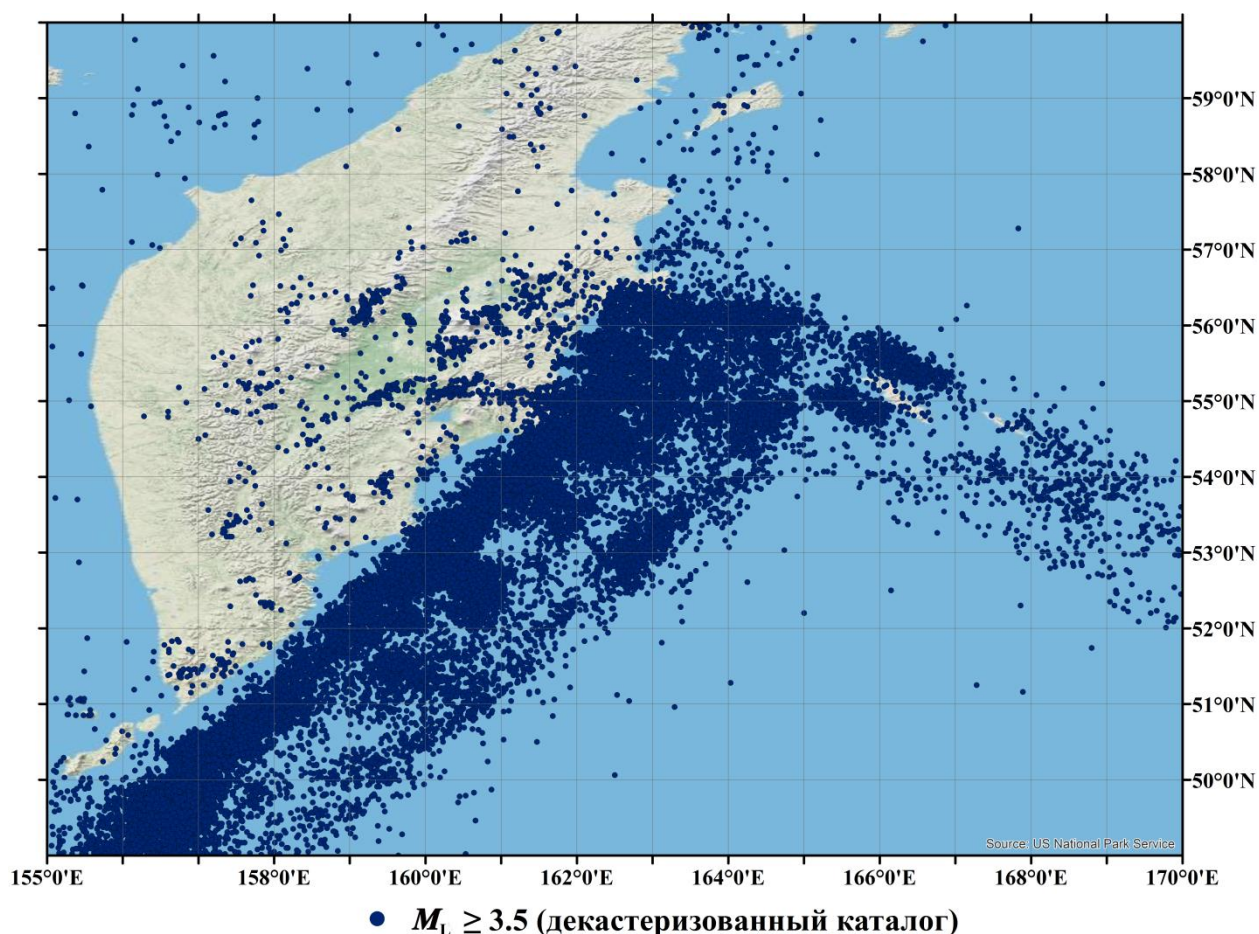


Рис. 6.16. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка. Эпицентры землетрясений с $M_L \geq 3.5$ (объекты распознавания системы FCAZ) из декластеризованного каталога

Здесь необходимо особо отметить, что, не смотря на почти вдвое уменьшение количества объектов распознавания, значения параметров β , r , ω , ν и процента вошедших в DPS-кластеры объектов, вычисленных при распознавании на базе декластеризованного каталога, совсем незначительно отличается от значений, полученных при распознавании по полному каталогу землетрясений. Напомним, что при распознавании по полному каталогу были получены следующие значения: $\beta_1 = -0.15$, $\beta_2 = -0.2$, $r_1 = 30.9$ км, $r_2 = 33.7$ км, $\omega = -4$, $\nu = -2.25$ и 73.3% объектов вошло в DPS-кластеры. Это может

говорить о достаточно близких пространственных распределениях эпицентров землетрясений в рассматриваемых каталогах.

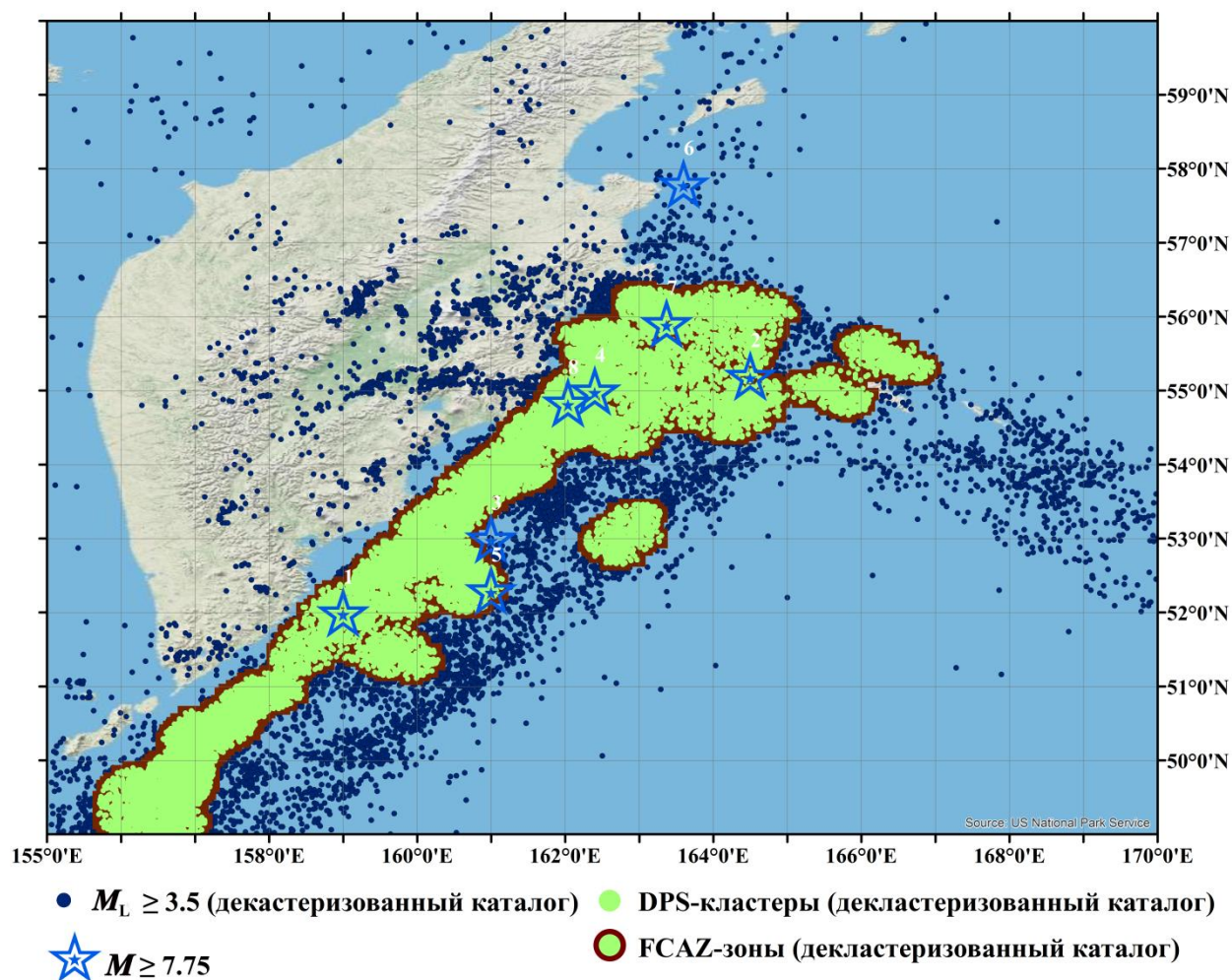


Рис. 6.17. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$, распознанные на базе декластеризованного каталога, и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2)

Как видно из рис. 6.17 внутрь FCAZ-зон попадает 7 (один из них находится на самой границе) из 8 землетрясений с $M \geq 7.75$ (табл. 4.2). Отметим, что FCAZ-зоны содержат в себе 77.2% землетрясений с $M_L \geq 4.5$ из числа имеющихся в рассматриваемом декластеризованном каталоге. При этом FCAZ-зоны занимают около 44.5% площади сейсмоактивных Курило-Камчатской и Алеутской дуг (рис. 6.17). Все это позволяет с большой

степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны (рис. 6.17), как места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка. О причинах расположения вне FCAZ-зон эпицентра Озерновского землетрясения (№ 6 в табл. 4.2 и на рис. 4.6 и 6.17) было подробно сказано в Главе 4.

Для проверки достоверности результатов FCAZ-распознавания на базе декластеризованного каталога землетрясений были проведены контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Результаты экспериментов следует признать успешными, что говорит в пользу достоверности интерпретации FCAZ-зон (рис. 6.17) в качестве мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка.

На рис. 6.18 показано сравнение FCAZ-зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка, распознанных с использованием эпицентров из полного (рис. 4.6) и декластеризованного (рис. 6.17) каталогов землетрясений региона [153].

Анализ рис. 6.18 показывает, что FCAZ-зоны хорошо совпадают. Площадь зон, распознанных с использованием эпицентров из декластеризованного каталога, на 12% больше площади зон, распознанных на базе полного каталога. Отношение площади пересечения зон к площади их объединения – 0.77. Заметим, что зоны, распознанные по декластеризованному каталогу, представляют собой единую структуру вдоль всего Тихоокеанского побережья Камчатки. В отличие от FCAZ-зон, распознанных по полному каталогу, среди них отсутствуют зоны на побережье полуострова, в частности в районе Авачинского залива. Высокосейсмичная зона, располагавшаяся на востоке от Кроноцкого залива на рис. 4.6, переместилась дальше в океан (рис. 6.17 – 6.18). Отметим, что FCAZ-зоны (рис. 4.6 и рис. 6.17 – 6.18), имея почти одинаковые площади, содержат внутри себя 7 из 8 рассматриваемых сильнейших землетрясений региона (табл. 4.2).

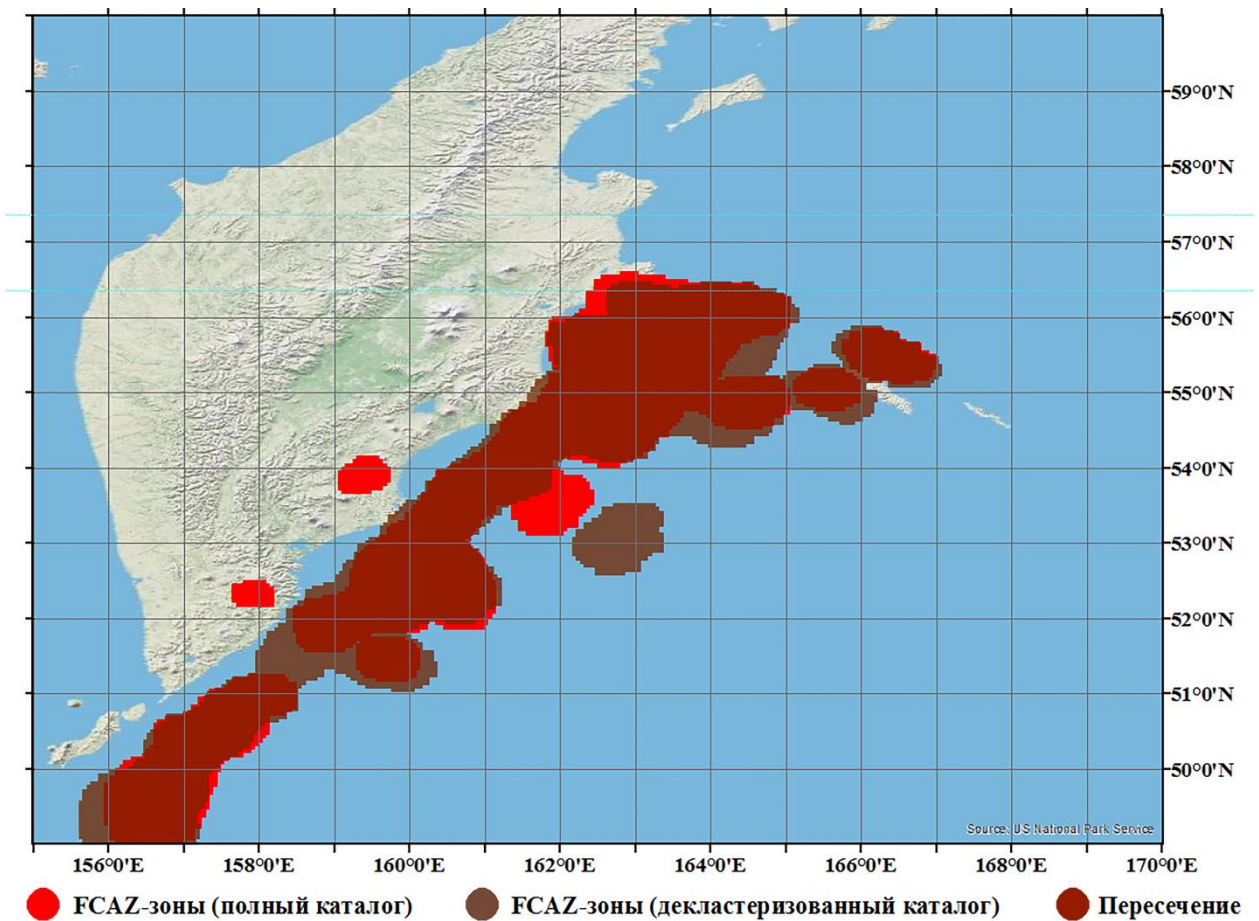


Рис. 6.18. Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка. Сравнение FCAZ-зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$, распознанных на базе полного и декластеризованного каталогов землетрясений

6.3.2. Калифорния

Распознавание мест возможного возникновения сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений в Калифорнии методом FCAZ было выполнено в 2018 г. [128]. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры 31 874 землетрясений с $M \geq 3.0$ [273] за период 1960 – 2012 гг. (Глава 5, п. 5.1). Для декластеризации каталога землетрясений Калифорнии (1960 – 2012 гг. [273]) использовался подход Заляпина-Бен-Зиона [325]. В итоге декластеризованный каталог содержит 10 176 сейсмических событий с $M \geq 3.0$. Оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude)

декластеризованного каталога показала, что $M = 3.0$ является представительной и в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$. Расположение таких объектов распознавания на карте Калифорнии показано на рис. 6.19.

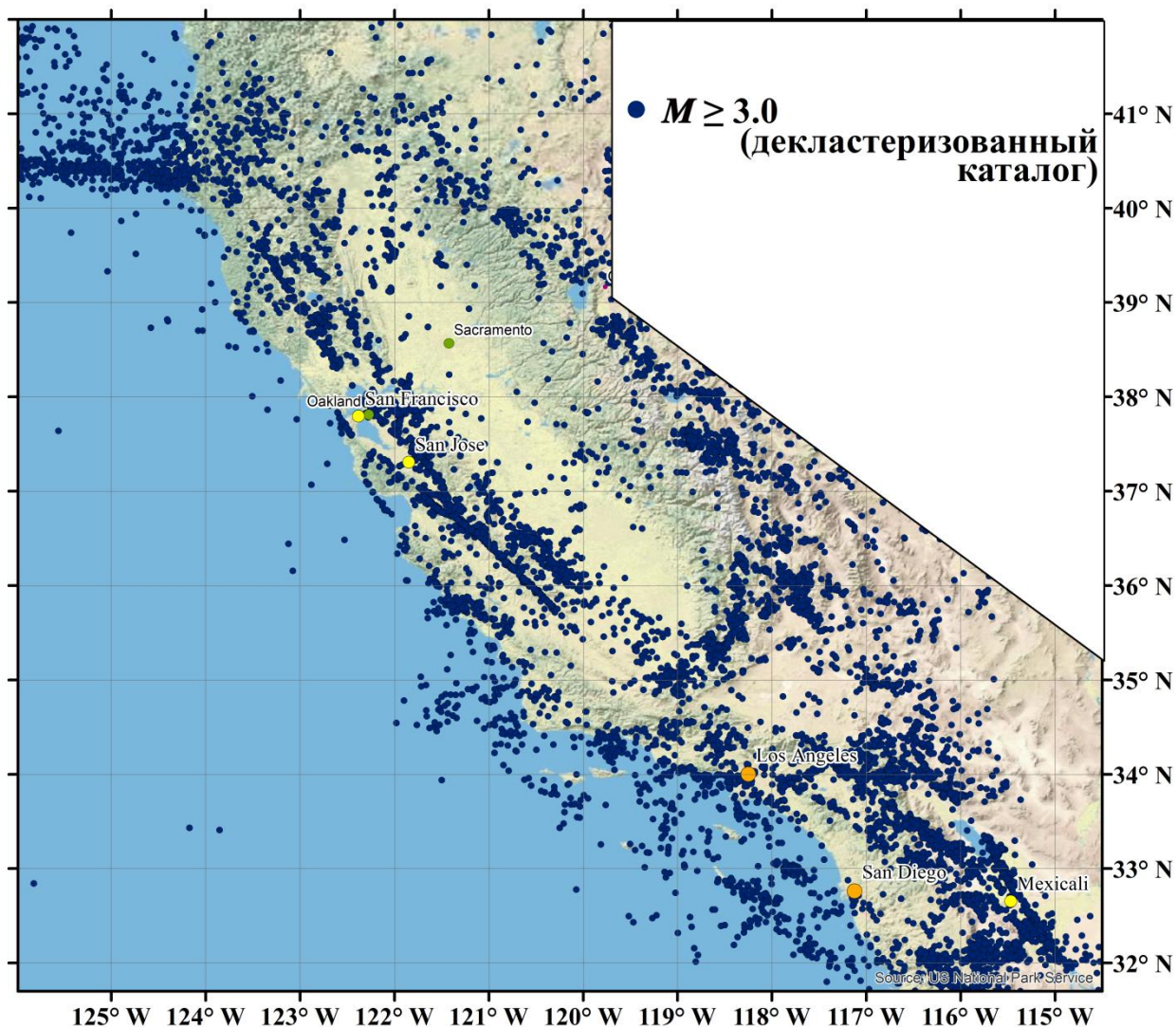


Рис. 6.19. Калифорния. Эпицентры землетрясений с $M \geq 3.0$ (объекты распознавания системы FCAZ) из декластеризованного каталога

К множеству объектов распознавания (10 176 эпицентров из декластеризованного каталога) был применен алгоритм DPS [10]. Также как и при распознавании по полному каталогу ([128] и Глава 5) было выполнено три итерации DPS-кластеризации [55, 128, 228]. Вычисленные оптимальные значения максимальности плотности β распознанных DPS-кластеров и

радиуса r локализации на итерациях равнялись: $\beta_1 = 0.2$, $\beta_2 = -0.05$, $\beta_3 = 0.05$, $r_1 = 21.84$ км, $r_2 = 40.02$ км, $r_3 = 39.39$ км. Сформированные таким образом DPS-кластеры включают в себя 61% объектов распознавания и показаны на рис. 6.20 светло зеленым цветом.

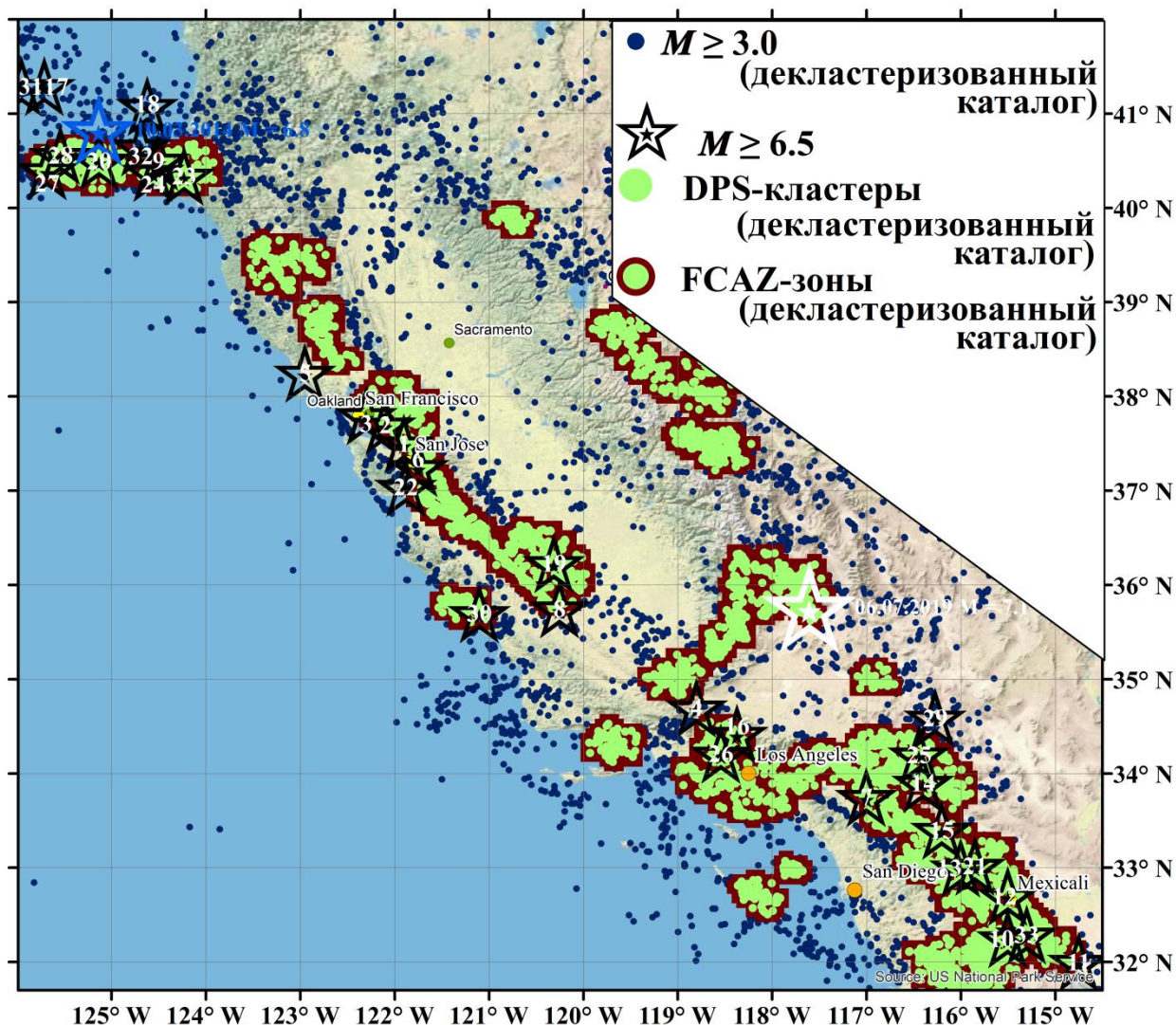


Рис. 6.20. Калифорния. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$, распознанные на базе декластеризованного каталога землетрясений, и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$

К распознанным DPS-кластерам был применен алгоритм E^2XT . Вычисленные в автоматическом режиме оптимальные значения его входных параметров равнялись: $\omega = -5.0$ и $\nu = -2.0$. При этом шаг географической сетки – 0.05° . FCAZ-зоны показаны на рис. 6.20 совокупностью светло

зеленого и коричневого цветов. Отметим, что распознанные FCAZ-зоны содержат в себе 64.5% эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$, являвшихся объектами распознавания.

Здесь необходимо отметить, что в отличие от описанного в предыдущем пункте распознавания на Камчатке в Калифорнии вычисленные значения параметров алгоритмов DPS и E^2XT для случая декластеризованного каталога заметно отличаются от значений этих же параметров, вычисленных для случая полного каталога (Глава 5, п. 5.1). Объяснением этому может быть то, что после декластеризации каталога количество объектов распознавания сократилось на 68%, что привело к изменению количественно-пространственного распределения множества объектов распознавания. Вместе с тем приводимые ниже результаты показывают, что это не привело к значительному изменению как сформированных DPS-кластером, так и, собственно, распознанных FCAZ-зон.

Из рис. 6.20 видно, что распознанные здесь FCAZ-зоны хорошо согласуются с эпицентрами уже произошедших землетрясений с $M \geq 6.5$. Вне FCAZ-зон находятся эпицентры № 4, 5, 17, 18 и 31 (табл. 5.1) не вошедшие в распознанные зоны и в основном варианте распознавания (Глава 5, п. 5.1, рис. 5.3) на базе полного каталога землетрясений. Эпицентры землетрясений, произошедших в 2014 и 2019 годах, располагаются строго внутри FCAZ-зон (рис. 6.20). Единственным ухудшением согласованности FCAZ-зон и землетрясений с $M \geq 6.5$ является эпицентр № 29 (табл. 5.1), который находится рядом с границей FCAZ-зон (рис. 6.20), распознанных на базе декластеризованного каталога.

Для проверки достоверности результатов FCAZ-распознавания на базе декластеризованного каталога землетрясений были проведены контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Результаты экспериментов оказались успешными. Это говорит в пользу достоверности интерпретации FCAZ-зон, показанных на рис. 6.20, в качестве мест возможного возникновения

землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии.

На рис. 6.21 показано сравнение FCAZ-зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в Калифорнии, распознанных с использованием эпицентров из полного (рис. 5.3) и декластеризованного (рис. 6.20) каталогов землетрясений.

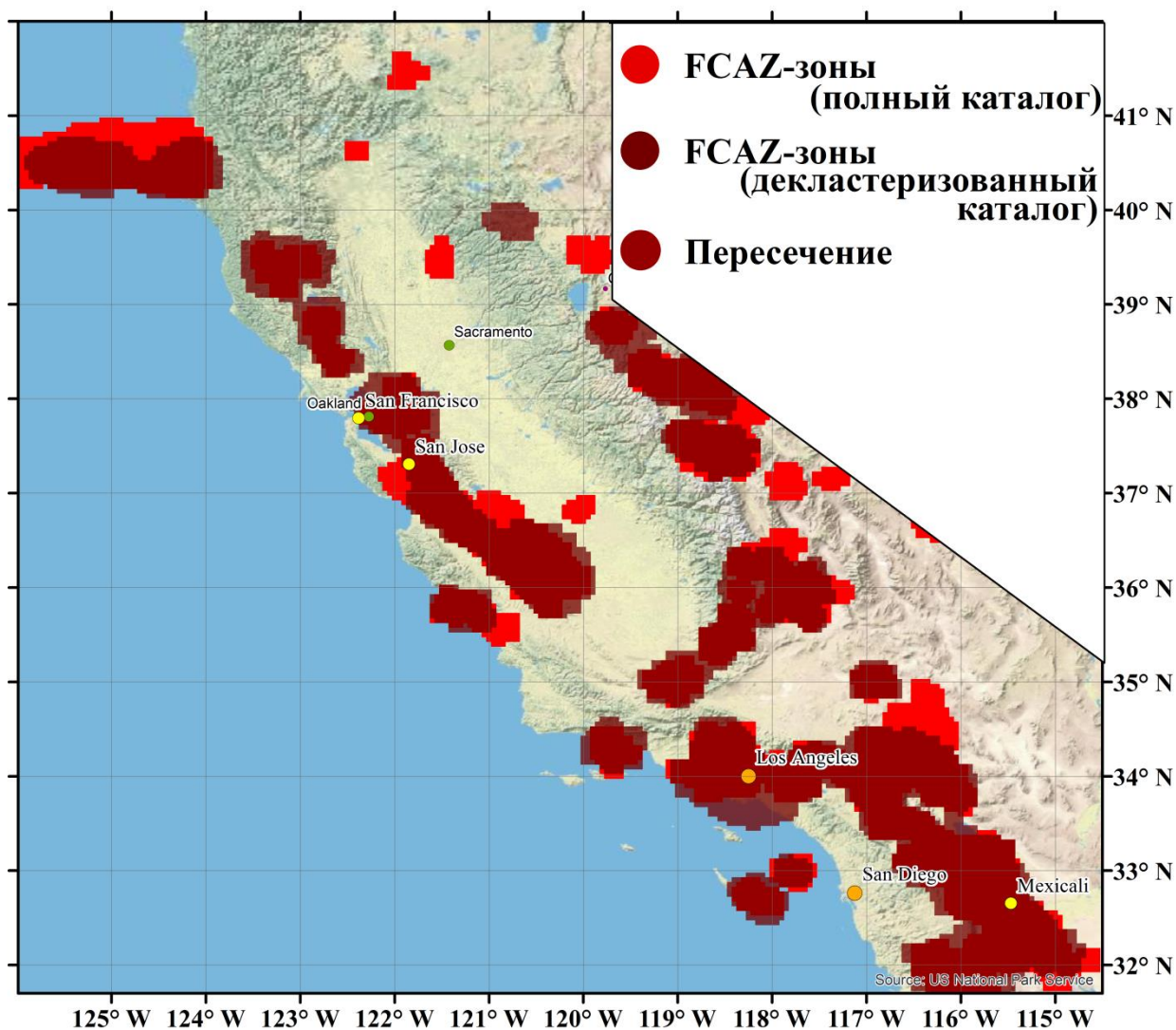


Рис. 6.21. Калифорния. Сравнение FCAZ-зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$, распознанных на базе полного и декластеризованного каталогов землетрясений

Анализ рис. 6.21 показывает, что в Калифорнии FCAZ-зоны, распознанные с использованием полного и декластеризованного каталогов землетрясений, имеют одинаковые площади. Отношение суммарной

площади зон, распознанных с использованием эпицентров из декластеризованного каталога, к суммарной площади зон, распознанных на базе полного каталога, равно 0.9937. При этом отношение площади пересечения FCAZ-зон, распознанных по разным каталогам, к площади их объединения – 0.69. Основные различия между FCAZ-зонами наблюдаются на юге, на востоке и на севере гор Сьерра-Невада (часть таких различий находится на территории штата Невада), а также на севере изучаемого региона Калифорнии в акватории океана. Отметим, что FCAZ-зоны, показанные на рис 5.3 и на рис. 6.20, имея одинаковые площади, содержат внутри себя, соответственно, 30 и 29 из 35 рассматриваемых сильных землетрясений региона.

6.4. Обсуждение

Для регионов горного пояса Анд Южной Америки, Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка, Калифорнии и Кавказа проведены контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история».

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

Зоны FCAZ, распознанные в экспериментах «полная сейсмическая история», по своим формам и пространственному расположению близки к FCAZ-зонам основных вариантов распознаваний (Главы 4 – 5). Внутри распознанных зон попадают 25 из 27 (или 18 из 20) эпицентров землетрясений, произошедших спустя годы после даты последнего слабого землетрясения, являвшегося объектом распознавания. Так, строго внутри

FCAZ-зон в Калифорнии (рис. 6.7) располагается эпицентр землетрясения с $M = 7.1$, произошедшего спустя 28.5 лет после окончания используемого в эксперименте каталога.

Результаты контрольных экспериментов говорят в пользу устойчивости FCAZ-распознавания. Это подтверждает достоверность основных вариантов распознаваний FCAZ-зон, как мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

Выполнен сопоставительный анализ FCAZ-зон и зон ЕРА в горном поясе Анд, на Тихоокеанском побережье Камчатки, в Калифорнии и на Кавказе. Как правило, FCAZ-зоны имеют меньшую площадь, чем зоны ЕРА. Исключением является горный пояс Анд, где FCAZ-распознавание проводилось на большей территории.

Зоны FCAZ хорошо согласуются с эпицентрами известных сильнейших (Анды и Камчатка), сильных (Калифорния) и значительных (Кавказ) землетрясений. Проверка подобной согласованности для ЕРА-зон является сложной задачей. Причина тому – особенности ЕРА-распознавания. В методе ЕРА отсутствует компонента системного анализа, а именно формализованный переход от классификации точечных объектов к искомым реальным плоским высокосейсмичным зонам с однозначными границами.

Если говорить о землетрясениях, составивших материал чистого экзамена для обоих методов, то внутри или на границах FCAZ-зон находится 7 из 8 таких землетрясений. При этом внутри зон ЕРА 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 ЕРА.

Зоны возможного возникновения землетрясений на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и в Калифорнии, распознанные с использованием в качестве объектов всех эпицентров землетрясений (рис. 4.6 и 5.3) и эпицентров землетрясений из этих же, но уже декластеризованных каталогов (рис. 6.17 и 6.20) оказались почти

совпадающими (рис. 6.18 и 6.21). Это говорит о том, что для рассматриваемых регионов наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на конечные результаты FCAZ-распознавания.

Вычисленные в автоматическом режиме оптимальные значения параметра β (максимальность плотности в распознаваемых DPS-кластерах, а по сути, «взгляд» алгоритма на топологию множества объектов и отделимость их плотных сгущений от неплотного дополнения) для обоих распознаваний на Камчатке оказались очень близкими: -0.2 и -0.2 для декластеризованного каталога (рис. 6.17); -0.15 и -0.2 для полного каталога (рис. 4.6).

Вопрос влияния декластеризации каталога на результаты FCAZ-распознавания в других регионах остается открытым. Подобное распознавание в других регионах не выполнено в силу недостаточного количества эпицентров землетрясений в декластеризованных каталогах.

6.5. Выводы

- Проведены контрольные вычислительные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Их результаты говорят в пользу устойчивости FCAZ-распознавания. Это подтверждает достоверность основных вариантов распознаваний FCAZ-зон как мест возможного возникновения землетрясений.
- Выполнен сопоставительный анализ FCAZ-зон и зон ЕРА. Как правило, FCAZ-зоны имеют меньшую площадь, чем зоны ЕРА, и лучше согласуются с эпицентрами известных землетрясений. Исключением является горный пояс Анд, где FCAZ-распознавание проводилось на большей территории.
- На Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка и в Калифорнии FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений, распознанные на базе полных и декластеризованных каталогов, оказались почти совпадающими.

Это говорит о том, что для рассматриваемых регионов наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на конечный результат FCAZ-распознавания.

ГЛАВА 7. FCAZ-РАСПОЗНАВАНИЕ КАК ПРОБЛЕМА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

7.1. Системно-математическая модель FCAZ-распознавания

Рассмотрим проблему FCAZ-распознавания с точки зрения теоретического системного анализа (в англоязычной литературе ASA – Advanced Systems Analysis [262, 277]). Процесс и результат определения потенциальных зон высокой сейсмической опасности представляет собой сложную систему [327]. 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, слабых землетрясений с $M \geq M_R$.

Как было показано в Главах 4 – 5 для картины сегодняшнего дня FCAZ выполнил достоверное распознавание искомых 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 имеется 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 математической индукции несложно определить $\Delta_n t$ и последовательность пар:

$$\{(t_n, \text{FCAZ}(t_n)) : n = 1, 2, \dots\}, \quad (7.1)$$

где значения времени t_n – 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 $T(n) \times \text{FCAZ}$, где $T = \{t_n; n = 1, 2, \dots\}$ определено формулой (7.1), к методам системного анализа [83, 165, 166, 327]. Общая схема этого метода иллюстрируется на рис. 7.1, где μ_n есть мера качества FCAZ-распознавания в момент t_n .

Перейдем к точным формулировкам. Пусть $\text{FCAZ}_{\gamma_1}(W_{t_1}) : G = B_{t_1} \coprod H_{t_1}$ – результат FCAZ-распознавания 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 сейсмоопасного

региона квадратными объектами, на котором работает алгоритм E²XТ;

- $\gamma_1 = \{\delta, C, \omega, \nu, q, \beta\}$ – множество значений свободных параметров FCAZ, отобранных для оптимального распознавания в момент времени t_1 ;

- $B_{t_1} \in G$ и $H_{t_1} \in G$ – подмножества объектов $g \in G$, классифицированных на 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 возможных мест возникновения сильных землетрясений, $B_{t_1} \cup H_{t_1} = G$, $B_{t_1} \cap H_{t_1} = \emptyset$.

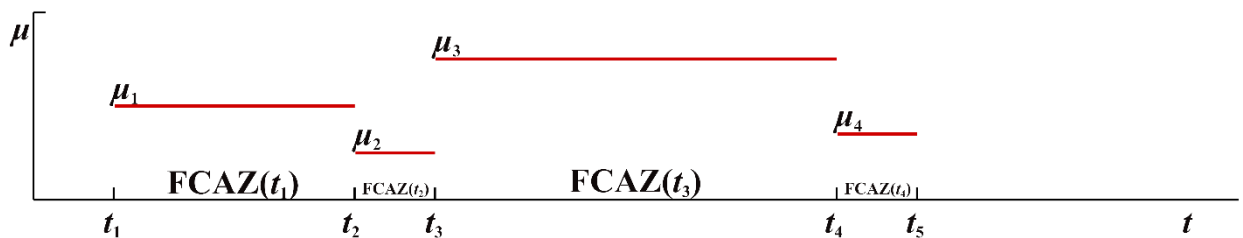


Рис. 7.1. Разработанный на основе FCAZ-распознавания метод системного анализа. Бордовым цветом показаны значения меры качества μ_n FCAZ-распознавания на различных временных промежутках

Пусть B_{0,t_1} – множество эпицентров сильных ($M \geq M_0$) 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} :

$$\mu(B_{0,t_1} \subset B_{t_1}) = \frac{|B_{0,t_1} \cap B_{t_1}|}{|B_{0,t_1}|}. \quad (7.2)$$

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(B_{0,t} \subset B_t) \rightarrow 1. \quad (7.3)$$

Пусть к наступлению момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$ произошло еще Z_{t_1, t_2} сильных ($M \geq M_0$) землетрясений $B_{0, t_2} = B_{0, t_1} \cup Z_{t_1, t_2}$, т.е. 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 $M \geq M_R$, т.е. 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} , т.е. получить разложение $FCAZ_{\gamma_2}(W_{t_2}): G = B_{t_2} \coprod H_{t_2}$ (рис. 7.1).

FCAZ-распознавание определяется выбором свободных параметров $\gamma = \{\delta, C, \omega, \nu, q, \beta\}$. Параметры алгоритма E²XТ, как и сам его результат, напрямую зависят от распознанных DPS-кластеров. В свою очередь β в алгоритме 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 $\gamma_2 = \{\delta, C, \omega, \nu, q, \beta\}$ для $FCAZ_{\gamma_2}(W_{t_2}): G = B_{t_2} \coprod H_{t_2}$ 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 будут собственным подмножеством B_{t_2} .

Другими словами предел (7.3) 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 постулату математической 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 (в частности «полная сейсмическая история», Глава 6). 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.

7.2. Выводы

В Главе построена системно-математическая модель FCAZ-распознавания зон повышенной сейсмической опасности как сложной динамической системы. Из интерпретации проведенного распознавания как проблемы системного анализа сформулирован критерий выбора

неравномерных отрезков времени для проведения DPS-кластеризации и E^2 ХТ-зонирования ненулевой меры. Построенная пространственно-временная модель $T(n) \times \text{FCAZ}$ распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений позволяет создать временной план выполнения дальнейших итераций по распознаванию зон повышенной сейсмической опасности для изученных в диссертации регионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных ($M \geq M_0$) землетрясений [62, 90, 206, 253] в диссертации изучается двумя различными методами, созданными диссертантом. Их фундаментальное различие заключается в выборе объектов распознавания.

В первом методе (Глава 2) [54, 127, 249] объектами являются пересечения осей линеаментов, построенных по формализованной методике морфоструктурного районирования (МСР) [14, 62, 231]. Во втором методе (Глава 3) 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 [71, 72, 126].

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» [54, 127, 249]. Во втором – сейсмологические характеристики и системно-аналитическая процедура объективного распознавания сгущений FCAZ [71, 72, 126].

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 [54, 127, 249] 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 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 [62, 90, 206].

Отметим здесь существенную прикладную составляющую этих результатов. В приложении к проблеме обеспечения геоэкологической безопасности захоронения радиоактивных отходов в пределах Нижне-Канского массива оказывается обоснованным вывод о том, что зоны возможных землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье не могут оказать существенного влияния на сейсмическую опасность строительной площадки ПГЗРО.

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» [54, 127, 249].

Этот алгоритм позволяет классифицировать объекты на высоко- и низкосейсмичные на основе одного высокосейсмичного 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 линеаментов, нашедшей свое подтверждение в [89]. Таким образом, построение схемы МСР [14] 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?» [55, 72]. В диссертации дается положительный ответ на этот вопрос, на основе

использования второго, системно-аналитического метода FCAZ (Глава 3).

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 $T(n) \times \text{FCAZ}$ 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 Камчатки ($M \geq 7.75$) 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдрахматов К.Е., Байкулов С.К., Джумабаева А.Б.* Временные кластеры в сейсмическом режиме Северного Тянь-Шаня (на примере сильных землетрясений) // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2019. № 1 (13). С. 19–25.
2. *Абдрахматов К.Е., Стром А.Л., Дельво Д., Хавенит Х.Б., Виттори Е.* Временная кластеризация сильных землетрясений Северного Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2013. № 1 (1). С. 9–15.
3. *Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А.* Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 158–172. DOI: 10.7868/S0002333718010039.
4. *Аверьянова В.Н.* Глубинная сейсмоструктура островных дуг. М.: Наука, 1975. 219 с.
5. *Агатова А.Р., Непон Р.К., Баринов В.В., Назаров А.Н., Мыглан В.С.* Новый аспект применения дендрохронологического анализа для датирования сильных землетрясений прошлого (на примере Горного Алтая) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 2. С. 175–178. DOI: 10.7868/S0869565214080155.
6. *Агаян С.М.* Дискретный Математический Анализ и нечеткая логика в геофизических приложениях // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: ИТПЗ РАН, 2005. 223 с.
7. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Злотники Ж., Родкин М.В.* Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования.

2005. № 1. С. 143–155.
8. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Дзобоев Б.А.* A-DPS (Adaptive Discrete Perfect Set). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662818. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2017 г.
 9. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н.* Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях // Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция. г. Петрозаводск, 11–17 сентября 2011 г. Сборник докладов. М., 2011. С. 543–546.
 10. *Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н., Дзобоев Б.А.* DPS (Discrete Perfect Sets). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662959. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 декабря 2015 г.
 11. *Агаян С.М., Соловьев А.А.* Выделение плотных областей в метрических пространствах на основе кристаллизации // System Research and Information Technologies. 2004. № 2. С. 7–23.
 12. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. Справочное издание. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
 13. *Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А.* Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
 14. *Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Раницман Е.Я.* Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам // Вычислительная сейсмология. Вып. 10. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1977. С. 33–49.
 15. *Алешин А.С.* Фундаментальные аспекты сейсмического

- микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 8–17.
16. *Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринев В.Н.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. 592 с.
 17. *Аптекман Ж.Я., Татевосян Р.Э.* О возможности выявления сложных очагов землетрясений по данным каталога СМТ (тензора центра момента) // Физика Земли. 2007. № 5. С. 17–23.
 18. *Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 375 с.
 19. *Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Молотков С.Г., Плетнев К.Г., Михин А.Г., Татевосян Р.Э., Эртелева О.О.* Экспериментальное изучение очагов сильных землетрясений // Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Ответственный редактор: А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2003. С. 48–56.
 20. *Артемьев М.Е., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VII. Использование гравитационных аномалий Буге для Калифорнии и смежных регионов // Вычислительная сейсмология. Вып. 10. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1977. С. 19–32.
 21. *Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н.* Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. М.: Научный мир, 2007. 172 с.
 22. База Данных «Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) с древнейших времен по 2000 г. Составитель А.А. Годзиковская. Мировой Центр Данных Б по физике твердой Земли, Геофизический Центр Российской академии наук.
<http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/catrudat.html>.

23. *Байкулов С.К.* О возможности кластеризации крупных сейсмических событий на территориях Чуйской и Суусамырской впадин // Вестник Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2019. № 2 (14). С. 22–26.
24. *Березко А.Е., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Рыбкина А.И., Лебедев А.Ю.* Интеллектуальная ГИС «Данные наук о Земле по территории России» // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2010. С. 210–218.
25. *Березко А.Е., Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Жалковский Е.А., Красноперов Р.И., Смагин С.А., Болотский Э.С.* Интеллектуальная географическая информационная система «Данные наук о Земле по территории России» // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 32–40.
26. *Богоутдинов Ш.Р.* Алгоритмы нечеткой логики при интерпретации геолого-геофизических данных // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М.: ИФЗ РАН, 2007. 139 с.
27. *Богоутдинов Ш.Р., Агаян С.М., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Родкин М.В., Злотники Ж., Ле Муэль Ж.* Алгоритмы нечеткой логики в анализе электротеллурических данных в связи с мониторингом вулканической активности // Физика Земли. 2007. № 7. С. 72–85.
28. *Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Соловьев А.А., Кин Э.* Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. I. Выбросы на магнитограммах всемирной сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. 2010. № 11. С. 99–112.
29. *Бонгард М.М.* Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
30. *Бонгард М.М., Вайнцвайг М.Н., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Смирнов М.С.* Использование обучающейся программы для выявления нефтеносных пластов // Геология и геофизика. 1966. №6 (II). С. 15–29.
31. *Буслов М.М., Джесен Х., Травин А.В., Отгонбаатар Д., Куликова А.В.,*

- Чен Минг, Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек Е.Э., Трофимова Д.А.* Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1600–1627.
- 32.** *Бхатия С.С., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Рао М.Н., Филимонов М.Б., Четти Т.Р.К.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVIII. Гималаи, ($M \geq 6.5$) // Вычислительная сейсмология. Вып. 25. Проблемы прогноза землетрясений и интерпретация сейсмологических данных. М.: Наука, 1992. С. 71–83.
- 33.** *Бхатия С.С., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Рао М.Н., Филимонов М.Б., Четти Т.Р.К., Шток Н.В.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIX. Гималаи, $M \geq 7.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 27. Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука, 1994. С. 280–287.
- 34.** *Вайнцвайг М.Н.* Алгоритм обучения распознаванию образов «Кора» // В кн.: Алгоритмы обучения распознаванию образов. М.: Сов. Радио, 1973. С. 8–12.
- 35.** *Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ламбер С., Ранцман Е.Я., Саллантен Ж., Сальдано А., Соловьев А.А.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мест возможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // Вычислительная сейсмология. Вып. 18. Теория и анализ сейсмической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1985. С. 139–154.
- 36.** *Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кушнир А.Ф., Писаренко В.Ф., Систернас А., Трусов А.В., Цванг М.Л., Цванг С.Л.* О классификации высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1986. № 12. С. 3–16.
- 37.** *Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Ламбер С., Соловьев А.А., Трусов А.В.* Распознавание мест возможного возникновения сильных

- землетрясений. XIII. Неотектоническая схема Западных Альп. $M \geq 5.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 19. Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1986. С. 82–94.
- 38.** Вебер К., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. Морфоструктурные ленимаменты и сильные землетрясения Западных Альп // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1981. С. 67–73.
- 39.** Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Жидков М.П. Формализованное морфоструктурное районирование горного пояса Анд // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1981. С. 38–56.
- 40.** Габриэлов А.М., Горшков В.И., Ранцман Е.Я. Опыт морфоструктурного районирования по формализованным признакам // Вычислительная сейсмология. Вып. 10. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1977. С. 50–58.
- 41.** Гвишиани А.Д. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. I. Юго-Восточная Европа и Малая Азия // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1982. № 8. С. 13–19.
- 42.** Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 26–31.
- 43.** Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Математические методы геоинформатики. I. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002. Т. 38. № 2. С. 104–122.
- 44.** Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 1. С. 101–105.

45. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж. Алгоритмы нечеткой логики в задачах выделения аномалий на временных рядах // Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. Ответственный редактор: А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2003. С. 257–262.
46. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008. Т. 44. № 3. С. 3–18.
47. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Гравитационное сглаживание временных рядов // Труды Института математики и механики УрО РАН. 2011. Т. 17. № 2. С. 62–70.
48. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Леденев А.В., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики II. Алгоритмы нечеткой логики в задачах выделения аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2003. Т. 39. № 4. С. 103–111.
49. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2010. № 2. С. 109–125.
50. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзобоев Б.А. FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662380. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 октября 2018 г.
51. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзобоев Б.А. FCAZm (Formalized Clustering And Zoning modified). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662143. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27 сентября 2018 г.

52. *Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О.* «Барьер». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662385. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 октября 2018 г.
53. *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. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 октября 2018 г.
54. *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.
55. *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.
56. *Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р.* Геоинформационные технологии: методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. 2008. № 2. С. 3–14.
57. *Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Прогноз мест возникновения сильных землетрясений // В кн.: Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. С. 45–47.
58. *Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Жидков М.П., Раницман Е.Я., Трусов А.В.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XV. Морфоструктурные узлы Большого Кавказа, $M \geq 5.5$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 20. Численное

- моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1987. С. 136–148.
59. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г. Распознавание высокосейсмичных зон в Пиренеях // Доклады Академии наук СССР. 1987. Т. 292. № 1. С. 56–59.
60. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ранцман Е.Я. Морфоструктуры и места землетрясений Большого Кавказа // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1986. № 9. С. 45–55.
61. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Систернас А., Филип Э. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIV. Пиренеи и Альпы, $M \geq 5.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 20. Численное моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1987. С. 123–135.
62. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
63. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVI. Общие критерии умеренной сейсмичности четырех регионов Средиземноморской области ($M \geq 5.0$) // Вычислительная сейсмология. Вып. 21. Проблемы сейсмологической информатики / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1988. С. 211–221.
64. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Двойственные системы множеств и их приложения // Известия Академии наук СССР. Техническая Кибернетика. 1983. № 4. С. 31–39.
65. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука, 1992. 360 с.
66. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. I. Условия стабильности для прогноза мест сильных

- землетрясений // Вычислительная сейсмология. Вып. 16. Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1983. С. 70–88.
67. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. II. Стабилизирующие множества и локальная стабильность прогноза мест сильных землетрясений // Вычислительная сейсмология. Вып. 17. Логические и вычислительные методы в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1984. С. 29–36.
68. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. II. Восток Средней Азии // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1982. № 9. С. 30–38.
69. Гвишиани А.Д., Гурвич В.А., Расцветаев А.Л. Динамические задачи распознавания образов. III. Исследование стабильности прогноза мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского подвижного пояса // Вычислительная сейсмология. Вып. 18. Теория и анализ сейсмологической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1985. С. 117–127.
70. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
71. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
72. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
73. Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М., Белов И.О., Николова Ю.И. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений

- морфоструктурных линеаментов на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Вулканология и Сейсмология. 2021. № 2. DOI: 10.31857/S0203030621020036. (в печати).
74. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
75. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
76. Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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.
77. Гвишиани А.Д., Диаман М., Михайлов В.О., Гальдеано А., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Граева Е.М. Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. 2002. № 7. С. 13–28.
78. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1984. № 1. С. 20–33.
79. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. X. Места землетрясений магнитуды $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1982. С. 56–67.

80. Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Распознавание мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса ($M \geq 8.2$) // Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1980. С. 30–43.
81. Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Исследование мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса с помощью алгоритмов распознавания // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1978. № 8. С. 31–42.
82. Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Распознавание мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса ($M \geq 8.2$) // Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1980. С. 30–43.
83. Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринев В.Н., Вавилин Е.В. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинатике // Физика Земли. 2019. № 1. С. 42–60. DOI: 10.31857/S0002-33372019142-60.
84. Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. К обоснованию результатов прогноза мест сильных землетрясений, полученных методами распознавания // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1981. № 2. С. 21–36.
85. Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. О выборе магнитуды для классификации мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Вычислительная сейсмология. Вып. 15. Прогноз землетрясений и изучение строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1983. С. 74–80.
86. Гвишиани А.Д., Саллантен Ж., Сальдано А., Систернас А., Соловьев А.А. Результаты советско-французских исследований по распознаванию высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 275. № 6. С. 1353–1358.

87. *Гвишиани А.Д., Соловьев А.А.* Исследование мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Доклады Академии наук СССР. 1981. Т. 256. № 5. С. 1089–1093.
88. *Гвишиани А.Д., Соловьев А.А.* К решению задачи прогноза мест возникновения сильных землетрясений на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1982. № 1. С. 86–87.
89. *Гвишиани А.Д., Соловьев А.А.* О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейментов на территории Южной Америки // Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1980. С. 46–50.
90. *Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзедобоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: 10.31857/S0002333720010044.
91. *Гвоздецкий Н.А.* Кавказ. М.: Гос. изд-во географической лит-ры, 1963. 260 с.
92. *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы // Вычислительная сейсмология. Вып. 7. Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1974. С. 3–40.
93. *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я.* Опыт переноса критериев высокой сейсмичности со Средней Азии на Анатолию и смежные регионы // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 327–330.
94. *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И.,*

- Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. III. Случай, когда границы дизъюнктивных узлов неизвестны // *Вычислительная сейсмология. Вып. 7. Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1974. С. 41–64.*
- 95.** *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М.* Определение критериев высокой сейсмичности с помощью алгоритмов распознавания // *Вестник МГУ. 1973. № 5. С. 78–84.*
- 96.** *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // *Вычислительная сейсмология. Вып. 6. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1973. С. 107–133.*
- 97.** *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я.* О критериях высокой сейсмичности // *Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.*
- 98.** *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф.С., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // *Вычислительная сейсмология. Вып. 9. Исследование сейсмичности и моделей Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1976. С. 3–91.*
- 99.** *Герасимов И.П.* Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР // *В кн.: Проблемы физической географии. Т. 12. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 33–46.*
- 100.** *Герасимов И.П., Ранцман Е.Я.* Морфоструктура горных стран и их сейсмичность // *Геоморфология. 1973. № 1. С. 3–18.*
- 101.** *Годзиковская А.А., Сергеева Н.А., Забаринская Л.П.* Региональные

- каталоги землетрясений России // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 58–62.
- 102.** Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38.
- 103.** Горшков А.И. Использование результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений для задач сейсморайонирования (на примере Кавказа) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 207–216.
- 104.** Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе // Вычислительная сейсмология. Вып. 40. Алгоритмы прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: КРАСАНД, 2010. 472 с.
- 105.** Горшков А.И., Жидков М.П., Ранцман Е.Я., Тумаркин А.Г. Морфоструктура Малого Кавказа и места землетрясений, $M \geq 5.5$ // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1991. № 6. С. 30–38.
- 106.** Горшков А.И., Зелевинский А.В., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XI. Западные Альпы, $M \geq 5.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 15. Прогноз землетрясений и изучение строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1982. С. 67–73.
- 107.** Горшков А.И., Кандоба И.Н., Сафронович Е.Л., Сладков И.В. Автоматизированный анализ геолого-геофизической информации при морфоструктурном районировании // Вычислительная сейсмология. Вып. 30. Вопросы геодинамики и сейсмологии. 1998. С. 336–347.
- 108.** Горшков А.И., Капуто М., Кейлис-Борок В.И., Офицерова Е.И., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IX. Италия. $M \geq 6.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 12. Теория и анализ

сейсмологических наблюдений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1979. С. 3–17.

109. Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание мест сильных землетрясений ($M \geq 6.0$) в Каспийском регионе: Копетдаг-Аладаг-Биналуд // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 1. С. 29–38.
110. Горшков А.И., Пиотровская Е.П., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XXX. Туркмено-Хорасанские горы, $M \geq 6.5$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 33. Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности. 2002. С. 129–140.
111. Горшков А.И., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений $M \geq 6.0$ в горных поясах Средиземноморья // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 71–80.
112. Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 21–27. DOI: 10.7868/S0203030617060025.
113. Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335. DOI: 10.7868/S0869565218090219.
114. Горшков В.И., Кособоков В.Г., Ранцман Е.Я., Соловьев А.А. Проверка результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений с 1972 по 2000 год // Вычислительная сейсмология. Вып. 32. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. 2001. С. 48–57.
115. Губерман Ш.А., Жидков М.П., Ранцман Е.Я. Сейсмоактивные широты и поперечные морфоструктурные линеаменты горного пояса Анд // Вычислительная сейсмология. Вып. 16. Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных / Под ред.

Кейлис-Борока В.И. М., 1983. С. 68–70.

116. *Гурвич В.А., Кособоков В.Г.* О связи вулканизма и перепада высот с эпицентрами сильнейших землетрясений // Вычислительная сейсмология. Вып. 16. Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1983. С. 88–93.
117. *Девяткин Е.В.* Внутренняя Азия. В кн.: Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. Ред. *А.Ф. Грачев.* М.: Издательство «Пробел», 2000. С. 92–100.
118. *Девяткин Е.В.* Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. М.: Наука, 1965. 242 с.
119. *Деренюк Д.Н.* Геологические признаки сейсмичности юго-западной части Азовского моря и Керченского полуострова // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2006. № 1. С. 118–124.
120. *Джурик В.И., Севостьянов В.В., Потапов В.А. и др.* Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 223 с.
121. *Дзедобоев Б.А.* SARD (Seismic Activity monitoring by Discrete mathematical analysis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661961. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2017 г.
122. *Дзедобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М.* «Барьер-3». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661165. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 августа 2019 г.
123. *Дзедобоев Б.А.* Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М.: ИФЗ РАН, 2014. 132 с.

124. Дзедобоев Б.А. Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М.: ИФЗ РАН, 2014. 27 с.
125. Дзедобоев 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.
126. Дзедобоев 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.
127. Дзедобоев 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.
128. Дзедобоев Б.А., Красноперов Р.И., Белов И.О., Барыкина Ю.И., Вавилин Е.В. Модифицированная алгоритмическая система FCAZm и зоны возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2018. № 2. С. 2–8.
129. Дзеранов Б.В. Детальное сейсмическое районирование и построение вероятностных карт сейсмической опасности: на примере территории Республики Северная Осетия-Алания. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М.: ИФЗ РАН, 2012. 153 с.
130. Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 4. С. 469–499.
131. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой

- зоны // Физическая механика. 2005. Т. 8. № 1. С. 49–64.
- 132.** *Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И.* Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 20–30.
- 133.** *Желиговский В.А., Шварц С.* О структуре классификаций, распознаваемых алгоритмом «Кора-*n*» // Вычислительная сейсмология. Вып. 31. Проблемы динамики и сейсмичности Земли. 2000. С. 290–321.
- 134.** *Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на пересечениях линеаментов Памира и Тянь-Шаня // В кн.: Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. М.: Наука, 1980. С. 63–69.
- 135.** *Жидков М.П., Кособоков В.Г.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VIII. Пересечения линеаментов Востока Средней Азии // Вычислительная сейсмология. Вып. 11. Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1978. С. 48–71.
- 136.** *Жидков М.П., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IV. Высокосейсмичные пересечения Армянского нагорья, Балкан и бассейна Эгейского моря // Вычислительная сейсмология. Вып. 8. Интерпретация данных сейсмологии и неотектоники / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1975. С. 53–70.
- 137.** *Жидков М.П., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVII. Общие критерии высокой сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки // Вычислительная сейсмология. Вып. 23. Компьютерный анализ геофизических полей. М.: Наука, 1990. С. 274–284.
- 138.** *Заалишвили В.Б.* Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. Владикавказ: ВНЦ РАН, 1997. 76 с.

139. *Заалишвили В.Б.* Основы сейсмического микрорайонирования. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Владикавказ: ВНЦ РАН, 2006. 241 с. ISBN: 5-93000-038-7.
140. *Заалишвили В.Б.* Сейсмическая опасность и сейсмический риск территории. Управление сейсмическим риском // Природные ресурсы Республики Северная Осетия-Алания / Отв. ред. В.С. Вагин; Комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды РСО-Алания. Владикавказ: Проект-Пресс, 2005. С. 20–48.
141. *Заалишвили В.Б.* Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. Учебное пособие. М.: Наука, 2009. 350 с. ISBN: 978-5-02-034128-9.
142. *Заалишвили В.Б.* Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ИФЗ РАН, 2000. 367 с. ISBN: 5-201-11892-5. Ответственный редактор: *Страхов В.Н.*
143. *Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В.* Детальное сейсмическое районирование и построение вероятностных карт сейсмической опасности (на примере территории Республики Северная Осетия-Алания). Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2014. 139 с.
144. *Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф.* Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт // Геология и геофизика Юга России. 2011. № 1. С. 48–58.
145. *Заалишвили В.Б., Рогожин Е.А.* Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального районирования и сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 3. С. 31–43.
146. *Захаров В.С.* Современные вертикальные движения земной коры // Современные глобальные изменения природной среды. Том 1, раздел 8.3. М.: Научный мир, 2006. С. 626–643.
147. Землетрясения в СССР в ... году (ежегодники 1962 – 1991 гг.). М.: Наука, 1964–1997.

148. Землетрясения Северной Евразии, ... год (ежегодники 1992 – 2010 гг.). Обнинск: ГС РАН, 1997–2016.
149. Землетрясения Северной Евразии, 2004. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 9.
150. *Зятыкова Л.К.* Структурная геоморфология Алтае-Саянской Горной области. Новосибирск: Наука, 1977. 215 с.
151. *Иогансон Л.И.* Живая сдвиговая тектоника при алтайском землетрясении 27 сентября 2003 г. // Геофизические исследования. 2005. № 2. С. 116–123.
152. *Казанцев Ю.В.* Тектоника Крыма. М.: Наука, 1982. 112 с.
153. Камчатский филиал Геофизической службы РАН. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов. <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.
154. Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть). Масштаб 1 : 10 000 000. М., 1986.
155. *Кейлис-Борок В.И.* Сейсмология и логика // Вычислительная сейсмология. Вып. 4. Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1968. С. 317–350.
156. *Ким Чун Ун, Андреева М.Ю.* Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737 – 2005 гг.). Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. 126 с.
157. *Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А., Вандышева Н.В.* О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990) // В сборнике «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии». М.: ИФЗ, 1993. Вып. 1. С. 70–79.
158. *Кособоков В.Г.* Общие свойства мест сильнейших землетрясений (с $M \geq 8.2$) внеальпийской зоны трансасиатского сейсмического пояса // Вычислительная сейсмология. Вып. 17. Логические и вычислительные методы в сейсмологии / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1984. С. 69–

71.

- 159.** *Кособоков В.Г.* Опыт переноса критериев высокой сейсмичности ($M \geq 8.2$) с Тихоокеанского пояса на Альпийский // Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1980. С. 44–46.
- 160.** *Кособоков В.Г.* Распознавание мест сильных землетрясений востока Средней Азии и Анатолии методом Хемминга // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1981. С. 76–81.
- 161.** *Кособоков В.Г., Некрасова А.К.* Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 1. С. 65–76.
- 162.** *Кособоков В.Г., Ротвайн И.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VI. Магнитуда $M \geq 7.0$ // Вычислительная сейсмология. Вып. 10. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1977. С. 3–18.
- 163.** *Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Анализ расположения эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$ относительно пересечения морфоструктурных лениаментов Востока Средней Азии // Вычислительная сейсмология. Вып. 14. Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. *Кейлис-Борока В.И.* М., 1981. С. 74–76.
- 164.** *Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. Вып. 4. С. 53–88. DOI: 10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90.
- 165.** *Кряжимский А.В., Максимов В.И., Осипов Ю.С.* О позиционном моделировании в динамических системах // Прикладная математика и механика. 1983. Т. 47. № 6. С. 883–890.
- 166.** *Кряжимский А.В., Осипов Ю.С.* О моделировании управления в динамической системе // Известия Академии наук СССР. Техническая

- кибернетика. 1983. № 2. С. 51–60.
- 167.** Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962 – 2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64.
- 168.** Лилиенберг Д.А., Широков Н.Ш. Современные тектонические движения // Общая характеристика и история развития рельефа Кавказа. М.: Наука, 1977. С. 45–59.
- 169.** Лукина Н.В. Активные разломы и сейсмичность Алтая // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 11. С. 71–74.
- 170.** Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Середкина А.И. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w=6.3$ на юге Байкала: напряженно-деформированное состояние очаговой области по данным об афтершоках // Физика Земли. 2013. № 4. С. 120–134. DOI: 10.7868/S0002333713040078.
- 171.** Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А. Пространственно-временные закономерности развития крупных сейсмических активизаций (1999–2007 гг.) в Северном Прибайкалье // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 1. С. 119–134. DOI: 10.15372/GiG2019103.
- 172.** Методические рекомендации по детальному сейсмическому районированию // Вопросы инженерной сейсмологии. 1986. Вып. 27. С. 184–212.
- 173.** Методические рекомендации по сейсмическому районированию территории СССР. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. 195 с.
- 174.** Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: Изд-во МГУ, 1996. 448 с.
- 175.** Милановский Е.Е. Новейшая тектоника // Общая характеристика и история развития рельефа Кавказа. М.: Наука, 1977. С. 31–45.
- 176.** Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
- 177.** Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. МГУ, 1963.

- 178.** *Миронов В.А., Перетокин С.А., Симонов К.В., Курако М.А.* Алгоритмы вероятностного анализа сейсмической опасности // Труды Международной конференции «Марчуковские научные чтения – 2019». Новосибирск, 2019. С. 333–338. DOI: 10.24411/9999-016А-2019-10053.
- 179.** *Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринев В.Н.* Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. № 3. С. 232–243.
- 180.** *Некрасова А.К., Кособоков В.Г.* Общий закон подобия для землетрясений: Крым и Северный Кавказ // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 4. С. 468–470. DOI: 10.7868/S0869565216280161.
- 181.** *Николова Ю.И., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Дзедобоев Б.А.* Веб-ориентированная геоинформационная система многокритериальной оценки сейсмической опасности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619516. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 18 июля 2019 г.
- 182.** *Новикова О.В., Горшков А.И.* Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линеаментов Черноморско-Каспийского региона // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 23–31. DOI: 10.1134/S020303061806007X.
- 183.** Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- 184.** *Овсяченко А.Н., Бутанаев Ю.В., Кужугет К.С.* Палеосейсмологические исследования сейсмотектонического узла на юго-западе Тувы // Вестник ОНЗ РАН. 2016. Т. 8. NZ12001. DOI: 10.2205/2016NZ000128.
- 185.** *Овсяченко А.Н., Трофименко С.В., Мараханов А.В., Карасев П.С., Рогожин Е.А.* Сейсмотектоника переходной области от байкальской

- рифтовой зоны к орогенному поднятию станового хребта // Геотектоника. 2010. № 1. С. 29–51.
- 186.** *Пинегина Т.К., Константинова Т.Г.* Землетрясение в Корякии // Природа. 2006. № 9. С. 57–62.
- 187.** *Полухтович Б.М., Попадюк И.В., Самарский А.Д., Хныкин В.И.* Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности юго-западной части Индоло-Кубанского прогиба // Геология нефти и газа. 1981. № 1. С. 43–77.
- 188.** *Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М., Гусева Т.В., Мишин А.В., Надария М., Рогожин Е.А., Розенберг Н.К., Сквородкин Ю.П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р.* Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GSP технологии // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
- 189.** *Раковец О.А.* Новейшая тектоника Алтае-Саянской области // В сб.: Региональная неотектоника Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 44–51.
- 190.** *Ранцман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 172 с.
- 191.** *Ранцман Е.Я., Гласко М.П.* Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-Пресс, 2004. 224 с.
- 192.** *Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
- 193.** *Ризниченко Ю.В.* От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1965. № 11. С. 1–13.
- 194.** *Ризниченко Ю.В.* Расчет сотрясаемости точек земной поверхности от землетрясений в окружающей области // Известия Академии наук СССР. Физика Земли. 1966. № 5. С. 16–32.
- 195.** *Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмоструктоники / Отв. ред.

- А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.
- 196.** *Рогожин Е.А., Вигинский В.А., Короновский Н.А.* Кавказ // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. Ред. А.Ф. Грачев. М.: Пробел, 2000. С. 66–79.
- 197.** *Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В.* Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении // Геотектоника. 2015. № 2. С. 36–49. DOI: 10.7868/S0016853X15020058.
- 198.** *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В.* Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // Физика Земли. 2008. № 6. С. 31–51.
- 199.** *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С.* Геологические проявления Тувинских землетрясений 2011 – 2012 гг. // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463. № 2. С. 216–220.
- 200.** *Рогожин Е.А., Платонова С.Г.* Очаговые зоны сильных землетрясений горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 130 с.
- 201.** *Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Иогансон Л.И.* Оценка сейсмического потенциала Большого Кавказа и Апеннин независимыми методами // Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики: Избранные научные труды под редакцией академика В.Н. Страхова. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 279–300.
- 202.** *Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелев М.Г., Кале Э., Девершер Ж.* Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 424. № 5. С. 664–668.
- 203.** Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 192 с.
- 204.** Сейсмическое районирование территории СССР. Методические

- основы и региональное описание карты 1978 г. М.: Наука, 1980. 308 с.
Ответственные редакторы: *В.И. Бунэ, Г.П. Горшков.*
- 205.** *Соловьев А.А., Новикова О.В., Горшков А.И., Пиотровская Е.П.* Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 5. С. 599–601. DOI: 10.7868/S0869565213170222.
- 206.** *Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В.* Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0002333714020112.
- 207.** *Соловьев Ал.Ан., Горшков А.И., Соловьев Ан.Ал.* Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21–27. DOI: 10.7868/S0002333716050148.
- 208.** *Соловьев А.А.* Методы распознавания аномальных событий на временных рядах в анализе геофизических наблюдений. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: ИФЗ РАН, 2014. 310 с.
- 209.** *Соловьев А.А., Агаян С.М., Гвишиани А.Д., Богоутдинов Ш.Р., Шульья А.* Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. II. Выбросы на секундных магнитограммах // Физика Земли. 2012. № 5. С. 37–52.
- 210.** *Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Николов Б.П., Жарких Ю.И., Агаян С.М.* Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики // Исследование земли из космоса. 2018. № 2. С. 65–76. DOI: 10.7868/S0205961418020070.
- 211.** *Соловьев Ан.Ал., Соловьев Ал.Ан., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзэбоев Б.А.,*

- Николов Б.П.* Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619517. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 18 июля 2019 г.
- 212.** *Соловьев Ан.Ал., Соловьев Ал.Ан., Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г., Некрасова А.К., Горшков А.И., Николова Ю.И., Дзедобоев Б.А., Николов Б.П.* ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки сейсмической опасности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019621466. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2019 г.
- 213.** *Соловьёв Ан.Ал., Шур Д.Ю., Гвишиани А.Д., Михайлов В.О., Тихоцкий С.А.* Определение вектора магнитного момента при помощи кластерного анализа результатов локальной линейной псевдоинверсии аномалий ΔT // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404. № 1. С. 109–112.
- 214.** *Соловьев Ан.Ан., Соловьев Ал.Ан., Гвишиани А.Д., Николов Б.П., Николова Ю.И.* ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 52–64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.
- 215.** *Спичак В.В.* Выделение потенциальных очагов землетрясений по геофизическим данным // Физика Земли. 2016. № 1. С. 47–58. DOI: 10.7868/S0002333716010099.
- 216.** *Ту Дж., Гонсалес Р.* Принципы распознавания образов. М.: Мир. 1978. 411 с.
- 217.** *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд // М.: Наука, 1972. 117 с.
- 218.** *Федотов С.А., Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 – VIII 2018 гг.; особенности

сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких Охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7, 7.7$ и 8.3 // Вулканология и Сейсмология. 2015. № 2. С. 3–19. DOI: 10.7868/S0203030615020029.

219. *Фихтенгольц Г.М.* Основы математического анализа. 2015. Ч. 1 – 448 с., Ч. 2 – 464 с.
220. *Хаин В.Е.* Новые данные по геологии Предкавказья и их значение для геологии Кавказа // Доклады Академии наук СССР. 1953. Т. 90. № 2. С. 132–133.
221. *Хаин В.Е., Лимонов А.Ф.* Региональная геотектоника (тектоника континентов и океанов). Тверь, 2004. 270 с.
222. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
223. *Хаин В.Е., Попков В.И., Воскресенский И.А., Короновский Н.В., Левин Л.Э., Мирзоев Д.А., Пирбудагов В.М., Сенин Б.В., Юдин В.В.* Тектоника южного обрамления Восточно-Европейской платформы // Объяснительная записка к тектонической карте Черноморско-Каспийского региона. Масштаб 1:2 500 000. Краснодар: Кубн. гос. ун-т, 2009. 213 с.
224. *Хритова М.А., Гилева Н.А.* Кластерный анализ как средство изучения сейсмического режима Прибайкалья // Геоинформатика. 2017. № 2. С. 39–47.
225. *Шебалин Н.В.* Сильные землетрясения. Избранные труды. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 542 с.
226. *Эртельева О.О., Антикаев Ф.Ф.* Что такое детальное сейсмическое районирование? // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 63–68.
227. *Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
228. *Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Dobrovolsky M.N.* Discrete perfect sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis.

2014. Vol. 50. Is. 2. P. 176–190. DOI: 10.1007/s10559-014-9605-9.
- 229.** *Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Gvishiani A.D., Kagan A.I.* Smoothing of time series by the methods of discrete mathematical analysis // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2010. Vol. 11. RE40001. DOI: 10.2205/2009ES000436.
- 230.** *Al-Ahmadi K., Al-Amri A., See L.* A spatial statistical analysis of the occurrence of earthquakes along the Red Sea floor spreading: clusters of seismicity // Arabian Journal of Geosciences. 2014. Vol. 7. Is. 7. P. 2893–2904. DOI: 10.1007/s12517-013-0974-6.
- 231.** *Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E.* Formal morphostructural zoning of mountain territories // Geophysics. 1977. 42 (2). P. 227–233.
- 232.** *Anderson J.G., Brune J.N., Purvance M., Biasi G., Anooshehpour A.* Benefits of the use of precariously balanced rocks and other fragile geological features for testing the predictions of probabilistic seismic hazard analysis // In: *Faber M.H., Kehler J., Nishijima K.* (Eds.) Applications of statistics and probability in civil engineering. 2011. Taylor & Francis, London. P. 744–752.
- 233.** *Aslam B., Naseer F.* A statistical analysis of the spatial existence of earthquakes in Balochistan: clusters of seismicity // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79. Is. 1. 41. DOI: 10.1007/s12665-019-8790-2.
- 234.** *Atkinson G.M.* The Integration of Emerging Trends in Engineering Seismology // 13th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal (September 24–28, 2012). Lisbon, 2012.
- 235.** *Barbot S., Hamiel Y., Fialko Y.* Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 *M*_w 7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. Is. B3. B03403. DOI: 10.1029/2007JB005063.
- 236.** *Bazzurro P., Cornell C.A.* Disaggregation of seismic hazard // Bulletin of the

- Seismological Society of America. 1999. Vol. 89. Is. 2. P. 501–520.
- 237.** *Bommer J.J., Abrahamson N.A.* Why do modern probabilistic seismic hazard analyses often lead to increased hazard estimates? // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96. Is. 6. P. 1967–1977. DOI: 10.1785/0120060043.
- 238.** *Boore D.M., Atkinson G.M.* Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s // *Earthquake Spectra*. 2008. Vol. 24. Is. 1. DOI: 10.1193/1.2830434.
- 239.** *Burtiev R.* Evaluation of seismic hazards from several seismic zones // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2012. Vol. 11. № 12. P. 2141–2150.
- 240.** *Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzmsn E., Rotvain I., Soloviev A.* Pattern recognition of Earthquake-prone areas in Italy // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1980. Vol. 21. Is. 4. P. 305–320. DOI: 10.1016/0031-9201(80)90135-1.
- 241.** *Castaños H., Lomnitz C.* PSHA: is it science? // *Engineering Geology*. 2002. Vol. 66. Is. 3–4. P. 315–317.
- 242.** *Cisternas A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A., Kosobokov V., Lambert M., Ranzman E., Sallantin J., Saldano H., Soloviev A., Weber C.* A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the Western Alps // *Annales Geophysicae*. 1985. Vol. 3. Is. 2. P. 249–270.
- 243.** *Cornell C.A.* Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968. Vol. 58. Is. 5. P. 1583–1606.
- 244.** *Dorbath C., Van der Woerd J., Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.Y.* Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 M_w 7.2 Gorny Altay earthquake (Russia) // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2008. Vol. 98. Is. 6. P. 2849–2865. DOI: 10.1785/0120080166.
- 245.** *Dubois J., Gvishiani A.* Dynamic Systems and Dynamic Classification

Problems in Geophysical Applications. Paris: Springer-Verlag, 1998. 256 p.
DOI: 10.1007/978-3-642-49951-7.

- 246.** *Dzeboev B., Dzeranov B., Pasishnichenko M.* Recognition of Strong Earthquake-Prone Areas with a Single Learning Class. Caucasus, $M \geq 6.0$ // Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere / Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. (в печати).
- 247.** *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.
- 248.** *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.
- 249.** *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.
- 250.** *Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. Vol. 86. Is B4. 1981. P. 2825–2852. DOI: 10.1029/JB086iB04p02825.
- 251.** *Gelfand I.M., Guberman Sh., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I., Ranzman E.Ia.* Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // Tectonophysics. 1972. Vol. 13. Is. 1–4. P. 415–422. DOI: 10.1016/0040-1951(72)90031-5.
- 252.** *Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman E.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M.* Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1976. Vol. 11. Is. 3. P. 227–283.

- 253.** *Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A.* Recognition of earthquake-prone areas / Eds. *Keilis-Borok V., Soloviev A.* Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer: Heidelberg, 2003. P. 239–310. DOI: 10.1007/978-3-662-05298-3_6.
- 254.** *Gorshkov A., Novikova O.* Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap // *Acta Geophysica*. 2018. Vol. 66. Is. 5. P. 843–853. DOI: 10.1007/s11600-018-0177-3.
- 255.** *Gorshkov A., Novikova O., Parvez I.A.* Recognition of earthquake-prone areas in the Himalaya: validity of the results // *International Journal of Geophysics*. 2012. DOI: 10.1155/2012/419143.
- 256.** *Gorshkov A.I., Kuznetsov I.V., Soloviev A.A., Panza G.F.* Identification of future earthquake sources in the Carpatho-Balkan orogenic belt using morphostructural criteria // *Pure and Applied Geophysics*. 2000. Vol. 157. Is. 1–2. P. 79–95. DOI: 10.1007/PL00001101.
- 257.** *Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A.* Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2002. Vol. 4. Is. 1. P. 1–24.
- 258.** *Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A.* Recognition of the strong earthquake-prone areas ($M \geq 6.0$) within the mountain belts of Central-Europe // *Revue Roumaine de Geophysique*. 2003. Vol. 47. P. 30–41.
- 259.** *Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Jiménez M.J., García-Fernández M., Panza G.F.* Recognition of earthquake-prone areas ($M \geq 5.0$) in the Iberian Peninsula // *Rendiconti Lincei*. 2010. Vol. 21. Is. 2. P. 131–162. DOI: 10.1007/s12210-010-0075-3.
- 260.** *Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Panza G.F., Aoudia A.* Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // *Societa Geologica Italiana. Bollettino*. 2004. Vol. 123. Is. 1. P. 3–18.
- 261.** *Grant W.E., Pedersen E.K., Martin S.L.* Ecology and Natural Resource

- Management: Systems Analysis and Simulation. Wiley, 1997. 373 p.
- 262.** *Gvishiani A.* Systems Analysis as Next-generation Mathematical Platform For Data-driven Science // CODATA 2019: Towards next-generation data-driven science: policies, practices and platforms. Beijing, China. 19–20 September 2019.
- 263.** *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.
- 264.** *Gvishiani A., Dubois J.* Artificial Intelligence and Dynamic Systems for Geophysical Applications. Springer-Verlag, Paris. 2002. 350 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04933-4.
- 265.** *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. Springer, Singapore. 2020. P. 9–24. DOI: 10.1007/978-981-15-4320-3_2.
- 266.** *Gvishiani A., Gorshkov A., Kosobokov V., Cisternas A., Philip H., Weber C.* Identification of seismically dangerous zones in the Pyrenees // Annales Geophysicae. 1987. Vol. 5. Is. 6. P. 681–690.
- 267.** *Gvishiani A.D.* Prevision des tremblements de terre et stabilite de la classification // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1982. Vol. 294. Serie 11. P. 749–752. Presentee par Jean Coulomb.
- 268.** *Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Graeva E.M., Zlotnicki J., Bonnin J.* Recognition of anomalies from time series by fuzzy logic methods // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2008. Vol. 10. ES1001. DOI: 10.2205/2007ES000278.
- 269.** *Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Tikhotsky S.A., Hinderer J., Bonnin J., Diamant M.* Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies // System Research & Information Technologies.

2004. № 3. P. 7–16.

- 270.** *Gvishiani A.D., Soloviev A.A.* Recognition of places on the Pacific coast of the South America where strong earthquakes may occur // *Earthquake Prediction Research*. 1984. № 2. P. 237–243.
- 271.** <http://moho.ess.ucla.edu/~werner/FORECASTS/index.html> [дата обращения: 29.09.2018].
- 272.** <http://www.isc.ac.uk/isc-ehb/search/catalogue/>.
- 273.** <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>.
- 274.** <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- 275.** <https://ru.wikipedia.org>.
- 276.** <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=937821>.
- 277.** International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). iiasa.ac.at. [дата обращения: 01.07.2020]
- 278.** *Kijko A.* Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis // *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Springer, 2011. P. 1–27.
- 279.** *Konstantaras A.J., Katsifarakis E., Maravelakis E., Skounakis E., Kokkinos E., Karapidakis E.* Intelligent Spatial-Clustering of Seismicity in the Vicinity of the Hellenic Seismic Arc // *Earth Science Research*. 2012. Vol. 1. Is. 2. P. 1–10. DOI: 10.5539/esr.v1n2p1.
- 280.** *Krinitzsky E.L.* How to combine deterministic and probabilistic methods for assessing earthquake hazards // *Engineering Geology*. 2003. Vol. 70. Is. 1–2. P. 157–163. DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00269-7.
- 281.** *Kulchinsky R.G., Kharin E.P., Shestopalov I.P., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R.* Fuzzy logic methods for geomagnetic events detections and analysis // *Russian Journal of Earth Sciences (RJES)*. 2010. Vol. 11. RE4003. DOI: 10.2205/2009ES000371.
- 282.** *La Mura C., Yanovskaya T.B., Romanelli F., Panza G.F.* Three-dimensional seismic wave propagation by modal summation: method and validation // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168. Is. 1–2. P. 201–216. DOI: 10.1007/s00024-010-0165-2.

- 283.** *Mäntyniemi P., Tatevossian R.E., Tatevossian T.N.* Uncertain historical earthquakes and seismic hazard: theoretical and practical considerations // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2014. Vol. 5. Is. 1. P. 1–6. DOI: 10.1080/19475705.2012.751633.
- 284.** *Matoza R.S., Shearer P.M., Lin G., Wolfe C.J., Okubo P.G.* Systematic relocation of seismicity on Hawaii Island from 1992 to 2009 using waveform cross correlation and cluster analysis // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. Is. 5. P. 2275–2288. DOI: 10.1002/jgrb.50189.
- 285.** *McGuire R.K.* Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1995. Vol. 85. Is. 5. P. 1275–1284.
- 286.** *Mignan A., Werner M.J., Wiemer S., Chen C.-C., Wu Y.-M.* Bayesian estimation of the spatially varying completeness magnitude of earthquake catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. Vol. 101. Is. 3. P. 1371–1385. DOI: 10.1785/0120100223.
- 287.** *Mignan A., Woessner J.* Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. 2012. DOI: 10.5078/corssa-00180805.
- 288.** *Mikhailov V.O., Galdeano A., Diament M., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Graeva E.M., Sailhac P.* Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering // *Geophysics*. 2003. Vol. 68. Is. 1. P. 168–180.
- 289.** *Morozov V.N., Tatarinov V.N.* Tectonic processes development with time in the areas of HLW disposal from expert assessment to prognosis // *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST)*. 2006. Vol. 2. Is. 1/2. P. 65–74. DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010648.
- 290.** *Mualchin L.* History of Modern Earthquake Hazard Mapping and Assessment in California Using a Deterministic or Scenario Approach // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168. Is. 3–4. P. 383–407.

DOI: 10.1007/s00024-010-0121-1.

- 291.** *Nikolov B.P., Zharkikh J.I., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M.* Integration of data mining methods for earth science data analysis in GIS environment // *Russian Journal of Earth Sciences (RJES)*. 2015. Vol. 15. Is. 4. ES4004. DOI: 10.2205/2015ES000559.
- 292.** *Nissen E., Emmerson B., Funning G.J., Mistrukov A., Parsons B., Robinson D.P., Rogozhin E., Wright T.J.* Combining InSAR and seismology to study the 2003 Siberian Altai earthquakes – dextral strike-slip and anticlockwise rotations in the northern India-Eurasia collision zone // *Geophysical Journal International*. 2007. Vol. 169. Is. 1. P. 216–232.
- 293.** *Panza G., Irikura K., Kouteva-Guentcheva M., Peresan A., Wang Z., Saragoni R.* Advanced Seismic Hazard Assessment // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168. Is. 1–2. P. 1–9. DOI: 10.1007/s00024-010-0179-9.
- 294.** *Panza G.F., Bela J.* NDSHA: A new paradigm for reliable seismic hazard assessment // *Engineering Geology*. 2020. Vol. 275. 105403. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105403.
- 295.** *Panza G.F., La Mura C., Peresan A., Romanelli F., Vaccari F.* Seismic hazard scenarios as preventive tools for a disaster resilient society // *Advances in Geophysics*. 2012. Vol. 53. P. 93–165. DOI: 10.1016/B978-0-12-380938-4.00003-3.
- 296.** *Panza G.F., Peresan A., Vaccari F., Romashkova L., Kossobokov V., Gorshkov A., Kuznetsov I.* Earthquake preparedness: the contribution of earthquake prediction and deterministic hazard research // In *A. Correig* (ed.) *Terratremols i temporals de llevant: dos exemples de sistemes complexos*. Jornades Científiques de l'Institut d'Estudis Catalans, Secció de Ciències i Tecnologia, Barcelona. 2003. P. 91–116 (Sèrie jornades científiques; 15).
- 297.** *Panza G.F., Romanelli F., Vaccari F.* Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: Theory and applications to seismic zonation // *Advances in Geophysics*. 2001. Vol. 43. P. 1–95. DOI: 10.1016/S0065-

2687(01)80002-9.

- 298.** *Parvez I.A., Rosset Ph.* The Role of Microzonation in Estimating Earthquake Risk // In: *Shroder J., Wyss M.* (Eds.), *Earthquake Hazard, Risk, and Disasters*. 2014. Chapter 11. ISBN: 978-0-12-394848-9. DOI: 10.1016/B978-0-12-394848-9.00011-0.
- 299.** *Peresan A., Gentili S.* Identification and characterisation of earthquake clusters: A comparative analysis for selected sequences in Italy and adjacent regions // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2020. Vol. 61. Is. 1. P. 57–80. DOI: 10.4430/bgta0249.
- 300.** *Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G.F.* The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment // *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*. 2015. Vol. 56. Is. 2. P. 295–328. DOI: 10.4430/bgta0141.
- 301.** *Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F., Gorshkov A., Panza G.F.* Neodeterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168. Is. 3–4. P. 583–607. DOI: 10.1007/s00024-010-0166-1.
- 302.** *Reasenber P.* Second-order moment of central California seismicity, 1969–82 // *Journal of Geophysical Research*. 1985. 90 (B7). P. 5479–5495. DOI: 10.1029/JB090iB07p05479.
- 303.** *Rebetsky Y.L., Tatevossian R.E.* Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // *Bulletin de la Société géologique de France*. 2013. Vol. 184. Is. 4–5. P. 335–346. DOI: 10.2113/gssgfbull.184.4-5.335.
- 304.** *Rehman K., Burton P.W., Weatherill G.A.* K-means cluster analysis and seismicity partitioning for Pakistan // *Journal of Seismology*. 2014. Vol. 18. Is. 3. P. 401–419. DOI: 10.1007/s10950-013-9415-y.
- 305.** *Rugarli P., Vaccari F., Panza G.* Seismogenic nodes as a viable alternative to seismogenic zones and observed seismicity for the definition of seismic hazard at regional scale // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 41.

Is. 4. P. 289–304. DOI: 10.15625/0866-7187/41/4/14233.

- 306.** *Rybkina A., Hodson S., Gvishiani A., Kabat P., Krasnoperov R., Samokhina O., Firsova E.* CODATA and global challenges in data-driven science // *Russian Journal of Earth Sciences (RJES)*. 2018. Vol. 18. ES4002. DOI: 10.2205/2018ES000625.
- 307.** *Rybkina A.I., Kern A.K., Rostovtseva Y.V.* New evidence of the age of the Lower Maeotian substage of the Eastern Paratethys based on astronomical cycles // *Sedimentary Geology*. 2015. Vol. 330. P. 122–131. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.10.003.
- 308.** *Sallantin J.* Methodologie de l'apprentissage pour des variables binaires // *Publ. Struc. Infor. C.N.R.S. P.*, 1983. P. 13–25.
- 309.** *Shang X., Li X., Morales-Esteban A., Asencio-Cortés G., Wang Z.* Data field-based K-means clustering for spatio-temporal seismicity analysis and hazard assessment // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. Is. 3. 461. DOI: 10.3390/rs10030461.
- 310.** *Shebalin N.V., Tatevosian R.E.* Catalogue of large historical earthquakes of the Caucasus // *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus* (Eds. *D. Giordini & S. Balassanian*), NATO ASI Series, 2. Environment – Vol. 28. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht / Boston / London. 1997. P. 201–232.
- 311.** *Shi Y., Bolt B.A.* The standard error of the magnitude-frequency b-value // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1982. Vol. 72. Is. 5. P. 1677–1687.
- 312.** *Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov Sh., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A., Heumez B.* Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // *Earth Planets Space*. 2012. Vol. 64. Is. 9. P. 743–752. DOI: 10.5047/eps.2012.03.004.
- 313.** *Soloviev A.A., Bogoutdinov Sh.R., Agayan S.M., Gvishiani A.D., Kihn E.* Detection of hardware failures at INTERMAGNET observatories: application of artificial intelligence techniques to geomagnetic records study

- // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2009. Vol. 11. ES2006. DOI: 10.2205/2009ES000387.
- 314.** *Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Seelev I.N.* Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes // *Atomic Energy*. 2017. Vol. 121. Is. 3. P. 203–207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.
- 315.** *Telesca L., Alcaz V., Burtiev R., Sandu I.* Time-clustering analysis of the 1978–2008 sub-crustal seismicity of Vrancea region // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2011. Vol. 11. Is. 8. P. 2335–2340. DOI: 10.5194/nhess-11-2335-2011.
- 316.** *Telesca L., Golay J., Kanevski M.* Morisita-based space-clustering analysis of Swiss seismicity // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2015. Vol. 419. P. 40–47. DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.004.
- 317.** *Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. Is. 6. P. 1023–1038.
- 318.** *Vijay R.K., Nanda S.J.* Seismicity analysis using space-time density peak clustering method // *Pattern Analysis and Applications*. 2020. P. 181–201. DOI: 10.1007/s10044-020-00913-5.
- 319.** *Vorobieva I., Narteau C., Shebalin P., Beauducel F., Nercessian A., Clouard V., Bouin M.-P.* Multiscale mapping of completeness magnitude of earthquake catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2013. Vol. 103. Is. 4. P. 2188–2202. DOI: 10.1785/0120120132.
- 320.** *Wang Z.* Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168. Is. 1–2. P. 11–25. DOI: 10.1007/s00024-010-0148-3.
- 321.** *Widiwijayanti C., Mikhailov V., Diament M., Deplus C., Louat R., Tikhotsky S., Gvishiani A.* Structure and evolution of the Molucca Sea area: constraints based on interpretation of a combined sea-surface and satellite gravity dataset // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 215. P. 135–150.

- 322.** *Wiemer S., Wyss M.* Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2000. Vol. 90. Is. 4. P. 859–869.
- 323.** *Wyss M., Wiemer S., Zuniga R.* ZMAP. A tool for analyses of seismicity patterns. Typical applications and uses: a cookbook. 2001.
- 324.** *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
- 325.** *Zaliapin I., Ben-Zion Y.* Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. Is. 6. P. 2847–2864. DOI: 10.1002/jgrb.50179.
- 326.** *Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H.* Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 101. Is. 1. 018501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.018501.
- 327.** *Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D.* System Analysis: Theory and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Data and Knowledge in a Changing World. 2007. 447 p. DOI: 10.1007/978-3-540-48880-4.
- 328.** *Zlotnicki J., Agayan S., Gvishiani A., Bogoutdinov Sh.* Telematics and artificial intelligence tools in monitoring of volcanoes // *WISTCIS Newsletter*. 2003. Vol. 3. November 2002-May 2003. P. 58–60.
- 329.** *Zlotnicki J., Le Mouel J.-L., Gvishiani A., Agayan S., Mikhailov V., Bogoutdinov Sh., Kanwar R., Yvetot P.* Automatic fuzzy-logic recognition of anomalous activity on long geophysical records: Application to electric signals associated with the volcanic activity of La Fournaise volcano (Reunion Island) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. Vol. 234. P. 261–278.
- 330.** *Zonenshain L.P., Le Pichon X.* Deep Basin of the Black Sea and Caspian Sea: a remnants of Mesozoic black-ark basin // *Tectonophysics*. 1986. Vol. 123. P. 181–211.