

РЕСПУБЛИКА АРМЕНИЯ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ И ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ ИМЕНИ А. НАЗАРОВА

КАРАПЕТЯН ДЖОН КОСТИКОВИЧ

АКТУАЛЬНЫЕ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И
ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ СЕЙСМОЛОГИИ

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 24.01.08 - «Геофизика, методы поиска полезных ископаемых»

ГЮМРИ - 2026

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅՈՒՆ
ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
Ա. ՆԱԶԱՐՈՎԻ ԱՆՎԱՆ ԵՐԿՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ԻՆՅԵՆԵՐԱՅԻՆ
ՍԵՅՍՄԱՐԱՆՈՒԹՅԱՆ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ ՋՈՆ ԿՈՍՏԻՎԻՉ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՔԻ ՀԱՄԱՐ ԱՐԴԻԱԿԱՆ
ՍԵՅՍՄԱՐԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՒՂԻՂ ԵՎ ՀԱԿԱՂԱՁ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄՆԵՐ

ԳԻՏԱԿԱՆ ԶԵԿՈՒՑՈՒՄ

ԻԴ.01.08 - «Երկրաֆիզիկա, օգտակար հանածոների որոնման մեթոդներ»
մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի
աստիճանի հայցման

ԳՅՈՒՄՐԻ - 2026

Тема диссертации утверждена на ученом совете Института геофизики и инженерной сейсмологии имени А. Назарова

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, академик НАН РА, **Ленсер Абгарович Агалоян**.
Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, **Пётр Николаевич Шебалин**.
Доктор геологических наук, профессор, **Саргис Грачикович Айроян**.

Ведущая организация:

Геофизический центр Российской академии наук.

Защита состоится 16 июля 2026 г. в 12:00, на заседании действующего при Институте геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова специализированного совета 040 Комитета по высшему образованию и науке (адрес: г. Гюмри, 3115, ул. В.Саргсяна 5, ИГИС).

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ИГИС.

Научный доклад разослан 15 июня 2026 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат физико-математических наук,



Карине Карапetyан

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա. Նազարովի անվան երկրաֆիզիկայի և ինժեներային սեյսմաբանության ինստիտուտի գիտական խորհրդում

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր, ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս,

Լենսեր Աբգարի Աղալովյան:

Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտոր, ՌԴ ԳԱ թղթակից անդամ,

Պյոտր Նիկոլաևիչ Շեբալին:

Երկրաբանական գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր,


Սարգիս Հրաչիկի Հարոյան:

Առաջատար կազմակերպություն՝ Ռուսաստանի գիտությունների ակադեմիայի երկրաֆիզիկական կենտրոն:

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026 թ. հուլիսի 16-ին, ժամը 12:00-ին Ա. Նազարովի անվ. երկրաֆիզիկայի և ինժեներային սեյսմաբանության ինստիտուտում գործող Բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի 040 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ Գյումրի, 3115, Վ. Սարգսյան 5, ԵԻՍԻ):

Գիտական զեկուցմանը կարելի է ծանոթանալ ԵԻՍԻ գրադարանում: Գիտական զեկուցումն առաքված է 2026 թ. հունիսի 15-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածու  **Կարինե Կարապետյան**

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ	4
ВВЕДЕНИЕ	29
ГЛАВА 1. ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ	41
1.1. Создание и развёртывание комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети на территории Республики Армения	41
1.2. Методологические проблемы декластеризации сейсмологических каталогов в Тавро-Кавказском регионе	46
1.3. Идентификация тектонической и вулcano-тектонической природы землетрясений по данным широкополосных длиннопериодных станций (на примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги)	50
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ТАВРО-КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА: КЛАСТЕРИЗАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДУБЛЕТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	55
2.1. Кластеризация сейсмических событий и распознавание потенциально сейсмоопасных зон в Тавро-Кавказском регионе	55
2.2. Обоснование дублетной природы сейсмического процесса на примере восточно-турецких землетрясений 6 февраля 2023 г.	59
2.3. Анализ закономерностей проявления дублетных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе методами машинного обучения	61
ГЛАВА 3. ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНЕ КОЛЛИЗИИ АРАВИЙСКОЙ И ЕВРАЗИЙСКОЙ ПЛИТ	66
3.1. 2D-поверхностно-волновая томография зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит: скоростные аномалии, тектоническая активность и строение литосферы (2022–2025 гг.)	66
3.2. Влияние землетрясений Кахраманмараш (2023 г.) на современную геодинамику Кавказа по данным GNSS-наблюдений	69
3.3. Сравнительный анализ сейсмичности и тектоники территории Республики Армения на основе расчёта фокальных механизмов землетрясений.....	71
ГЛАВА 4. ЛОКАЛЬНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ: КАРТА Vs30, КОТЛОВИННЫЕ ЭФФЕКТЫ И НОРМАТИВНЫЕ СПЕКТРЫ РЕАКЦИИ	75
4.1. Корреляционная связь топографического градиента с параметром Vs30 для вулканических областей и построение карты Vs30 для территории Республики Армения	75
4.2. Влияние локальных инженерно-геологических условий на параметры сейсмических волновых полей (на примере Ширакской котловины)	78
4.3. Моделирование расчётных сейсмических воздействий и их сопоставление с нормативными спектрами реакции	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	99
АВТОРЕФЕРАТ (на армянском языке).....	107
АВТОРЕФЕРАТ (на английском языке).....	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	127

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Настоящая докторская диссертация представлена в форме научного доклада по совокупности опубликованных научных работ автора, посвящённых решению комплекса актуальных прямых и обратных задач сейсмологии для территории Республики Армения. Перечень работ, обосновывающих изложенные в настоящем научном докладе положения и результаты, представлен в Списке работ автора по теме диссертации. Текст настоящего научного доклада представляет собой систематическое обобщение и методологическую интеграцию ключевых научных результатов автора в рамках единой научной темы; жанр научного доклада определяет специфику изложения как обобщающего систематизированного раскрытия совокупного научного достижения, превышающего сумму отдельных публикаций. Все приводимые результаты опубликованы автором в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science (квартили Q1–Q4), а также в ведущих отраслевых журналах, включённых в перечень ВКК РА.

Актуальность темы научного доклада

Территория Республики Армения, расположенная в пределах Альпийско-Гималайского пояса в зоне активной континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, представляет собой природный полигон фундаментального значения для исследования физико-геодинамических процессов континентальной коллизии. Близмеридиональная конвергенция Аравийской плиты со скоростью около 30 мм/год обуславливает высокую сейсмическую активность, плиоцен-четвертичный вулканизм и многоуровневую иерархию активных разломных систем, относящих территорию республики к областям максимального сейсмического риска планеты. Исторический ряд катастрофических событий - Гарнийское 1679 г. ($M \approx 7,0$), Зангезурское 1931 г. ($M = 6,5$), Чалдыранское 1976 г. ($M = 7,3$), Спитакское 7 декабря 1988 г. ($M_w = 6,8$, $M_s = 7,0$), унёсшее жизни более 25 000 человек, и Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) на сопредельной территории - формирует эмпирическую основу регионального сейсмологического знания.

Спитакская катастрофа обнажила двойственную природу проблемы. С одной стороны - принципиальные методологические недостатки региональной наблюдательной сейсмологии: несоответствие станций

международным стандартам, отсутствие разнотипной аппаратуры, логистические ограничения и недоступность оперативных данных, существенно сужавшие основу для построения карт сейсмической опасности и национальных строительных норм. С другой – фундаментальную роль инженерно-геологических условий среды в формировании поля сейсмических воздействий: пространственная неоднородность разрушений в Ленинакане (Гюмри), включая нехарактерные формы повреждений – срезание угловых секций при устойчивости основных объёмов зданий, опрокидывание панельных домов рядом с уцелевшими, криволинейные деформации фасадов, крен монолитных сооружений целиком, – не объясняется только основными параметрами очага землетрясения (магнитудой, глубиной, ориентацией и кинематикой разлома, эпицентральной расстоянием) и закономерно вытекает из мощности и физико-механических свойств покровной толщи, гидрогеологического режима и геометрии седиментационной котловины. Частным, но определяющим для Ленинакана проявлением этих условий выступают котловинные эффекты Ширакской межгорной впадины – резонансное усиление, фокусировка волновой энергии и удлинение колебательного процесса в толще рыхлых озёрно-аллювиальных отложений, перекрывающих водоносный горизонт. Получение единственной репрезентативной инструментальной записи сильных движений при катастрофическом масштабе события определило двуединую методологическую задачу: развёртывание на территории Республики Армения современной комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения и количественный учёт локальных условий – параметра V_s30 , амплитудно-частотных характеристик котловин, длительности колебательного процесса и интегральной интенсивности – как обязательной составляющей оценки сейсмической опасности и сейсмического риска.

Существовавший до недавнего времени уровень наблюдательной базы – глобальные модели низкого пространственного разрешения и фрагментарные данные редкой сети короткопериодных станций – был принципиально недостаточен для корректной постановки и решения прямых и обратных задач сейсмологии с требуемой для региона детальностью. Принципиально новый этап связан с созданием в 2024 году комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети, не имеющей

аналогов в истории региона: широкополосные станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса впервые объединены в единую систему. Это обеспечило качественный скачок в объёме и метрологическом качестве данных и сформировало экспериментальную базу для телесеismicческих исследований глубинного строения Земли под территорией республики. Тем самым созданное инструментально-методологическое обеспечение образует не самостоятельный результат, а необходимое условие корректной постановки и решения как обратных, так и прямых задач сейсмологии - сквозную несущую основу всех направлений настоящей работы и переход от разрозненных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу.

Актуальность темы научного доклада определяется фундаментальной потребностью развития методологического и эмпирического базиса регионального сейсмологического знания и прямой практической значимостью полученных результатов для оценки сейсмической опасности, сейсмостойкого проектирования и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий в зоне континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит.

Степень разработанности темы исследования

Решению прямых и обратных задач сейсмологии в зонах континентальной коллизии посвящён значительный массив научных исследований международного уровня. В области наблюдательной сейсмологии и инструментально-методологического обеспечения международные стандарты оценки фонового сейсмического шума сформулированы в методологии PQLX (McNamara & Buland), а статистической оценки магнитуды представительности - в работах Wiemer & Wyss и Mignan & Woessner. В области статистического анализа сейсмичности методологические основы декластеризации заложены работами Gardner & Knopoff, Reasenberг, Grünthal, Uhrhammer и Zaliapin & Ben-Zion; классический подход EPA (Earthquake - Prone Areas) к распознаванию сейсмоопасных зон разработан Гельфандом, Кейлис-Бороком и их школой. Методологические основы алгоритмов машинного

обучения для пространственно-статистического анализа сейсмичности - централизованной кластеризации (k-means, MacQueen) и плотностной кластеризации (DBSCAN, Ester et al.) - сформированы в общей теории распознавания образов и широко применяются в современной сейсмологии для выделения структур сейсмического каталога. Методологические основы 2D-поверхностно-волновой томографии заложены работами Yanovskaya, Levshin et al., Shapiro & Ritzwoller. Методологический канон классической зависимости топографического градиента и параметра V_s30 для невулканических областей разработан Wald & Allen; международные стандарты грунтовых классификаций сформированы в нормативах NEHRP и Eurocode 8. Однако, несмотря на наличие развитого международного методологического контекста, систематическое применение этого комплекса методов к территории Республики Армения с получением оригинальных научных результатов, вносящих вклад как в региональное, так и в глобальное сейсмологическое знание, до настоящего цикла работ автора не выполнялось. В частности, не существовало: систематической характеристики фоновых шумов и магнитуды представительности для территории Республики Армения; сравнительного анализа применимости современных алгоритмов декластеризации к региональным условиям Тавро-Кавказского региона; методологического развития классического подхода EPA через one-class classification и FCAZ применительно к Кавказскому региону; детальных скоростных моделей литосферы зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит с пространственным разрешением, обеспечиваемым современной наблюдательной базой; количественной оценки влияния катастрофических землетрясений Кахраманмараш (2023 г.) на современный кинематический режим земной коры Кавказа; общенациональной карты V_s30 территории Республики Армения, построенной на локальных инструментальных измерениях; количественной характеристики котловинных эффектов на примере Ширакской седиментационной котловины; региональной методологии генерации синтетических акселерограмм для условий ограниченной выборки инструментальных записей сильных движений территории Республики Армения. Восполнение этого комплекса научных пробелов осуществлено в опубликованных работах автора, систематически обобщённых в настоящем научном докладе.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является литосфера Республики Армения и сопредельных территорий как сегмент зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, рассматриваемая в качестве сейсмогеодинамической системы, включающей земную кору, верхнюю мантию, систему активных разломов, магматические очаги и связанные с ними сейсмогенные зоны.

Предметом исследования являются физико-математические постановки и методы решения прямых и обратных задач сейсмологии применительно к указанной территории, включая построение скоростных моделей среды и реологической стратификации литосферы; локацию, кластеризацию и моментно-тензорный анализ сейсмических событий; расчёт синтетических акселерограмм и количественную оценку котловинных эффектов; анализ современной геодинамики методами GNSS-наблюдений.

Цель и задачи научного доклада

Целью настоящего научного доклада является систематическое обобщение совокупности оригинальных научных результатов автора, посвящённых обоснованию и практическому внедрению аппаратно-программной геоинформационной инфраструктуры нового поколения и разработке на её основе единого методологического комплекса постановки и решения актуальных прямых и обратных задач сейсмологии для территории Республики Армения, обеспечивающих научно-методологическую основу перехода от разрозненных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу региона.

Для достижения поставленной цели в рамках настоящего научного доклада решены следующие ключевые научные задачи, опубликованные в работах, перечисленных в Списке работ автора по теме диссертации.

1. В области инструментально-методологического обеспечения (Глава 1)

1.1. Обосновать архитектуру и осуществить практическую реализацию комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения международного метрологического стандарта на территории Республики Армения, объединяющей широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим

диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинимического класса (подраздел 1.1).

1.2. Выполнить количественный спектрально-временной анализ фоновых сейсмических и геодинимических полей различного генезиса в 20 пунктах в соответствии с международными метрологическими стандартами наблюдательной сейсмологии и обосновать выбор оптимальных мест развёртывания комплексных сейсмогеодинимических станций нового поколения (подраздел 1.1).

1.3. Рассчитать и пространственно картировать магнитуду представительности (M_s) каталога сейсмических событий действующей сейсмогеодинимической наблюдательной сети с дифференциацией по основным геодинимическим зонам территории Республики Армения и сопредельных районов, обеспечив статистически корректную базу для применения фундаментальных законов сейсмичности (Гутенберга–Рихтера, Омори) и оценок параметра b -value (подраздел 1.1).

1.4. Выполнить сравнительный анализ применимости основных классов алгоритмов декластеризации сейсмологических каталогов к региональным условиям Тавро-Кавказского региона и разработать усовершенствованную методологию декластеризации, обеспечивающую идентификацию активных разломных структур и количественную характеристику пространственно-временного распределения сейсмичности (подраздел 1.2).

1.5. Построить унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов и применить геометрические методы количественной оценки качества декластеризации (подраздел 1.2).

1.6. Разработать методологию идентификации тектонической и вулканотектонической природы землетрясений на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик и параметров тензора сейсмического момента по данным широкополосных длиннопериодных станций (на примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги) (подраздел 1.3).

2. В области решения обратных задач сейсмологии (Главы 2 и 3)

2.1. Применить методы машинного обучения (алгоритмы кластеризации K-means и DBSCAN) для статистического анализа сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона и развить классический подход EPA через

разработку методологий one-class classification и формализованного метода FCAZ (Formalized Clustering and Zoning) для распознавания потенциально сейсмоопасных зон (подраздел 2.1).

2.2. Обосновать дублетную природу катастрофических восточно-турецких землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. на основе анализа параметров фокальных механизмов, пространственно-временного распределения очагов и афтершоковых процессов; построить физико-геодинамическую модель очаговой зоны с идентификацией структуры магистрального разрыва (подраздел 2.2).

2.3. Усовершенствовать методологию декластеризации на основе ансамблевого алгоритма случайного леса (Random Forest) и выполнить системный анализ закономерностей проявления дублетных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе на различных энергетических уровнях с количественной оценкой пространственно-временных параметров миграции и трансформации афтершоковых процессов; исследовать различия в пространственно-временной эволюции афтершоковых процессов для дублетных и одиночных сейсмических событий (подраздел 2.3).

2.4. Построить детальные скоростные модели земной коры и верхней мантии зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит методом 2D-поверхностно-волновой томографии (инверсия дисперсионных кривых волн Рэлея и Лява в диапазоне периодов 5–80 с, глубинный охват до 200 км) и выполнить физико-геодинамическую интерпретацию выявленных скоростных аномалий с количественной характеристикой глубинного строения литосферы и идентификацией областей термоаномальных зон, магматических каналов и реологической дифференциации литосферы региона (подраздел 3.1).

2.5. Выполнить количественную оценку влияния удалённых катастрофических землетрясений Кахраманмараш (2023 г.) на современный кинематический режим земной коры Кавказского региона по данным непрерывных GNSS-наблюдений на сети станций геодинамического класса с восстановлением поля скоростей коровых смещений и интерпретацией дальнедействующих эффектов в зоне континентальной коллизии (подраздел 3.2).

2.6. Выполнить сравнительный анализ сейсмичности и тектоники территории Республики Армения на основе расчёта фокальных механизмов землетрясений магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за период 2002–2022 гг. и

построение карт пространственного распределения осей сжатия (P) и растяжения (T) главных тектонических напряжений, направленный на установление связи сильных сейсмических событий с активными разломными системами и геодинамическими блоковыми структурами коллизионной зоны.

3. В области решения прямых задач сейсмологии (Глава 4)

3.1. Выполнить систематический анализ корреляционной связи топографического градиента с параметром V_{s30} для вулканических областей и построить общенациональную карту V_{s30} территории Республики Армения на основе локальных инструментальных измерений с применением геостатистических моделей кокригинга (Slope-based CoKriging, SCK) (подраздел 4.1).

3.2. Исследовать влияние седиментационных котловин на параметры сейсмических волновых полей по данным инструментальных наблюдений на примере Ширакской котловины с количественной оценкой амплитудно-частотных характеристик, длительности колебательного процесса, спектральных коэффициентов коды и интегральной интенсивности регистрируемых сейсмограмм (подраздел 4.2).

3.3. Разработать методологию и программное обеспечение построения синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции и адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения, на основе совместной обработки инструментальной записи Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. и регионального каталога слабых сейсмических событий ($M_w \geq 3,5$); выполнить сравнительный анализ кривых динамичности по максимумам ускорений и по параметру кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV) (подраздел 4.3).

В совокупности обобщённые в настоящем научном докладе результаты решения указанных задач формируют целостную научно-методологическую основу для перехода от разрозненных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу территории Республики Армения.

Научная новизна

Научная новизна совокупности работ, обобщённых в настоящем научном докладе, заключается в том, что впервые для территории

Республики Армения в рамках единого методологического комплекса поставлены и решены актуальные прямые и обратные задачи сейсмологии на основе данных принципиально новой комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения, отвечающей международным стандартам наблюдательной сейсмологии.

1. В области инструментально-методологического обеспечения

1.1. Впервые обоснована, развёрнута и введена в эксплуатацию комплексная сейсмогеодинамическая наблюдательная сеть нового поколения международного метрологического стандарта, объединяющая в единой инструментальной конфигурации широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса, что обеспечило качественный методологический скачок в объёме и метрологическом качестве экспериментальных данных для решения прямых и обратных задач сейсмологии на территории Республики Армения.

1.2. Впервые для территории Республики Армения выполнены количественные измерения и спектрально-временной анализ фоновых сейсмических и геодинамических полей различного генезиса в 20 пунктах в соответствии с международными метрологическими стандартами наблюдательной сейсмологии, обеспечившие научно обоснованный выбор оптимальных мест развёртывания комплексных сейсмогеодинамических станций нового поколения.

1.3. Впервые рассчитана и пространственно картирована магнитуда представительности ($M_s \approx 1,5$) на основе пространственной конфигурации станций действующей сейсмогеодинамической наблюдательной сети для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов и впоследствии подтверждена данными зарегистрированных региональных сейсмических событий, что количественно подтвердило достигнутую возможность систематической регистрации широкого спектра сейсмических событий - от слабых до сильных, обеспечивающую непрерывное пополнение регионального сейсмологического каталога.

1.4. Впервые установлена статистическая сходимость результатов алгоритмов декластеризации Gardner & Knopoff (1974), Grünthal (1985) и Zaliapin & Ben-Zion (2013) при существенно различающихся теоретических

основах в условиях Тавро-Кавказского региона; разработана усовершенствованная методология декластеризации, обеспечившая выявление феномена пространственно-временной миграции сейсмичности как индикатора динамического перераспределения тектонических напряжений в коллизионных областях.

1.5. Впервые для Тавро-Кавказского региона построен унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов и впервые применены диаграммы Вороного для количественной оценки качества декластеризации, что сформировало самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения, размещённый в открытом доступе для международного научного сообщества и обеспечивающий региональную калибровку GMPE, проведение PSHA и обновление национальных карт ОСП Республики Армения.

1.6. Впервые на примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги (вулcano-тектонический линеймент Санторин-Аморгос) установлено, что широкополосные длиннопериодные станции обеспечивают надёжную дифференциацию тектонических и вулcano-тектонических землетрясений на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик и параметров тензора сейсмического момента. Выдвинута физико-геодинамическая гипотеза о связи инъекции магматического вещества и флюидов из верхней мантии в магматический резервуар вулкана Колумбо с предельными упругими напряжениями в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения, устанавливающая физическую связь между процессами магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках.

2. В области решения обратных задач сейсмологии

2.1. Впервые развит классический подход EPA (Earthquake-Prone Areas; Гельфанд, Кейлис-Борок и др.) через разработку методологии распознавания высокосейсмичных дислокационных узлов на основе обучения с использованием одного класса (one-class classification), методологически адаптированной к условиям ограниченной выборки сильных сейсмических событий, а также формализованного метода FCAZ (Formalized Clustering and Zoning), в рамках которого объектами

распознавания выступают эпицентры слабых землетрясений, что обеспечивает динамическую корректировку результатов в реальном временном масштабе. Разработанные методологии успешно апробированы на материале сейсмологических каталогов Кавказского региона, континентов Северной и Южной Америки, Евразии и субдукционных зон Тихоокеанского сейсмического пояса.

2.2. Впервые на основе совместного применения алгоритмов кластеризации K-means и DBSCAN к сейсмологическому каталогу Тавро-Кавказского региона установлены фундаментальные пространственно-временные закономерности регионального сейсмогенеза и научно обоснованные корреляционные связи между статистическими характеристиками сейсмичности и геолого-тектоническими структурами региона как ключевого сегмента зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит.

2.3. Впервые установлена дублетная природа катастрофических восточно-турецких землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) с идентификацией четырёх субочагов магистрального разрыва Газиантепского землетрясения. Доказано, что события связаны не только пространственно-временной и энергетической корреляцией, но и общностью геолого-тектонической природы, причём первое событие выступает триггерным механизмом для последующего землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$).

2.4. Впервые на основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest установлено, что дублетный режим сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе реализуется на всех энергетических уровнях - не только при сильных, но и при относительно слабых сейсмических событиях, проявляющихся во временном интервале от 15 минут до одного часа и характеризующихся миграционным процессом в интервале глубин до 20 км.

2.5. Впервые выявлен принципиально новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах: после второго события дублета количество афтершоков в области первого события сокращается в шесть раз, что свидетельствует о кардинальной трансформации пространственно-временной эволюции афтершокового процесса при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы.

2.6. Впервые методом 2D-поверхностно-волновой томографии (диапазон периодов 5–80 с, глубинный охват до ≈ 200 км) по данным около 1500 сейсмических событий $M \geq 3,5$ (1999–2018 гг., 20–49 станций) выявлена устойчивая трёхуровневая структура скоростных аномалий зоны коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит: верхнекоровые горячие зоны (6–30 км), области подкорового внедрения (underplating) с границей литосферы–астеносферы (LAB) на глубинах 100–110 км и экстремально низкоскоростные аномалии (180–200 км), интерпретируемые как следствие литосферной деляминации. Подтверждено существование вертикально протяжённой низкоскоростной аномалии под северо-западным склоном вулкана Арагац в интервале глубин 7–27 км, интерпретируемой как магматический канал коро-мантийного происхождения. Впервые для территории Республики Армения выявлены 15 верхнекоровых потенциальных термоаномальных зон на глубинах 6,6–30,8 км, демонстрирующих отчётливую корреляцию с главными тектоническими структурами и активными литосферно-тектоническими взаимодействиями региона и обоснованных как потенциальные источники геотермальной энергии. Впервые установлена физико-геодинамическая дифференциация литосферы Большого Кавказа с запада на восток.

2.7. Впервые на основе непрерывных GNSS-наблюдений на региональной сети станций геодинамического класса установлено, что удалённые катастрофические землетрясения Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. индуцируют статистически значимые косейсмические изменения кинематического режима земной коры Кавказского региона, что доказывает интегральный характер геодинамического отклика на крупномасштабные разрывные процессы в сопряжённых тектонических провинциях зоны коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит.

2.8. Впервые на основе систематического расчёта фокальных механизмов 371 землетрясения $M \geq 3,5$ за 20-летний инструментальный период (2002–2022 гг.) установлено кинематическое многообразие разломных подвижек территории Республики Армения с доминированием сдвигового режима, пространственно согласованное с системой активных разломов, а построенные карты осей сжатия (P) и растяжения (T) главных тектонических напряжений демонстрируют преобладание сжатия СВ–ЮЗ и растяжения СЗ–ЮВ, физически согласованное с конвергенцией Аравийской плиты (~ 30 мм/год).

3. В области решения прямых задач сейсмологии

3.1. Впервые для вулканических областей на основе репрезентативной выборки 250 натурных инструментальных измерений V_s30 установлена обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и параметром V_s30 - фундаментальная физико-геологическая закономерность, противоречащая классической зависимости для невулканических областей (Wald & Allen, 2007) и верифицированная независимыми инструментальными измерениями на вулканических территориях острова Хайнань (Китай), что свидетельствует о её универсальной природе для вулканогенных провинций.

3.2. Впервые построена общенациональная карта пространственного распределения параметра V_s30 для территории Республики Армения методом геостатистического кокригинга на основе топографического градиента (Slope-based CoKriging, SCK) с отдельным моделированием вулканогенных и невулканических доменов; показано доминирование высокоскоростных грунтов в диапазоне 450–900 м/с, согласующееся с широким распространением вулканогенных пород плиоцен-четвертичного возраста, и количественно обоснована методологическая непригодность глобальных мозаичных моделей V_s30 (USGS ShakeMap) и стандартных грунтовых классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий территории Республики Армения.

3.3. Впервые количественно оценено влияние локальных инженерно-геологических условий седиментационных котловин на параметры сейсмических волновых полей на примере Ширакской седиментационной котловины, включая количественную характеристику резонансного усиления, фокусировки сейсмической энергии, увеличения длительности колебательного процесса, спектральных коэффициентов волновой коды и интегральной интенсивности регистрируемых сейсмограмм, что формирует физико-геологическую основу для разработки методов инженерного снижения резонансных явлений в условиях расчётных землетрясений.

3.4. Впервые разработана методология построения синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции и адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения, на основе совместной обработки единственной репрезентативной инструментальной записи Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г.

($M_w = 6,8$, $M_s = 7,0$) и регионального каталога слабых сейсмических событий ($M_w \geq 3,5$).

3.5. Впервые проведён сравнительный анализ кривых коэффициента динамичности $\beta(T, n)$, построенных по двум методологически различным подходам: по максимальным значениям ускорений грунтовых колебаний и по интегральному параметру кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV).

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные научные положения, обоснованные в совокупности опубликованных работ автора.

Положение 1. Создание и ввод в эксплуатацию комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети международного метрологического стандарта, объединяющей широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (120 с), акселерометры сильных движений и перманентные GNSS-станции, обеспечивает качественный скачок в объёме и метрологическом качестве данных с уровнем представительности каталога $M_s \approx 1,5$ для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов, что обеспечивает систематическую регистрацию сейсмических событий полного магнитудного диапазона от слабых до сильных, непрерывно пополняющих региональный сейсмологический каталог, и формирует научно-методологическую основу для системного сейсмогеодинамического мониторинга территории Республики Армения.

Положение 2. Применение комплекса современных алгоритмов декластеризации сейсмологических каталогов и методов машинного обучения к Тавро-Кавказскому региону демонстрирует статистическую сходимость результатов при существенно различающихся теоретических основах и обеспечивает выявление феномена пространственно-временной миграции сейсмичности как универсального индикатора динамического перераспределения тектонических напряжений в коллизионных областях.

Положение 3. Впервые построенный для Тавро-Кавказского региона унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов представляет собой самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения,

размещённый в открытом доступе для международного научного сообщества и обеспечивающий региональную калибровку уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (GMPE), проведение вероятностной оценки сейсмической опасности (PSHA) и обновление национальных карт общего сейсмического районирования Республики Армения.

Положение 4. Впервые установлена принципиальная дифференциация пространственно-временной структуры афтершоковых процессов для дублетных и одиночных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках: афтершоки дублетных землетрясений формируют линейный магистральный образ вдоль разломной плоскости, отражающий последовательную активизацию смежных сегментов разломной системы, тогда как афтершоки одиночных событий формируют круговую (кольцевую) пространственную структуру, отражающую локальную релаксацию напряжений в окрестности очага, что раскрывает существование двух фундаментально различных физических механизмов разрывообразования.

Положение 5. Дублетный режим сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе реализуется на всех энергетических уровнях и характеризуется новым физическим механизмом релаксации тектонических напряжений: после второго события дублета количество афтершоков в области первого события сокращается в шесть раз, что раскрывает фундаментальные закономерности сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках.

Положение 6. Зона коллизии Аравийской и Евразийской плит и территория Республики Армения характеризуются устойчивой трёхуровневой структурой скоростных аномалий, выявленной методом 2D-поверхностно-волновой томографии волн Рэлея и Лява: верхнекоровые горячие зоны (6–30 км) с 15 потенциальными термоаномальными зонами на территории Республики Армения, коррелирующими с тектоническими структурами и активными литосферно-тектоническими взаимодействиями; области подкорового внедрения мантийного материала (100–110 км); экстремально низкоскоростные аномалии (180–200 км) как следствие литосферной деляминации. Подтверждено существование магматического канала коромантийного происхождения под северо-западным склоном вулкана Арагац (7–27 км) и установлена физико-геодинамическая дифференциация литосферы Большого Кавказа с запада на восток.

Положение 7. Совокупность фокальных механизмов землетрясений магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ территории Республики Армения и сопредельных районов за инструментальный период 2002–2022 гг., полученная методом первого вступления Р-волны для 371 события, демонстрирует кинематическое многообразие разломных подвижек (сдвиги, взбросы, надвиги, сбросы и их комбинации с доминированием сдвигового режима), пространственно согласованное с системой активных разломов территории и геодинамической обстановкой коллизийной зоны Аравийской и Евразийской плит, что обеспечивает количественную верификацию тектонической модели региона и формирует фундаментальную основу оценки сейсмической опасности.

Положение 8. Для вулканических областей характерна обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и параметром V_{s30} , противоречащая классической зависимости для невулканических областей и отражающая фундаментальную физико-геологическую закономерность вулканогенных провинций, обусловленную спецификой гипергенного выветривания и литологического строения вулканогенно-осадочных толщ.

Положение 9. Общациональная карта V_{s30} территории Республики Армения, построенная методом геостатистического кокригинга на основе 250 натуральных инструментальных измерений, демонстрирует доминирование высокоскоростных грунтов (450–900 м/с) и количественно обосновывает методологическую непригодность глобальных моделей и стандартных грунтовых классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий, формируя научное основание для пересмотра действующих нормативов сейсмостойкого проектирования.

Положение 10. Седиментационные котловины фундаментально модифицируют параметры сейсмических волновых полей через резонансное усиление, фокусировку сейсмической энергии, увеличение длительности колебательного процесса и трансформацию спектральных характеристик коды; разработанная методология построения синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции, обеспечивает корректную оценку расчётных сейсмических воздействий для условий территории Республики Армения.

Теоретическая значимость работы

Совокупность обобщённых в настоящем научном докладе результатов вносит существенный вклад в развитие фундаментальных представлений в области физики Земли, наблюдательной сейсмологии и геодинамики зоны континентальной коллизии:

- развиты представления о глубинном строении зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской плит через выявление трёхуровневой структуры скоростных аномалий и количественную характеристику термического режима коры и верхней мантии, что позволяет уточнить природу скоростных неоднородностей и количественно охарактеризовать связь скоростных аномалий с магматической активностью и региональным сейсмогенезом;
- раскрыты физические механизмы формирования дублетных землетрясений и релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах с обнаружением нового класса закономерностей в коллизионных тектонических обстановках, выражающихся в шестикратном сокращении числа афтершоков после второго события дублета;
- разработана методология идентификации тектонической и вулканотектонической природы землетрясений на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик и параметров тензора сейсмического момента; на примере центрального сегмента Эгейской вулканической дуги установлена физико-геодинамическая связь между процессами магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках;
- развиты представления о дальнедействующих эффектах катастрофических землетрясений в коллизионных зонах через установление статистически значимых косейсмических изменений кинематического режима на расстояниях, существенно превышающих ближнюю зону разрушения, что доказывает интегральный характер геодинамического отклика литосферы;
- впервые для территории Республики Армения и сопредельных районов выполнен системный расчёт фокальных механизмов 371 землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за период 2002–2022 гг. с построением карт пространственного распределения осей сжатия (P) и растяжения (T) главных тектонических напряжений и установлением связи разломных

- подвижек с активными геодинамическими блоковыми структурами коллизийной зоны;
- установлена новая фундаментальная закономерность - обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и параметром V_s30 для вулканических областей, противоречащая классическим зависимостям, разработанным для невулканических регионов, и расширяющая теоретические представления о связи морфометрических характеристик рельефа со скоростным строением приповерхностной части геологической среды;
 - развиты теоретические представления о влиянии латеральных неоднородностей литосферы - седиментационных котловин - на параметры сейсмических волновых полей: количественно показано, что котловинные структуры модифицируют не только амплитудно-частотный спектр, но и характеристики коды, длительность колебательного процесса и интегральную интенсивность регистрируемых сейсмограмм, что развивает физическую теорию волновых эффектов в неоднородных средах;
 - выявлены принципиальные различия между кривыми динамичности, построенными по максимумам ускорений и по параметру кумулятивной абсолютной скорости (CAV), что развивает теоретические основы нормирования сейсмических воздействий и инженерной интерпретации спектров реакции;
 - разработанный методологический комплекс декластеризации каталогов, статистической кластеризации сейсмических событий, томографической инверсии волновых полей, формализованного распознавания сейсмоопасных зон и генерации синтетических акселерограмм обладает структурной адаптируемостью и может быть распространён на другие орогенные области и вулканические провинции в пределах Альпийско-Гималайского пояса и сопоставимых тектонических обстановок мира.

Практическая значимость работы

Совокупность обобщённых в настоящем научном докладе результатов имеет следующее прикладное значение:

Сейсмогеодинамический мониторинг и инструментальная инфраструктура. Создана и введена в эксплуатацию аппаратно-программная геоинформационная инфраструктура непрерывного

мониторинга сейсмических и геофизических полей на территории Республики Армения, формирующая национальную систему сейсмологических наблюдений международного метрологического класса. Построенная карта магнитуды представительности ($M_c \approx 1,5$) обеспечивает научное обоснование оптимизации конфигурации наблюдательной сети и однородность исходных данных для всех сейсмоактивных зон региона.

Сейсмическое микрорайонирование. Полученные количественные оценки котловинных эффектов (резонансное усиление, фокусировка сейсмической энергии, увеличение длительности колебательного процесса) и построенная региональная карта V_s30 непосредственно применимы для инженерно-сейсмологического микрорайонирования урбанизированных территорий Республики Армения, расположенных в седиментационных котловинах сопоставимого тектонического строения.

Унифицированный декластеризованный каталог Тавро-Кавказского региона.

Впервые построенный унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона на основе системной интеграции национальных и международных каталогов представляет собой самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения, размещённый в открытом доступе для международного научного сообщества. Каталог обеспечивает региональную калибровку уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (GMPE), проведение вероятностной оценки сейсмической опасности (PSHA) и обновление национальных карт общего сейсмического районирования Республики Армения.

Вероятностная оценка сейсмической опасности. Полученная карта V_s30 является критически важной для региональной калибровки уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) и уточнения вероятностных оценок сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) территории Республики Армения и сопредельных регионов.

Прогноз сильных сейсмических событий. Установленные феноменологические закономерности дублетных землетрясений и пространственно-временного чередования интенсивности афтершоковых процессов формируют физическую основу для разработки моделей

среднесрочного и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках.

Сейсмостойкое проектирование и строительство. Разработанная методология построения синтетических акселерограмм и созданное специализированное программное обеспечение применимы для оценки динамического отклика зданий и сооружений при расчётных сейсмических воздействиях и для уточнения нормативной базы сейсмостойкого проектирования Республики Армения.

Пересмотр национальной нормативной базы. Установленная количественная непригодность глобальных моделей Vs30 и стандартных грунтовых классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий Республики Армения, а также выявленные принципиальные различия между кривыми динамичности по максимумам ускорений и по CAV формируют научное обоснование пересмотра действующих сейсмических строительных норм и практики сейсмического микрорайонирования республики.

Оценка геодинамических рисков. Результаты сейсмотомографических исследований - пространственное распределение скоростных аномалий, термический режим коры и верхней мантии, уточнённая геометрия сейсмогенных зон - применимы для комплексной оценки геодинамических рисков территории Республики Армения и сопредельных территорий зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит.

Международная применимость. Разработанный методологический комплекс - алгоритмы декластеризации каталогов, кластеризации сейсмических событий методами машинного обучения, формализованного распознавания сейсмоопасных зон (FCAZ), томографической инверсии, количественной оценки котловинных эффектов, построения карт Vs30 для вулканических областей и генерации синтетических акселерограмм - обладает структурной адаптируемостью и может быть распространён на другие орогенные области и вулканические провинции в пределах Альпийско-Гималайского пояса и сопоставимых тектонических обстановок мира.

Методология и методы исследования

Методологическую основу совокупности работ, обобщённых в настоящем научном докладе, составляет комплексный подход,

объединяющий современные методы наблюдательной сейсмологии (широкополосная инструментальная регистрация сейсмических колебаний с длиннопериодными велосиметрами международного метрологического класса, акселерометрическая регистрация сильных движений с расширенным динамическим диапазоном, непрерывные GNSS-наблюдения геодинамического класса); современные методы статистического анализа сейсмологических данных (оценка магнитуды представительности методом PQLX, алгоритмы декластеризации Gardner & Knopoff, Grünthal, Reasenberg, Zaliapin & Ben-Zion, статистический анализ магнитудного распределения по закону Гутенберга–Рихтера, анализ временных рядов афтершоков по закону Омори); методы машинного обучения (алгоритмы кластеризации K-means и DBSCAN, ансамблевый алгоритм случайного леса Random Forest, методология обучения с использованием одного класса one-class classification, формализованный метод FCAZ); методы решения обратных задач сейсмологии (2D-поверхностно-волновая томография на основе инверсии дисперсионных кривых волн Рэлея и Лява, моментно-тензорный анализ очагов землетрясений, локализация гипоцентров, расчёт фокальных механизмов землетрясений методом первого вступления P-волны); методы решения прямых задач сейсмологии (численное моделирование распространения сейсмических волн в неоднородных средах, итеративная процедура спектрального согласования при построении синтетических акселерограмм, геостатистические модели кокригинга Slope-based CoKriging, SCK); методы геофизического и геодинамического анализа (анализ временных рядов GNSS-наблюдений, построение карт пространственного распределения осей главных тектонических напряжений по совокупности фокальных механизмов). Программное обеспечение для реализации методологии включает международные пакеты сейсмологического анализа (ObsPy, SAC, SeisAn, MSNoise), программное обеспечение для томографической инверсии, системы машинного обучения (scikit-learn) и специализированное программное обеспечение, разработанное автором для построения синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов, обобщённых в настоящем научном докладе, обеспечивается:

- использованием метрологически корректных инструментальных данных международного стандарта (PQLX-классификация фоновых шумов, верификация работы оборудования по международным протоколам FDSN, ORFEUS, GEOFON);
- большим объёмом обработанных данных - около 1500 сейсмических событий за инструментальный период 1999-2018 гг., 250 натурных измерений Vs30, многолетние временные ряды непрерывных GNSS-наблюдений;
- применением апробированных методологий международного уровня и сравнительным анализом результатов различных методов (четыре алгоритма декластеризации, два алгоритма кластеризации, три этапа томографических исследований 2022–2025 гг.);
- независимой верификацией результатов на материале сопредельных регионов (остров Хайнань - для верификации связи топографического градиента и Vs30; Тихоокеанский сейсмический пояс - для верификации применимости методологий FCAZ и распознавания сейсмоопасных зон);
- сходимостью результатов, полученных существенно различающимися алгоритмами (декластеризация по Gardner & Knopoff, Grünthal, Zaliapin & Ben-Zion);
- согласованностью полученных результатов с известными геологическими, тектоническими и геофизическими особенностями исследуемого региона;
- публикацией результатов в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science (квартили Q1-Q4), и в ведущих отраслевых журналах из перечня ВКК РА, что обеспечивает их независимую профессиональную экспертизу - ключевой квалификационный признак диссертации в форме научного доклада по совокупности работ;
- многоступенчатой апробацией результатов в международном профессиональном сообществе на ведущих научных форумах (Генеральные ассамблеи ASC, EGU, AGU);

- внутренней методологической связностью результатов - все полученные выводы согласуются между собой и формируют целостную картину сейсмогеодинамической системы региона.

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в настоящем научном докладе, получены лично автором или при его определяющем научном участии. Автор является ведущим разработчиком методологий, основным исполнителем экспериментальных и теоретических работ и научным руководителем коллективных исследований по теме диссертации. В частности, автором лично выполнены: обоснование архитектуры и развёртывание сейсмогеодинамической наблюдательной сети; спектрально-временной анализ сейсмических помех, выбор оптимальных мест развёртывания станций и расчёт магнитуды представительности; разработка методологии идентификации тектонической и вулканотектонической природы землетрясений на примере Эгейской вулканической дуги с выдвиганием физико-геодинамической гипотезы о связи магматической инъекции с предельными упругими напряжениями; сравнительный анализ алгоритмов декластеризации сейсмологических каталогов Тавро-Кавказского региона; разработка усовершенствованной методологии декластеризации на основе ансамблевого алгоритма случайного леса; применение алгоритмов K-means и DBSCAN для кластеризации сейсмических событий; разработка методологий one-class classification и FCAZ для распознавания потенциально сейсмоопасных зон; анализ дублетных землетрясений Кахраманмараш и построение физико-геодинамической модели очаговой зоны с идентификацией субочагов магистрального разрыва; феноменологический анализ дублетного режима в Тавро-Кавказском регионе; 2D-поверхностно-волновая томография зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит с обработкой данных около 1500 сейсмических событий за период 1999–2018 гг. и физико-геодинамической интерпретацией трёхуровневой структуры скоростных аномалий; обработка временных рядов GNSS-наблюдений и количественная оценка косейсмических эффектов землетрясений Кахраманмараш на современную геодинамику Кавказа; расчёт фокальных механизмов 371 землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за инструментальный период 2002-2022 гг. с построением карт пространственного распределения осей главных

тектонических напряжений; 250 натуральных инструментальных измерений V_s30 и установление обратной корреляционной связи топографического градиента с параметром V_s30 для вулканических областей; построение общенациональной карты V_s30 территории Республики Армения; исследование котловинных эффектов на примере Ширакской седиментационной котловины; разработка методологии и программного обеспечения построения синтетических акселерограмм; сравнительный анализ кривых динамичности по максимумам ускорений и по параметру кумулятивной абсолютной скорости (CAV).

Апробация результатов исследования и официальное утверждение научного доклада

Основные научные положения и результаты диссертационной работы прошли многоступенчатую апробацию в международном профессиональном сообществе и были представлены в форме пленарных, секционных и стендовых докладов на ведущих международных научных конференциях и симпозиумах в области сейсмологии, геодинамики и инженерной сейсмологии - в том числе на Генеральных ассамблеях Азиатской сейсмологической комиссии (Asian Seismological Commission, ASC), Европейского союза наук о Земле (European Geosciences Union, EGU) и Американского геофизического союза (American Geophysical Union, AGU), - что обеспечило их независимую профессиональную экспертизу на международном уровне. Наиболее значимые научные результаты опубликованы в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science (квартили Q1 - Q4), - Bulletin of the Seismological Society of America, Earth-Science Reviews, Earthquake Science, Acta Geologica Sinica (English Edition), Russian Journal of Earth Sciences, - а также в ведущих рецензируемых журналах «Физика Земли», «Вопросы инженерной сейсмологии», «Геология и геофизика Юга России», «Геофизические исследования», что подтверждает научную новизну, достоверность и теоретическую значимость полученных результатов и обеспечивает квалификационный уровень настоящей работы как докторской диссертации в форме научного доклада, представленного по совокупности опубликованных работ.

По итогам всестороннего научно-экспертного рассмотрения научный доклад официально утверждён решением Учёного совета

Института геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова Министерства образования, науки, культуры и спорта Республики Армения как завершённое научно-квалификационное исследование, имеющее существенное значение для развития соответствующих отраслей геофизического знания.

Объём и структура научного доклада

Настоящая докторская диссертация представлена в форме научного доклада, защищаемого по совокупности опубликованных научных работ автора. Структура доклада включает: Содержание; Общее описание диссертации; Введение; четыре главы основного текста - Глава 1 «Инструментально-методологическое обеспечение сейсмологических наблюдений и первичной обработки данных на территории Республики Армения», Глава 2 «Методы машинного обучения в анализе сейсмичности Тавро-Кавказского региона: кластеризация и идентификация дублетных землетрясений», Глава 3 «Глубинное строение, современная геодинамика и фокальные механизмы землетрясений в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит», Глава 4 «Локальные инженерно-геологические условия и их влияние на параметры сейсмических воздействий на территории Республики Армения: карта Vs30, котловинные эффекты и нормативные спектры реакции»; Заключение; Список работ автора по теме диссертации; Авторефераты на армянском и английском языках; Список использованной литературы. Список работ автора по теме диссертации включает публикации в рецензируемых журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science (квартили Q1 - Q4), а также в ведущих отраслевых журналах, включённых в перечень ВКК РА, что обеспечивает квалификационное соответствие настоящей работы требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в форме научного доклада по совокупности опубликованных работ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем научном докладе представлено систематическое обобщение результатов комплексного решения совокупности актуальных прямых и обратных задач сейсмологии применительно к территории Республики Армения. Цикл обобщённых работ объединён единой методологической основой, базирующейся на данных созданной в 2024 году комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения международного метрологического стандарта, и направлен на формирование научно-методологических основ системного сейсмогеодинамического мониторинга территории Республики Армения как ключевого сегмента зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит - крупнейшего тектонически активного суперэлемента планеты в пределах Альпийско - Гималайского пояса [1, 2, 14].

Структура научного доклада организована по принципу методологической связности решаемых задач: от обоснования инструментально-методологической базы и алгоритмов первичной обработки данных (Глава 1), через решение обратных задач идентификации и распознавания сейсмических группировок методами машинного обучения, обоснования дублетной природы катастрофических сейсмических событий и анализа закономерностей дублетного режима сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе (Глава 2), а также обратных задач восстановления глубинной скоростной структуры литосферы методом 2D-поверхностно-волновой томографии, исследования современной геодинамики по данным GNSS-наблюдений и расчёта фокальных механизмов землетрясений (Глава 3), к решению прямых задач инженерной сейсмологии - построению общенациональной карты V_s30 территории Республики Армения, количественной характеристике котловинных эффектов и разработке методологии синтетических акселерограмм для условий ограниченной выборки инструментальных записей сильных движений (Глава 4). Совокупность представленных результатов формирует целостный научно-методологический комплекс, обеспечивающий переход от фрагментарных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу региона на единой инструментальной базе.

Глава 1. Инструментально-методологическое обеспечение сейсмологических наблюдений и первичной обработки данных на территории Республики Армения.

Глава посвящена инструментально-методологическому обеспечению сейсмологических наблюдений на территории Республики Армения и алгоритмам первичной обработки регистрируемых данных. В главе изложены принципы построения, архитектура и практическая реализация комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения, объединяющей в единой инструментальной конфигурации десять станций международного метрологического стандарта: широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса. На основе количественного спектрально-временного анализа фоновых сейсмических полей в 20 пунктах в соответствии с международными метрологическими стандартами (PQLX; McNamara & Buland, 2004) научно обоснован выбор оптимальных мест развёртывания станций, что обеспечило количественную характеристику фонового сейсмического шума и пространственную локализацию зон минимальных антропогенных и природных воздействий [2, 4, 5, 13, 15, 19, 32, 35, 65, 67].

Выполнены расчёт и пространственное картирование магнитуды представительности (M_c) каталога сейсмических событий для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов; установленное значение $M_c \approx 1,5$ определяет нижний порог чувствительности сети и свидетельствует о том, что созданная сеть обеспечивает систематическую регистрацию сейсмических событий полного магнитудного диапазона от слабых до сильных, непрерывно пополняющих региональный сейсмологический каталог, и удовлетворяет требованиям современных международных стандартов наблюдательной сейсмологии. Полученные результаты обеспечивают методологическую корректность последующего применения статистических законов сейсмичности (Гутенберга–Рихтера, Омори), оценок параметра b -value и алгоритмов декластеризации, что является необходимым условием корректной постановки и решения обратных задач сейсмологии и физически обоснованной оценки сейсмической опасности [3, 5, 34, 35, 64].

В рамках решения задачи декластеризации сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона выполнен сравнительный анализ применимости основных классов алгоритмов: детерминистических оконных алгоритмов Gardner & Knopoff (1974) и Uhrhammer (1986), модифицированного оконного алгоритма Grünthal (1985), стохастического алгоритма связывания эпицентров Reasenberg (1985) и алгоритма статистической классификации событий по метрике пространственно-временной близости Zaliapin & Ben-Zion (2013), основанного на теории ближайших соседей. Установлено, что в условиях Тавро-Кавказского региона наиболее статистически корректные результаты обеспечивают алгоритмы Gardner & Knopoff, Grünthal и Zaliapin & Ben-Zion, демонстрирующие сходимость в идентификации афтершоковых последовательностей и фоновой сейсмичности при существенно различающихся теоретических основах.

Показано, что усовершенствованная процедура декластеризации служит эффективным инструментом идентификации активных разломных структур и позволяет количественно характеризовать феномен пространственно-временной миграции сейсмичности - закономерного перемещения очаговой активности с концентрацией сильных землетрясений в определённых сегментах разломных систем, раскрывающего динамическую природу процессов перераспределения тектонических напряжений в коллизионных областях [1, 14].

Впервые для Тавро-Кавказского региона построен унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов (Армения, Турция - KOERI, AFAD; Ирана - Институт геофизики Тегеранского университета; международных центров ISC-GEM, EMSC), включающий 25 778 сейсмических событий с моментной магнитудой $M \geq 2,5$ за период 1961–2023 гг. в географических границах 36° – 44° с. ш. и 36° – 52° в. д. Установлены фундаментальные параметры сейсмичности: магнитуда представительности $M_c = 4,3$, параметры закона Гутенберга–Рихтера $b = 1,01$ и $a = 8,3$. Впервые применены диаграммы Вороного для количественной оценки качества декластеризации, что сформировало самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения, размещённый в открытом доступе для международного научного сообщества и обеспечивающий региональную

калибровку GMPE, проведение PSHA и обновление национальных карт ОСР Республики Армения [1].

На примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги - уникального естественного полигона, к которому приурочены протяжённый вулcano-тектонический линеамент Санторин-Аморгос, активные подводные вулканические сооружения Санторин-Колумбо и очаги сильнейших в Средиземноморском бассейне дублетных землетрясений 1956 г. ($M = 7,4$ и $M = 7,1$), - продемонстрирована возможность надёжной дифференциации тектонических и вулcano-тектонических землетрясений по данным широкополосных длиннопериодных станций на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик, длительности колебательного процесса и параметров тензора сейсмического момента. Установлена вулcano-тектоническая природа аномального сейсмического процесса, физически интерпретируемая как результат инъекции магматического вещества и флюидов из верхней мантии в магматический резервуар вулкана Колумбо с последующей диффузионной миграцией по системе линеамента; выдвинута физико-геодинамическая гипотеза о связи инъекции с предельными упругими напряжениями в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения, устанавливающая физическую связь между процессами магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках. Разработанный методологический подход обладает структурной адаптируемостью и может быть распространён на регионы Республики Армения с проявлениями активного вулканизма (вулкан Арагац, Гегамский вулканический массив) [20, 22, 25, 57].

Глава 2. Методы машинного обучения в анализе сейсмичности Тавро-Кавказского региона: кластеризация и идентификация дублетных землетрясений.

Глава посвящена решению двух взаимосвязанных классов обратных задач сейсмологии: формализованного распознавания сейсмических группировок и потенциально сейсмоопасных зон методами машинного обучения, а также идентификации дублетной природы катастрофических землетрясений с физико-геодинамической интерпретацией

пространственно-временных закономерностей дублетного режима сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе.

Выполнено сравнительное исследование эффективности фундаментальных алгоритмов кластеризации K-means и DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) в задачах выявления пространственно-временных кластеров сейсмических событий, характеристики геометрии разломных систем и обнаружения статистических аномалий регионального сейсмического процесса. Показано, что комплементарное применение указанных алгоритмов - где K-means обеспечивает корректную классификацию сферических кластеров фиксированного числа, а DBSCAN эффективен для группировок произвольной геометрической формы и переменной плотности, - обеспечивает существенное повышение достоверности и физической интерпретируемости результатов и позволяет устанавливать научно обоснованные корреляционные связи между статистическими характеристиками сейсмичности и геолого-тектоническими структурами региона, что принципиально для условий сложного блокового строения коры коллизийной зоны [1, 16, 23].

В рамках развития методологии формализованного распознавания потенциально сейсмоопасных зон Тавро-Кавказского региона разработаны новые методологии на основе развития классического подхода EPA (Earthquake-Prone Areas; Гельфанд, Кейлис-Борок и др.). Разработана схема распознавания высокосейсмичных дислокационных узлов на основе обучения с использованием одного класса (one-class classification), методологически адаптированная к условиям ограниченной выборки сильных сейсмических событий, а также формализованный метод FCAZ (Formalized Clustering and Zoning), в рамках которого объектами распознавания выступают эпицентры слабых землетрясений, что обеспечивает возможность динамической корректировки результатов в реальном временном масштабе. Разработанные методологии успешно апробированы на материале сейсмологических каталогов Кавказского региона, континентов Северной и Южной Америки, Евразии и субдукционных зон Тихоокеанского сейсмического пояса, что демонстрирует их структурную адаптируемость и универсальную применимость в условиях различных геодинамических обстановок [16, 23, 24].

На примере катастрофических восточно-турецких землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) обоснована их дублетная природа на основе анализа параметров фокальных механизмов, пространственно-временного распределения очагов и афтершоковых процессов. Под воздействием близмеридиональных тектонических напряжений мобильная Аравийская плита со средней скоростью конвергенции около 30 мм/год вклинивается в орогенные структуры Малого и Большого Кавказа, латерально раздвигая Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты в западном направлении, а Южно-Каспийскую и Иранскую - в восточном, что формирует сложно-напряжённое поле региональной тектоники. Установлено, что магистральный разрыв Газиантепского землетрясения ($M_w = 7,8$) представляет собой сложный нелинейный процесс разрывообразования и включает четыре субочага, что свидетельствует о многостадийной природе разрывного процесса в коллизионных тектонических обстановках. Показано, что оба события связаны не только пространственно-временной и энергетической корреляцией, но и общностью геолого-тектонической природы, причём первое событие выступает триггерным механизмом для последующего землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$) [26, 28, 59].

На основе усовершенствованной методологии декластеризации с применением ансамблевого алгоритма случайного леса (Random Forest), демонстрирующего статистически значимое превосходство как над традиционными детерминистическими подходами, так и над альтернативными моделями машинного обучения, впервые установлено, что дублетный режим сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе реализуется на всех энергетических уровнях - не только при сильных, но и при относительно слабых сейсмических событиях, проявляющихся во временном интервале от 15 минут до одного часа и характеризующихся миграционным процессом в интервале глубин до 20 км. Этот результат расширяет классические представления о дублетных землетрясениях как редком явлении, характерном исключительно для сильных событий, и переводит их в категорию универсального режима сейсмического процесса в коллизионных тектонических обстановках [40, 61, 62, 63].

Впервые выявлен принципиально новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах: установлено, что после второго события дублета количество афтершоков в области первого

события сокращается в шесть раз, что свидетельствует о кардинальной трансформации пространственно-временной эволюции афтершокового процесса при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы и раскрывает новый класс закономерностей релаксации напряжений в коллизионных тектонических обстановках.

Впервые установлено принципиальное физико-геодинамическое различие в пространственно-временной эволюции афтершоковых процессов для дублетных и одиночных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках. Афтершоки одиночного землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$) формируют круговую (кольцевую) пространственную структуру, отражающую локальную релаксацию напряжений в окрестности очага, тогда как афтершоки дублетных землетрясений 6 февраля 2023 г. формируют линейный магистральный образ вдоль разломной плоскости, отражающий последовательную активизацию смежных сегментов разломной системы. Это раскрывает существование двух фундаментально различных физических механизмов разрывообразования в коллизионных тектонических обстановках [1].

Глава 3. Глубинное строение, современная геодинамика и фокальные механизмы землетрясений в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит.

Глава посвящена комплексному решению трёх взаимосвязанных обратных задач сейсмологии в зоне континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит на основе данных созданной комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети: восстановлению глубинной скоростной структуры земной коры и верхней мантии методом 2D-поверхностно-волновой томографии, количественной характеристики современной геодинамики Кавказского региона по данным непрерывных GNSS-наблюдений и расчёту фокальных механизмов землетрясений с построением карт пространственного распределения осей главных тектонических напряжений для сравнительного анализа сейсмичности и тектоники территории Республики Армения.

Представлены результаты 2D-поверхностно-волновой томографии, объединяющие три последовательных этапа исследования (2022-2025 гг.), выполненных методом инверсии дисперсионных кривых поверхностных волн Рэлея и Лява в диапазоне периодов 5-80 с (глубинный охват до ≈ 200

км) по данным около 1500 сейсмических событий магнитудного диапазона $M \geq 3,5$, зарегистрированных 20–49 широкополосными и короткопериодными станциями за инструментальный период 1999–2018 гг. Выявлена устойчивая трёхуровневая структура скоростных аномалий региона. В диапазоне коротких периодов (глубины 6–30 км) идентифицированы 15 верхнекоровых горячих зон, ассоциированных с верхнекоровыми процессами активного деформирования вулканогенных и осадочных комплексов, осадочных бассейнов, вулканических массивов и зон неотектонических поднятий. В диапазоне средних периодов (глубины 100–110 км) выявлены низкоскоростные зоны, интерпретируемые как области подкорового внедрения (underplating) мантийного материала с неглубоким залеганием границы литосферы-астеносферы (LAB). В диапазоне длинных периодов (глубины 180–200 км) доминируют экстремально низкоскоростные аномалии, свидетельствующие об аномально малой мощности литосферы или о её локальном отсутствии, предположительно в результате процессов литосферной деляминации. Подтверждено существование вертикально протяжённой низкоскоростной аномалии под северо-западным склоном вулкана Арагац, прослеживаемой в интервале глубин 7–27 км и интерпретируемой как магматический канал коро-мантийного происхождения. Установлено, что Северо-Армянский блок перекрыт высокоскоростной аномалией для волн Рэлея и Лява, что свидетельствует о наличии под блоком жёсткой литосферной структуры. Впервые установлена физико-геодинамическая дифференциация литосферы Большого Кавказа с запада на восток, выявленная по различиям в структуре скоростных аномалий волн Рэлея и Лява в диапазоне коротких и средних периодов: западный сегмент Большого Кавказа характеризуется относительно жёсткой литосферной структурой, тогда как восточный сегмент демонстрирует признаки активного латерального течения литосферного материала, отражая региональную асимметрию процессов континентальной коллизии в орогенной структуре Кавказа [20, 21, 22].

По данным непрерывных GNSS-наблюдений на региональной сети станций геодинамического класса выполнена количественная оценка влияния удалённых катастрофических землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. на современный кинематический режим земной коры Кавказского региона. Установлено, что указанные события индуцируют

статистически значимые косейсмические изменения поля современных движений Кавказа, что доказывает интегральный характер геодинамического отклика земной коры на крупномасштабные разрывные процессы в сопряжённых тектонических провинциях и расширяет представления о дальнедействующих эффектах сильных землетрясений в коллизионных обстановках. По мере накопления длительных рядов наблюдений на созданной сейсмогеодинамической сети формируется фундаментальная эмпирическая база, обеспечивающая независимую верификацию выявленных эффектов и интеграцию полученных результатов в глобальный геодинамический контекст исследований процессов в зонах континентальной коллизии [17, 18, 29, 31, 36, 40, 41, 42, 43, 53, 56].

На основе расчёта фокальных механизмов 371 землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за инструментальный период 2002-2022 гг. методом первого вступления Р-волны по данным Международного сейсмологического центра (ISC), Евро-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) и Региональной службы сейсмической защиты Республики Армения выполнен систематический сравнительный анализ сейсмичности и тектоники территории Республики Армения. Установлено кинематическое многообразие разломных подвижек на территории - сдвиги, взбросы, надвиги, сбросы и их комбинации с доминированием сдвигового режима, - пространственно согласованное с системой активных разломов (Памбак-Севан-Сюникский, Гарнийский, Джавахетский, Гаварагетский, Ереванский, Гиратахский, Дебаклинский) и геодинамической обстановкой коллизионной зоны Аравийской и Евразийской плит; построенные карты пространственного распределения осей сжатия (Р) и растяжения (Т) главных тектонических напряжений демонстрируют преобладание сжатия с СВ-ЮЗ направления и растяжения с СЗ-ЮВ направления, что физически обосновывает кинематическую модель территории и формирует фундаментальную основу оценки сейсмической опасности [4, 27, 38, 39, 40, 57, 58].

Глава 4. Локальные инженерно-геологические условия и их влияние на параметры сейсмических воздействий на территории Республики Армения.

Глава посвящена решению прямых задач инженерной сейсмологии для территории Республики Армения: количественной характеристике

локальных инженерно-геологических условий и их влияния на параметры сейсмических воздействий, включая построение общенациональной карты параметра V_s30 , исследование котловинных эффектов на примере Ширакской седиментационной котловины и разработку методологии генерации синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции и адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения.

На основе 250 натурных инструментальных измерений параметра V_s30 - средней скорости распространения поперечных волн в верхней 30-метровой толще грунтов, выступающей в качестве основной количественной характеристики локальных грунтовых условий в современных уравнениях прогноза параметров грунтовых колебаний (Ground Motion Prediction Equations, GMPE), - впервые для вулканических областей установлена обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и скоростью поперечных волн в верхней 30-метровой толще грунтов [60, 66].

Полученный результат находится в принципиальном противоречии с классической закономерностью, установленной для невулканических областей (Wald & Allen, 2007), согласно которой увеличение градиента рельефа ассоциируется с более жёсткими высокоскоростными грунтами. Выявленный феномен верифицирован независимыми инструментальными измерениями на вулканических территориях острова Хайнань (Китай), где зарегистрирована аналогичная тенденция, что позволяет интерпретировать обратную корреляционную связь как фундаментальное свойство вулканогенных провинций, не являющееся уникальной чертой территории Республики Армения, а отражающее общую закономерность, обусловленную спецификой гипергенного выветривания и литологического строения вулканогенно-осадочных толщ.

С применением геостатистических моделей кокригинга на основе топографического градиента (Slope-based CoKriging, SCK), методологически адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения с отдельным моделированием вулканогенных и невулканических доменов, впервые построена общенациональная карта распределения параметра V_s30 для территории Республики Армения. Карта демонстрирует доминирование высокоскоростных грунтов в диапазоне $450 \div 900$ м/с, что согласуется с широким распространением на большей части территории

Республики Армения вулканогенных пород плиоцен-четвертичного возраста (лавы, туфы, игнимбриты). Полученный результат количественно обосновывает методологическую непригодность глобальных моделей (в частности, используемой в системе USGS ShakeMap) и стандартных грунтовых классификаций NEHRP и Eurocode 8 для региональных условий Республики Армения и формирует научное основание для пересмотра действующих нормативов сейсмостойкого проектирования. На примере Ширакской седиментационной котловины экспериментально установлено, что седиментационные котловины фундаментально модифицируют параметры сейсмических волновых полей: изменяют не только амплитудно-частотный спектр (резонансное усиление, фокусировка сейсмической энергии), но и спектральные коэффициенты коды, длительность колебательного процесса и интегральную интенсивность регистрируемых сейсмограмм. Сравнительный анализ волновых форм, зарегистрированных на скальных грунтах и в пределах котловинных условий, выявил отчётливые цуги волн со ступенчатым затуханием, доминирование низкочастотных составляющих спектра и существенно большую длительность колебательного процесса в седиментационной среде по сравнению со скальным основанием, что свидетельствует о принципиальной физико-механической трансформации исходного сейсмического сигнала под воздействием локальных инженерно-геологических условий Ширакской котловины. Полученные количественные оценки имеют непосредственное прикладное значение для инженерно-сейсмологического микрорайонирования урбанизированных территорий, расположенных в седиментационных котловинах сопоставимого тектонического строения [7, 8, 9, 10, 11, 30, 50, 51, 55, 66, 67].

Разработана методология генерации синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции и адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения, на основе совместной обработки единственной инструментальной записи сильных движений Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. ($M_w = 6,8$, $M_s = 7,0$) и регионального каталога слабых сейсмических событий ($M_w \geq 3,5$). Методология реализована на основе итеративной процедуры спектрального согласования с сохранением физически реалистичного фазового спектра, что обеспечивает корректное воспроизведение временной структуры расчётных воздействий. Создано специализированное программное

обеспечение, обеспечивающее автоматизированную генерацию акселерограмм, согласованных с заданными нормативными спектральными кривыми, и обладающее структурной универсальностью, обеспечивающей методологическую адаптируемость к различным международным нормативным системам (Eurocode 8, ASCE 7, ГОСТ 14.13330 и др.) [6, 10, 12, 14, 33, 37, 44, 45, 46, 47, 48, 52, 54, 61].

Выполнен сравнительный анализ кривых коэффициента динамичности $\beta(T, n)$, построенных по двум методологически различным подходам: по максимальным значениям ускорений грунтовых колебаний и по интегральному параметру кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV). Идентифицированы и количественно охарактеризованы принципиальные физико-методологические различия между указанными представлениями, что обосновывает необходимость пересмотра традиционных подходов к нормированию сейсмических воздействий и развития методологии инженерной интерпретации спектров реакции с учётом интегральных параметров колебательного процесса [12, 33, 37, 49].

В Заключении сформулированы основные научные результаты и итоговые выводы научного доклада, продемонстрирована методологическая взаимосвязь решённых прямых и обратных задач сейсмологии в рамках единого методологического комплекса, обозначено прикладное значение полученных результатов для системного сейсмогеодинамического мониторинга, инженерно-сейсмологического микрорайонирования, вероятностной оценки сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA), сейсмостойкого проектирования и краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий. Определены перспективы дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в области системного сейсмогеодинамического мониторинга территории Республики Армения и развития методов решения актуальных задач сейсмологии в коллизионных тектонических обстановках Альпийско-Гималайского пояса.

ГЛАВА 1.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

1.1. Создание и развёртывание комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети на территории Республики Армения

Принципиальной методологической задачей, предшествующей решению комплекса прямых и обратных задач сейсмологии, является обеспечение метрологически однородной и пространственно репрезентативной наблюдательной базы. В соответствии с этим принципом на участках, предложенных для развёртывания перспективных станций сейсмологического мониторинга на территории Республики Армения, выполнен детальный спектрально-временной анализ фоновых сейсмических и геодинамических полей и решена задача количественной оценки уровня инструментальных помех. По результатам исследований 20 пунктов классифицированы по интегральному уровню помех в соответствии с международными стандартами наблюдательной сейсмологии (PQLX, McNamara & Buland, 2004), что обеспечило количественную характеристику фонового сейсмического шума и пространственную локализацию зон минимальных антропогенных и природных воздействий.

Реализованный методологический подход обеспечил научно обоснованный выбор оптимальных мест развёртывания комплексных сейсмогеодинамических станций нового поколения. По итогам выполненной работы введены в эксплуатацию 10 сейсмогеодинамических станций международного стандарта, образовавших в 2024 году принципиально новую комплексную сейсмогеодинамическую наблюдательную сеть на территории Республики Армения (рис. 1).

Сеть впервые в республике объединяет в единой инструментальной конфигурации широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса (рис.2).

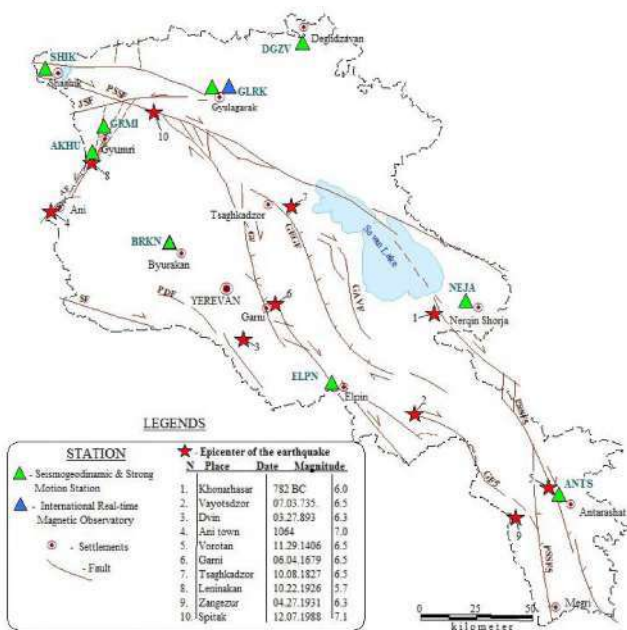


Рисунок 1. Конфигурация комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети на территории Республики Армения по состоянию на 2024 г.



Рисунок 2. Типовая архитектурно-логистическая компоновка сейсмогеодинамической станции комплексной наблюдательной сети (на примере станции ANTS в с. Антарашат, Сюникский марз).

Подобная конфигурация обеспечивает регистрацию полного спектра сейсмических колебаний – от высокочастотных локальных событий до длиннопериодных нормальных мод Земли, возбуждаемых телесеизмическими источниками, - а также непрерывный высокоточный мониторинг сейсмической активности и трёхкомпонентных смещений земной поверхности с миллиметровой точностью в пространственно-временном измерении. На основе пространственной конфигурации станций сейсмогеодинамической наблюдательной сети выполнены расчёт и пространственное картирование магнитуды представительности (M_c) каталога для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов. Полученные теоретические оценки впоследствии подтверждены данными зарегистрированных региональных сейсмических событий: установленное значение $M_c \approx 1,5$ определяет нижний порог чувствительности сети и свидетельствует о том, что созданная сеть обеспечивает систематическую регистрацию сейсмических событий полного магнитудного диапазона - от слабых до сильных, непрерывно пополняющих региональный сейсмологический каталог, и удовлетворяет требованиям современных международных стандартов наблюдательной сейсмологии (рис. 3).

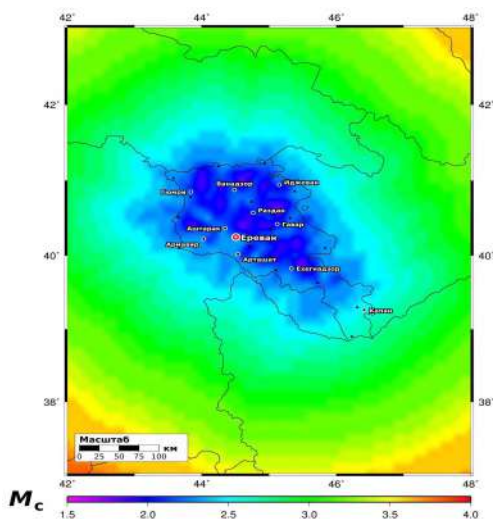


Рисунок 3. Карта пространственного распределения магнитуды представительности (M_c) для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов.

Построенная карта пространственного распределения Мс свидетельствует, что реализованная конфигурация сети обеспечивает получение метрологически однородных, статистически достоверных и пространственно сопоставимых исходных данных для всех сейсмоактивных зон республики, что является необходимым условием корректной постановки и решения обратных задач сейсмологии и физически обоснованной оценки сейсмической опасности.

В соответствии с целью настоящего научного доклада, направленной на обоснование и практическое внедрение аппаратно-программной геоинформационной инфраструктуры нового поколения, развёртывание комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети сопряжено с реализацией единой логистической схемы получения, передачи и первичной обработки регистрируемых данных. Аппаратно-программная геоинформационная инфраструктура объединяет в единый технологический контур станционные регистраторы, высокоскоростные защищённые каналы связи, серверные узлы первичного приёма потоков, систему автоматизированного контроля метрологической целостности данных и геоинформационную платформу пространственно-временной интеграции сейсмологических, акселерометрических и GNSS-наблюдений. Логистическая схема включает непрерывную регистрацию трёхкомпонентных сейсмических, инженерно-сейсмологических и геодинамических сигналов на станциях, потоковую передачу данных в режиме реального времени по протоколам международных сетевых стандартов наблюдательной сейсмологии (FDSN/SeedLink), их синхронизацию по единой системе временной привязки, многоуровневое архивирование и интеграцию в национальный сегмент международных сетей данных (ORFEUS, GEOFON, IRIS), что обеспечивает методологическую совместимость результатов и возможность их использования для решения прямых и обратных задач сейсмологии в рамках единого аппаратно-программного и методологического комплекса.

Принципиальной особенностью реализованной аппаратно-программной геоинформационной инфраструктуры, имеющей самостоятельное историческое и методологическое значение, является то, что - впервые за всю историю инструментальной сейсмологии Республики Армения - для получения сейсмологической информации в режиме непрерывных потоков большой объёмности (Big Data) применена

спутниковая связь как основной канал передачи данных от станций сейсмогеодинамической наблюдательной сети к национальному центру сбора и обработки. Спутниковый канал обеспечивает передачу непрерывных трёхкомпонентных сейсмических, акселерометрических и GNSS-поток с минимальными задержками, гарантированной доступностью и устойчивостью к локальным авариям наземной телекоммуникационной инфраструктуры, что является принципиально необходимым требованием для систем сейсмологического мониторинга в коллизионных тектонических обстановках, где сильные землетрясения сами могут разрушать наземные линии связи. Дополнительно в качестве резервного (альтернативного) канала передачи данных в логистическую схему интегрирована мобильная связь пятого поколения (5G), что обеспечивает гарантированное непрерывное получение информации даже в случае временной недоступности основного спутникового канала и формирует двухуровневую отказоустойчивую систему телекоммуникаций (рис. 4).

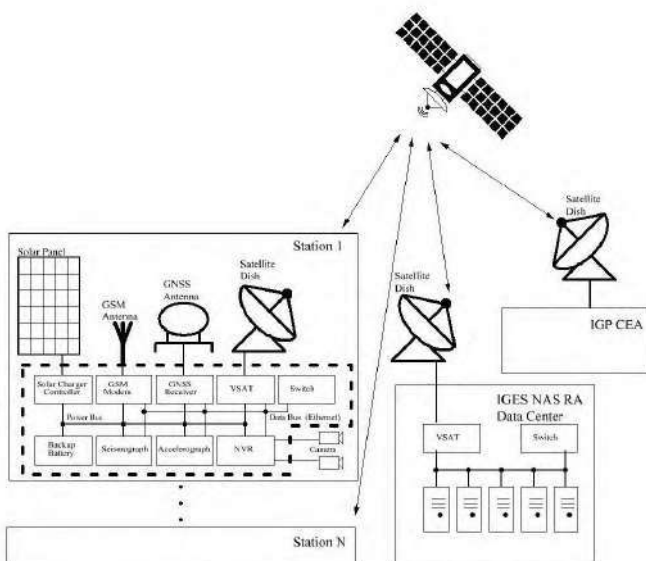


Рисунок 4. Схема логистики получения сейсмологических данных в режиме больших данных (Big Data) с использованием основного спутникового канала и резервного канала мобильной связи 5G - впервые в инструментальной сейсмологии Республики Армения.

Структурная организация реализованной логистики получения данных представлена на нижеприведённом рисунке 4 и охватывает четыре функциональных уровня: станционный (трёхкомпонентные широкополосные сейсмометры с собственным периодом 120 с, акселерометры сильных движений и GNSS-приёмники геодинамического класса), коммуникационный (основной спутниковый канал и резервный канал 5G), серверный (узлы потокового приёма, валидации метрологической целостности и многоуровневого архивирования больших данных) и геоинформационно-аналитический (платформа пространственно-временной интеграции и междисциплинарного анализа сейсмологических, акселерометрических и геодезических наблюдений с автоматизированной публикацией результатов в национальный сегмент международных сетей данных). Для оперативной обработки первичных данных интегрирован комплекс программных средств с применением инструментов искусственного интеллекта, обеспечивающий автоматическое детектирование событий, оценку их параметров и функционирование системы раннего сейсмического оповещения по первым вступлениям Р-волн (P-wave Early Warning).

Фундаментальное значение выполненных исследований состоит в создании научно-методической основы для решения широкого круга прямых и обратных задач сейсмологии региона, для физически обоснованной оценки сейсмической опасности территории Республики Армения, а также для идентификации прекурсорных аномалий, потенциально предшествующих сильным сейсмическим событиям, что представляет собой принципиальный методологический шаг в решении классической проблемы долгосрочного прогноза землетрясений в коллизионных тектонических обстановках.

1.2. Методологические проблемы декластеризации сейсмологических каталогов в Тавро-Кавказском регионе

Корректное построение декластеризованного каталога землетрясений является фундаментальным методологическим условием адекватной вероятностной оценки сейсмической опасности территории и применения статистических законов сейсмичности (Гутенберга-Рихтера, Омори), требующих статистической независимости анализируемых событий.

Алгоритмы декластеризации, разработанные для различных сейсмотектонических обстановок, существенно отличаются по теоретическим основам, статистическим критериям и пространственно-временным параметрам, что приводит к принципиальным различиям получаемых результатов. Согласно Azak et al. (2018), выбор алгоритма декластеризации может приводить к колебаниям до 20 % в значениях расчётных ускорений грунта при вероятностной оценке сейсмической опасности (PSHA), что подтверждает фундаментальное методологическое значение задачи сравнительного анализа эффективности существующих алгоритмов применительно к региональным условиям Тавро-Кавказского сегмента зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит.

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ применимости основных классов алгоритмов декластеризации к сейсмологическому каталогу Тавро-Кавказского региона. Рассмотрены детерминистические оконные алгоритмы Gardner & Knopoff (1974) и Uhrhammer (1986), модифицированный оконный алгоритм Grünthal (1985), стохастический алгоритм связывания эпицентров Reasenberg (1985) и алгоритм статистической классификации событий по метрике пространственно-временной близости Zaliapin & Ben-Zion (2013), основанный на теории ближайших соседей и не требующий априорного задания пространственно-временных параметров.

Впервые на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов (Армении, Турции - KOERI, AFAD; Ирана - Институт геофизики Тегеранского университета; международных центров ISC-GEM, EMSC) построен унифицированный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона за период 1961–2023 гг. в географических границах 36°–44° с.ш. и 36°–52° в.д., включающий 25 778 сейсмических событий с моментной магнитудой $M \geq 2,5$ (вплоть до $M_w = 7,8$); для процедуры декластеризации с порогом $M_w \geq 4,0$ отобраны 9 844 события (рис. 5). Установлены фундаментальные параметры сейсмичности: магнитуда представительности $M_c = 4,3$, параметры закона Гутенберга–Рихтера $b = 1,01$ и $a = 8,3$. Сравнительный анализ пяти алгоритмов декластеризации впервые установил их количественную эффективность для региональных условий Тавро-Кавказского региона: Gardner & Knopoff (1974) - сокращение сейсмичности на 46,0 % (выделение основных событий - 53,95 %); Grünthal (1985)-58,1 % (41,85 %); Uhrhammer

(1986)-31,2 % (68,83 %); Reasenberг (1985)-19,0 % (80,93 %); Zaliapin & Ben-Zion (2013) - 52,6 % (47,35 %). Установлено, что наиболее статистически корректные результаты обеспечивают алгоритмы Gardner & Knopoff (1974), Grünthal (1985) и Zaliapin & Ben-Zion (2013), демонстрирующие сходимость в идентификации афтершоковых последовательностей и фоновой сейсмичности при существенно различающихся теоретических основах.

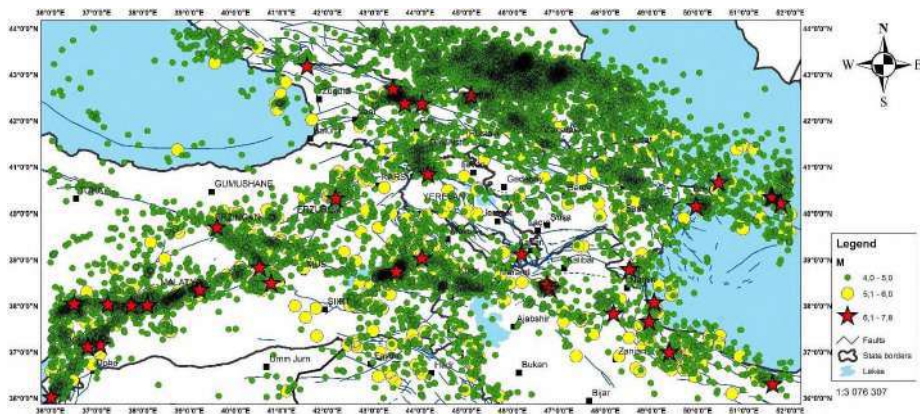


Рисунок 5. Пример результатов декластеризации сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона и их пространственная сходимость с основными элементами тектонической разломной системы региона.

Впервые применены диаграммы Вороного для визуализации пространственного распределения сейсмических событий после процедуры декластеризации и количественной оценки её качества (рис. 6). Установлено, что в полном недекластеризованном каталоге афтершоки составляют около 60 %, основные события (mainshocks) - около 40 %, что подтверждает количественную представительность анализируемой выборки. Декластеризованный каталог размещён в открытом доступе для международного научного сообщества и представляет собой самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения [1]. В процессе сравнительного анализа методов декластеризации выявлены принципиально новые феноменологические проявления региональной сейсмичности. Установлено, что усовершенствованная декластеризация представляет собой эффективный инструмент идентификации активных разломных структур, позволяющий

пространственно локализовать зоны концентрации фоновой сейсмичности и выделить тектонические структуры, контролирующие очаговые процессы регионального сейсмогенеза.

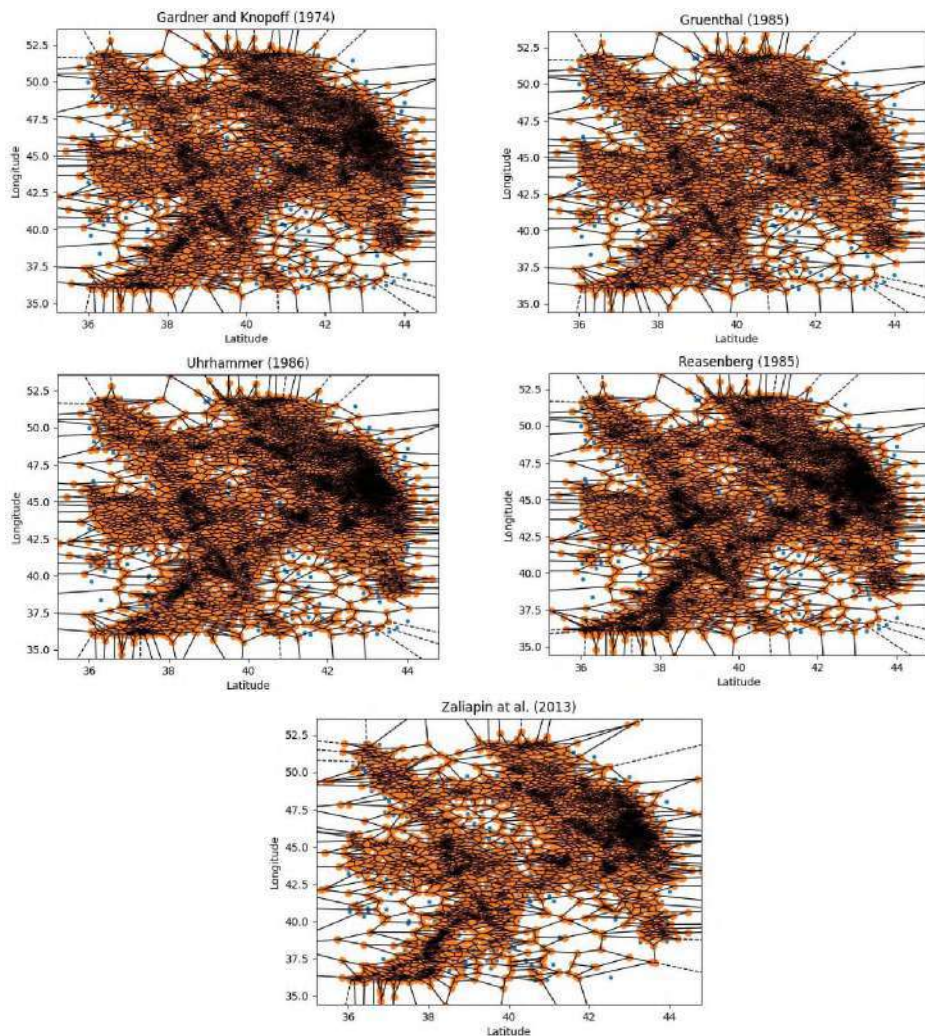


Рисунок 6. Диаграмма Вороного для пяти алгоритмов декластеризации (Gardner & Knopoff 1974, Grünthal 1985, Uhrhammer 1986, Reasenberg 1985, Zalipln & Ben-Zion 2013): пространственное распределение сейсмических событий Тавро-Кавказского региона после декластеризации.

Особое значение имеет обнаружение феномена пространственно-временной миграции сейсмичности - закономерного перемещения очаговой активности с концентрацией сильных землетрясений в определённых сегментах разломных систем. Выявленный феномен раскрывает динамическую природу процессов перераспределения тектонических напряжений в коллизионных областях и формирует физико-геомеханическую основу для развития моделей среднесрочного и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий.

Таким образом, проведённый сравнительный анализ алгоритмов декластеризации применительно к сейсмологическому каталогу Тавро-Кавказского региона установил методологическое преимущество комбинированного применения детерминистических и статистических подходов и обеспечил формирование статистически корректной базы для последующего решения задач кластеризации сейсмических событий, идентификации дублетных землетрясений и вероятностной оценки сейсмической опасности (Главы 2–3).

Полученные результаты раскрывают фундаментальную физико-геодинамическую природу пространственно-временной миграции сейсмичности как универсального механизма перераспределения тектонических напряжений в зонах континентальной коллизии. Разработанная методология декластеризации обладает структурной адаптируемостью и может быть распространена на другие орогенные области Альпийско-Гималайского пояса, включая территорию Республики Армения как ключевого сегмента рассматриваемого региона.

1.3. Идентификация тектонической и вулcano-тектонической природы землетрясений по данным широкополосных длиннопериодных станций (на примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги)

Различение тектонических и вулcano-тектонических землетрясений представляет собой фундаментальную задачу наблюдательной сейсмологии, корректность решения которой определяется частотно-динамическим диапазоном и метрологической чувствительностью регистрирующей аппаратуры. Применение широкополосных длиннопериодных станций (с собственным периодом велосиметров 120 с) в составе созданной

сейсмогеодинамической наблюдательной сети обеспечивает не только надёжную регистрацию удалённых телесеismicких событий, но и их генетическую дифференциацию на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик, длительности колебательного процесса и параметров тензора seismicкого момента очагового излучения.

Центральный сегмент Эгейской вулканической дуги представляет собой уникальный естественный полигон для решения подобной задачи. Здесь выделяется протяжённый вулcano-тектонический линеамент Санторин–Аморгос, к которому приурочены крупные активные подводные вулканические сооружения Санторин–Колумбо и очаги сильнейших в Средиземноморском бассейне дублетных землетрясений 1956 г. ($M = 7,4$ и $M = 7,1$). В качестве методологической основы анализа использовались данные длиннопериодной регистрации, алгоритмы кластерного анализа, параметры фокальных механизмов, спектрально-временные характеристики волновых форм, длительность колебательного процесса и полный тензор seismicкого момента.

Комплексный анализ установил, что аномальный seismicкий процесс имеет вулcano-тектоническую, а не чисто тектоническую природу и отражает глубинные процессы магматической деятельности по всей протяжённости линеамента. Принципиальная диагностическая возможность дифференциации основана на сопоставлении волновых полей событий двух типов (см. рис. 7): вулcano-тектонические землетрясения типа А характеризуются плавно затухающими цугами поверхностных волн и протяжённой кодой, отражающей неоднородности магматических резервуаров; события типа В обнаруживают резкое импульсное вступление Р-волны, размазанное вступление S, удлинённый колебательный процесс и узкополосный спектр 0,15–0,2 Гц поверхностных волн, диагностирующий процессы в магматической камере вулкана Колумбо. Динамика процесса включает одновременное возникновение пульсационных колебаний магматической камеры и тремора всего линеамента; кратное превышение девиаторных компонентов полного тензора момента над шаровыми для событий типа В указывает на процессы инфляции магматического расплава, выбросов газа или обрушения кровли камеры.

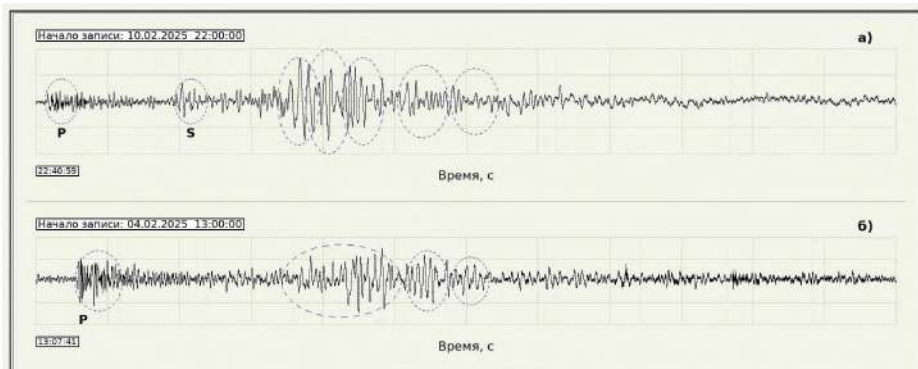


Рисунок 7. Сейсмограммы вулcano-тектонических землетрясений центрального сегмента Эгейской дуги (станция BRKH, 4 и 10 февраля 2025 г.): (а) землетрясение типа А с характерной для роевых событий волновой картиной; (б) землетрясение типа В с импульсным вступлением Р-волны, удлинённой кодой и узкополосными колебаниями 0,15-0,2 Гц, диагностирующее процессы в магматической камере вулкана Колумбо.

Выявленная сейсмическая активизация интерпретируется как результат инъекции магматического вещества и флюидов из верхней мантии в магматический резервуар вулкана Колумбо с последующей диффузионной миграцией по системе линейамента. Выдвинута физико-геодинамическая гипотеза о том, что причиной инъекции являются предельные упругие напряжения в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения, что устанавливает физическую связь между процессами магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках.

Таким образом, на примере центрального сегмента Эгейской вулканической дуги установлено, что длиннопериодные широкополосные станции обеспечивают надёжную дифференциацию тектонических и вулcano-тектонических землетрясений на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик и параметров тензора сейсмического момента.

Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие методологии генетической классификации сейсмических событий и расширяют физические представления о взаимосвязи магматических и

тектонических процессов в коллизионных тектонических обстановках. Разработанный методологический подход обладает структурной адаптируемостью и может быть непосредственно распространён на другие регионы с проявлениями активного вулканизма, включая территорию Республики Армения (вулкан Арагац, Гегамский вулканический массив).

Северная часть территории Республики Армения и сопредельное Джавахетское нагорье являются наиболее интересным объектом с точки зрения изучения природы возникновения землетрясений, поскольку в пределах этой компактной сейсмически активной территории сосредоточено более 30 % землетрясений, происходящих в пределах всего Кавказского региона. Аномально высокая концентрация сейсмических событий обусловлена сочетанием в её пределах сегментов активных разломных систем коллизионной зоны Аравийской и Евразийской плит, очаговых зон сильнейших исторических и инструментальных землетрясений (Спитакское 1988 г., $M_w = 6,8$; Ленинанканское 1926 г., $M = 5,7$) и молодых вулканогенных структур, включая периферию вулкана Арагац и Джавахетское нагорье, что превращает Северную Армению в природный полигон, на котором тектонические и вулcano-тектонические сейсмогенные процессы проявляются в непосредственном пространственном сопряжении и обнаруживают наивысшую плотность среди всех регионов Кавказа. Указанное обстоятельство придаёт задаче надёжной идентификации генетической природы слабых и умеренных землетрясений Северной Армении принципиальное значение не только для территории Республики Армения, но и для понимания сейсмогеодинамических процессов Кавказского региона в целом, что обосновывает фундаментальную необходимость применения здесь разработанной в настоящем подразделе методологии дифференциации тектонических и вулcano-тектонических землетрясений.

Выполненное в настоящем подразделе фундаментальное исследование на эталонном природном полигоне центрального сегмента Эгейской вулканической дуги - в условиях заведомо известной вулcano-тектонической природы сейсмических процессов и при подтверждённой связи магматической и сейсмической активности - обосновывает методологическую основу, обеспечивающую надёжную дифференциацию тектонических и вулcano-тектонических землетрясений по совокупности полных волновых полей, спектрально-временных характеристик,

длительности колебательного процесса и параметров полного тензора сейсмического момента, и тем самым предоставляет принципиальную возможность решить проблему различения и физико-геодинамического понимания природы слабых и умеренных землетрясений Северной Армении, Джавахетского нагорья, района вулкана Арагац и Гегамского вулканического массива. Внедрение разработанной методологии в практику сейсмогеодинамического мониторинга территории Республики Армения позволит количественно установить долю вулкано-тектонического компонента в наблюдаемой региональной сейсмичности, выявить очаговые зоны с преобладающим вкладом магматических и гидротермальных процессов, обосновать дифференцированные физические модели очагов для тектонических и вулкано-тектонических событий, что является необходимым условием корректной оценки сейсмической опасности областей, в которых сейсмогенез сопряжён с активным или реликтовым магматизмом коллизионной обстановки.

ГЛАВА 2.

МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ТАВРО-КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА: КЛАСТЕРИЗАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДУБЛЕТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

2.1. Кластеризация сейсмических событий и распознавание потенциально сейсмоопасных зон в Тавро-Кавказском регионе

Современный этап развития наблюдательной сейсмологии характеризуется систематическим накоплением больших объёмов сейсмологических данных (Big Data), обработка и интерпретация которых традиционными методами сталкиваются с фундаментальными ограничениями при выявлении скрытых пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса. Преодоление этих ограничений достигается за счёт применения методов машинного обучения, и прежде всего алгоритмов кластеризации, обеспечивающих формализованное выделение статистически значимых группировок сейсмических событий в многомерном признаковом пространстве. В настоящем исследовании выполнен сравнительный анализ практического применения двух фундаментальных алгоритмов кластеризации - K-means и DBSCAN - для статистического анализа сейсмологических данных Тавро-Кавказского региона, представляющего собой ключевой сегмент зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит. Эмпирической основой исследования послужил унифицированный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона за период 1961–2023 гг. в географических границах 36°–44° с.ш. и 36°–52° в.д., включающий 25 778 сейсмических событий с $M_w \geq 2,5$ и 15 619 событий с $M_w \geq 3,0$, построенный на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов (Армении, Турции - KOERI, AFAD; Ирана - Институт геофизики Тегеранского университета; международных центров ISC-GEM, EMSC, EPOS, IGES, IGUT). Рассмотрены теоретические основы алгоритмов K-means и DBSCAN с детальным анализом их применимости в задачах статистического анализа сейсмологических данных, методологические преимущества и ограничения, принципы выбора оптимальных параметров кластеризации, критерии

оценки качества полученных кластеров (индекс Krzanowski–Lai) и метрики внутрикластерной и межкластерной согласованности.

Впервые для Тавро-Кавказского региона установлена количественная эффективность алгоритмов кластеризации: алгоритм K-means с применением индекса Krzanowski–Lai обеспечил выделение 69 кластеров для каталога $M_w \geq 2,5$ и 99 кластеров для каталога $M_w \geq 3,0$, тогда как алгоритм DBSCAN при оптимальных параметрах $\epsilon = 5\ 000$ и $\text{MinSamp} = 4$ идентифицировал 502 кластера ($M_w \geq 2,5$) и 353 кластера ($M_w \geq 3,0$). Установлено, что выявленные кластеры пространственно совпадают с 20 тектоническими структурами региона, включая Восточно-Анатолийский и Северо-Анатолийский разломы, горные структуры Большого и Малого Кавказа, Эрзрум-Боржоми-Казбекский сейсмический линеамент, Хой-Предараксин-Апшеронский сейсмический линеамент и другие крупные глубинные разломные системы. Эффективность алгоритмов K-means и DBSCAN при выявлении пространственно-временных кластеров сейсмических событий, характеристики геометрии разломных систем и обнаружении статистических аномалий регионального сейсмического процесса продемонстрирована на материале экспериментальных результатов, полученных по данным сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона. Впервые установлена дифференциация геометрии кластеров: кластеры в области Ванского сегмента и Джавахетского разлома демонстрируют круговые геометрические образы, тогда как кластеры, ассоциированные с Восточно-Анатолийским и Северо-Анатолийским глубинными разломами, формируют протяжённые линейные структуры, согласующиеся с конфигурацией разломных плоскостей. Выполнено сопоставление результатов кластеризации с моделью сейсмических источников ESHM20 (Европейская модель сейсмической опасности 2020 г.) и базой активных разломов EMME, что впервые обосновало необходимость пересмотра границ зон сейсмических источников в трёх ключевых сегментах региона: системе разлома Гайлату–Северо-Тебризский, Восточно-Анатолийской разломной зоне (зона Кахраманмараш) и складчатонадвиговом поясе Большого Кавказа. Результаты выполненного исследования подтверждают высокий методологический потенциал алгоритмов машинного обучения и формализованных методов кластеризации применительно к задачам статистического анализа сейсмологических данных и демонстрируют способность алгоритмов K-

means и DBSCAN раскрывать фундаментальные пространственно-временные закономерности регионального сейсмогенеза. Совместное применение указанных алгоритмов, методологически дополняющих друг друга - K-means обеспечивает корректную классификацию сферических кластеров фиксированного числа с детальной фрагментацией сейсмотектонических зон (Джавахетское плато, Северная Армения, зона Ван, зона Хоя, Восточно-Анатолийский и Северо-Анатолийский разломы), тогда как DBSCAN эффективен для группировок произвольной геометрической формы и переменной плотности с устойчивостью к шумовым выбросам и выделением крупнейшего кластера из 1 556 событий $M_w \geq 4,0$ в складчато-надвиговом поясе Большого Кавказа, - обеспечивает существенное повышение достоверности и физической интерпретируемости результатов и позволяет устанавливать научно обоснованные корреляционные связи между статистическими характеристиками сейсмичности и геолого-тектоническими структурами региона (рис. 8).

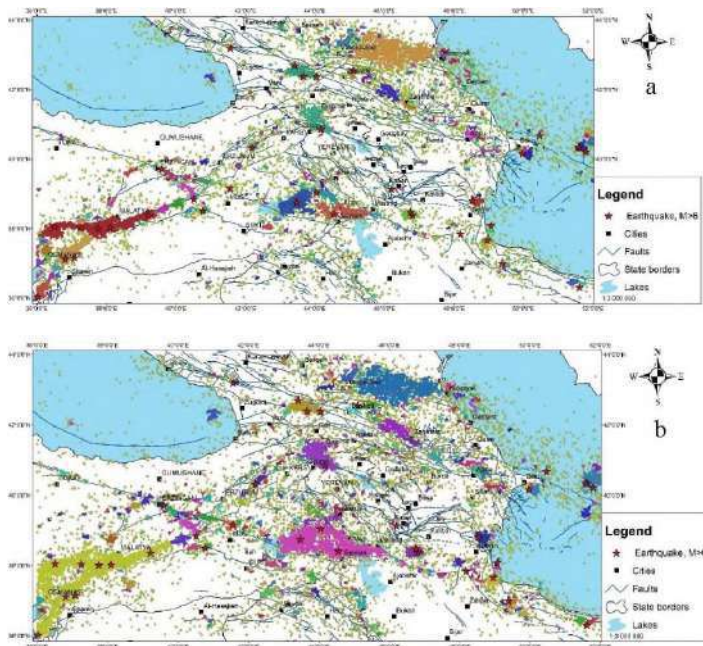


Рисунок 8. Результаты комплементарного применения алгоритмов кластеризации K-means (a) и DBSCAN (b) к сейсмологическому каталогу Тавро-Кавказского региона.

Во второй части подраздела представлены результаты развития классического подхода EPA (Earthquake-Prone Areas; Гельфанд, Кейлис-Борок и др.), направленные на разработку новых методологий формализованного распознавания сейсмоопасных зон. Разработана схема распознавания высокосейсмичных дислокационных узлов на основе обучения с использованием одного класса (one-class classification), методологически адаптированная к условиям ограниченной выборки сильных сейсмических событий, а также формализованный метод FCAZ (Formalized Clustering and Zoning), в рамках которого объектами распознавания выступают эпицентры слабых землетрясений, что обеспечивает возможность динамической корректировки результатов в реальном временном масштабе по мере поступления новых данных. Пример практического применения разработанных методологий для Кавказского региона представлен на рис. 9 в виде карты потенциально сейсмоопасных зон, выявленных на основе совместного анализа сейсмологического каталога и активных разломных структур.

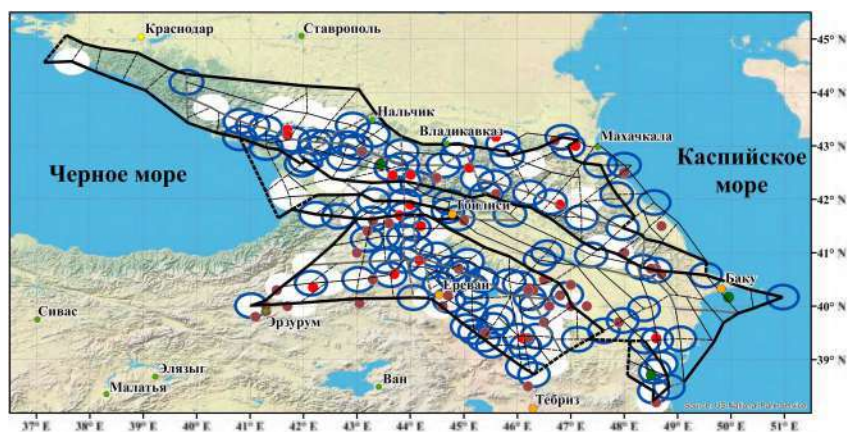


Рисунок 9. Карта потенциально сейсмоопасных зон Кавказского региона, выявленных методом FCAZ.

Разработанные методологии успешно апробированы на материале сейсмологических каталогов Кавказского региона, континентов Северной и Южной Америки, Евразии, а также субдукционных зон Тихоокеанского сейсмического пояса, что демонстрирует их структурную адаптируемость и

универсальную применимость в условиях различных геодинамических обстановок.

2.2. Обоснование дублетной природы сейсмического процесса на примере восточно-турецких землетрясений 6 февраля 2023 г.

Региональная сеймотектоническая обстановка очаговых зон восточно-турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. определяется сложной геодинамической структурой взаимодействия крупных литосферных макро и мезоплит. Под воздействием близмеридиональных тектонических напряжений мобильная Аравийская плита со средней скоростью конвергенции около 30 мм/год вклинивается в орогенные структуры Малого и Большого Кавказа, латерально раздвигая Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты в западном направлении, а Южно-Каспийскую и Иранскую - в восточном, что формирует сложно-напряжённое поле региональной тектоники (рис. 10).

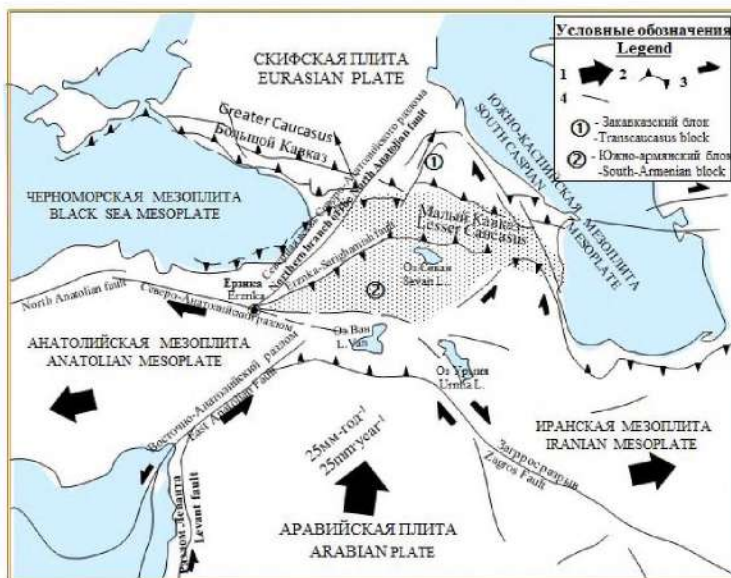


Рисунок 10. Схема основных плитотектонических элементов и трансрегиональных глубинных разломов исследуемой территории в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит.

На основе анализа пространственного распределения очагов сильнейших сейсмических событий региона ($M \geq 6,7$ за период с 1900 г. по настоящее время) установлена их приуроченность к основным глубинным разломным структурам. Очаги двух первых сильнейших землетрясений 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) локализованы на Восточно-Анатолийском разломе вблизи городов Газиантеп и Кахраманмараш (рис. 11).

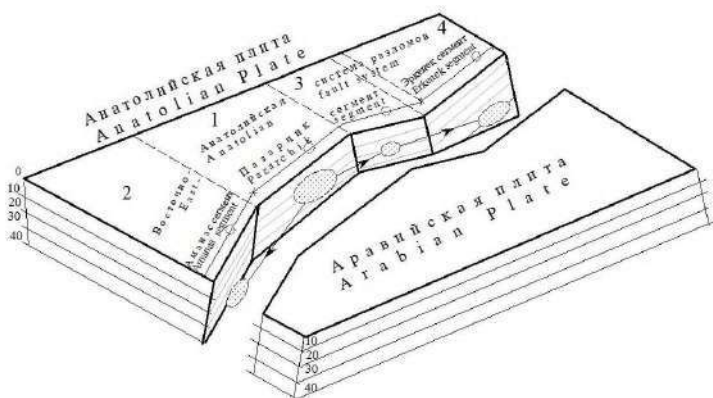


Рисунок 11. Геодинамическая модель очага Газиантепского землетрясения.

Анализ параметров фокальных механизмов землетрясений 6 февраля 2023 г. в совокупности с пространственно-временными характеристиками сейсмического процесса позволяет интерпретировать их как дублетные землетрясения, послужившие триггерным механизмом для последующего землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$). Детальный анализ инструментальных данных Газиантепского землетрясения ($M_w = 7,8$) обеспечил определение динамических параметров и спектральных характеристик очагового излучения; установлено, что магистральный разрыв представляет собой сложный нелинейный процесс разрывообразования, включающий четыре субочага, что свидетельствует о многостадийной природе разрывного процесса в коллизионных тектонических обстановках.

Построенная геодинамическая модель сейсмического процесса 6 февраля 2023 г. раскрывает фундаментальные закономерности разрывообразования и характерные особенности сейсмогенеза в сегменте Восточно-Анатолийской разломной системы. Установленные физико-

геодинамические характеристики дублетного режима служат экспериментальным обоснованием для перехода к систематическому анализу дублетных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе методами машинного обучения (подраздел 2.3) и формируют основу для развития физически обоснованных моделей среднесрочного и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий в зонах континентальной коллизии.

2.3. Анализ закономерностей проявления дублетных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе методами машинного обучения

Сейсмологические каталоги представляют собой фундаментальную эмпирическую основу для исследования динамики разломных зон и количественной оценки сейсмической опасности территорий, причём фоновая сейсмичность выступает наиболее информативным индикатором скоростей современного тектонического деформирования. Процедуры декластеризации, направленные на формализованное разделение афтершоковых последовательностей и фоновой сейсмичности, традиционно опираются на пространственно-временные критерии разделения событий. Классические алгоритмы, основанные на метрике расстояния до ближайшего соседа (Nearest Neighbor Distance, NND), характеризуются систематическими методологическими погрешностями, обусловленными применением линейных порогов разделения, что ограничивает их эффективность в условиях сложной геодинамической структуры коллизионных областей.

В настоящем исследовании предложено принципиальное усовершенствование методологии декластеризации на основе аппарата машинного обучения, реализованное путём обучения классификационных моделей на синтетических сейсмологических каталогах с заранее известной структурой кластеризации. Установлено, что классификаторы, построенные на основе ансамблевого алгоритма случайного леса (Random Forest), демонстрируют статистически значимое превосходство как над традиционными детерминистическими подходами, так и над альтернативными моделями машинного обучения при решении задачи различения фоновой сейсмичности и афтершоковой активности. Применение комплекса разработанных алгоритмов к анализу афтершоковых процессов катастрофических землетрясений Кахраманмараш 6 февраля

2023 г. и последующего землетрясения 20 февраля 2023 г. позволило получить принципиально новый научный результат: установлены отчётливые закономерности в пространственно-временном распределении афтершоковых последовательностей и дублетных сейсмических событий, не выявляемые традиционными методами.

Под дублетными землетрясениями в настоящей работе понимаются пары сейсмических событий, локализованных в непосредственной пространственной и временной близости и характеризующихся, как правило, сходными параметрами фокальных механизмов. Установлено, что пространственно-временное распределение выявленных дублетов не является стохастическим, а подчиняется закономерностям, свидетельствующим о существовании физически обоснованных механизмов перераспределения тектонических напряжений вдоль смежных сегментов разломной системы. Полученные результаты раскрывают принципиально новые возможности для понимания процессов взаимодействия разломных структур и динамики очагового разрыва в ходе афтершоковой последовательности в коллизионных тектонических обстановках.

Установлено, что феномен дублетных землетрясений преимущественно реализуется в сложно построенных тектонических условиях на различных иерархических уровнях разломной структуры. В пределах Тавро-Кавказского региона зафиксирован дублет сильных землетрясений, охвативший всю территорию региона; при этом дублетный режим сейсмичности генерируется не только при сильных, но и при относительно слабых сейсмических событиях, что было впервые выявлено авторами перед катастрофическим Кахраманмарашским землетрясением 6 февраля 2023 г. Знаменательно, что выявленные события проявляются вариативно - как в форме классических дублетов, так и в виде сейсмических роёв. Для слабых сейсмических событий установлено, что они возникают во временном интервале от 15 минут до одного часа и характеризуются миграционным процессом как от поверхности к глубине, так и в обратном направлении, регистрируясь в интервале глубин до 20 км.

Впервые установлено, что афтершоковые процессы дублетных землетрясений обладают принципиально специфическими физическими характеристиками. В ходе турецко-сирийского сейсмического события после основного толчка магнитудой $M_w = 7,8$ последовавший в течение 9 часов второй толчок $M_w = 7,5$ привёл к кардинальной трансформации

пространственно-временной эволюции афтершокового процесса: количество афтершоков в области первого толчка сократилось в шесть раз, что раскрывает новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы. Установлено, что рассматриваемые два землетрясения связаны не только пространственной, временной и энергетической корреляцией, но также общностью геолого-тектонической природы, что позволяет физически интерпретировать феномен дублетных землетрясений через анализ структурных особенностей афтершоковых процессов. В ходе исследования сильных землетрясений магнитудного диапазона $M \geq 6,0$ в Тавро-Кавказском регионе установлена принципиальная пространственная закономерность.

Анализ карты эпицентров сильнейших исторических землетрясений (рис. 12) демонстрирует, что практически все очаги сильных событий приурочены к основным трансрегиональным глубинным разломам региона, что подтверждает фундаментальный принцип структурного контроля сейсмогенеза активными разломными структурами в условиях континентальной коллизии.

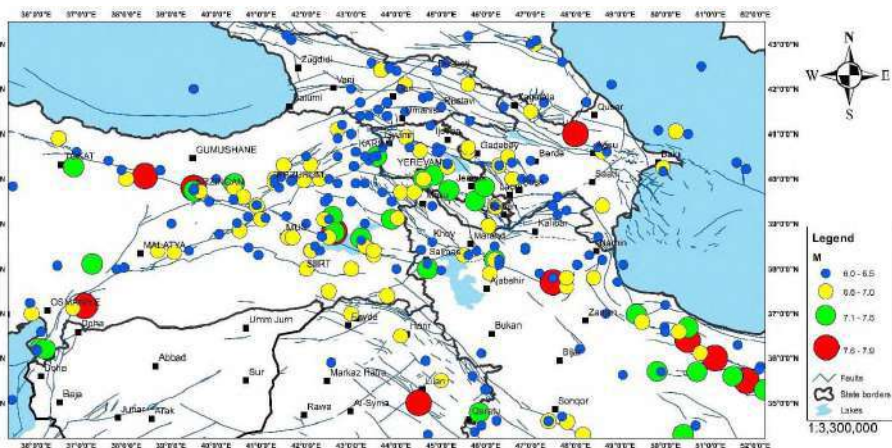


Рисунок 12. Сильнейшие сейсмические события Тавро-Кавказского региона за период от $\approx 1,8$ млн лет до 28 февраля 2023 г.

Из карты следует, что современное развитие и пространственно-временная миграция слабой сейсмичности, особенно проявившаяся после катастрофических турецко-сирийских землетрясений 6 февраля 2023 г., реализуется преимущественно в пределах очаговых зон ранее произошедших сильных землетрясений Тавро-Кавказского региона. Принципиально важно, что карта свидетельствует о характерной для региона особенности - устойчивом проявлении парных (дублетных) землетрясений, наиболее отчётливо выраженном в магнитудном диапазоне $M=6,6-7,0$. Это означает, что в пределах известных очаговых зон Тавро-Кавказского региона в течение определённых временных интервалов закономерно возникают парные сейсмические события, что имеет принципиальное значение для развития методологии долгосрочного прогноза сильных землетрясений.

Установлено, что обнаруженный феномен дублетных землетрясений проявляется не только при сильных событиях, но и при землетрясениях сравнительно меньшего магнитудного диапазона $M = 6,0-6,5$; статистический анализ магнитудного распределения свидетельствует о доминировании событий $M = 6,0-6,5$ (89 событий), тогда как в диапазонах $M = 6,6-7,0$, $M = 7,1-7,5$ и $M = 7,6-7,9$ зарегистрировано соответственно 30, 10 и 4 события, что согласуется с фундаментальным законом повторяемости Гутенберга-Рихтера и подтверждает статистическую представительность анализируемой выборки.

Впервые установлено, что выявленный феномен парности сильных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе базируется на унифицированном сейсмологическом каталоге региона за период 1961–2023 гг. (25 778 сейсмических событий с $M \geq 2,5$; 9 844 события с $M_w \geq 4,0$ для процедуры декластеризации; магнитуда представительности $M_c = 4,3$; параметры закона Гутенберга-Рихтера $b = 1,01$, $a = 8,3$), построенном на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов (Армении, Турции - KOERI, AFAD; Ирана - Институт геофизики Тегеранского университета; международных центров ISC-GEM, EMSC). Декластеризованный каталог размещён в открытом доступе для международного научного сообщества и формирует научно-методологическую основу для долгосрочного прогноза сильных землетрясений в Тавро-Кавказском регионе и сопоставимых тектонических обстановках Альпийско-Гималайского пояса.

Детальный количественный анализ афтершоковых процессов в очаговой зоне катастрофических землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. впервые выявил принципиальные физические закономерности релаксации тектонических напряжений: за 9 часов до второго события дублета ($M_w = 7,5$) на Восточно-Анатолийском разломе (ВАР) зарегистрировано 170 афтершоков; в течение 9 часов после второго события - 134 афтершока, формирующих магистральный линейный образ под углом к ВАР с пересечением в районе города Малатья (из них 30 афтершоков локализованы непосредственно на ВАР); установлено, что после второго события дублета количество афтершоковых процессов на ВАР сокращается приблизительно в шесть раз, что свидетельствует о кардинальной трансформации пространственно-временной эволюции афтершокового процесса при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы.

Впервые установлено принципиальное физико-геодинамическое различие в пространственной структуре афтершоков для дублетных и одиночных сейсмических событий: для землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$) за 18 часов до главного события зарегистрировано 29 афтершоков (из которых 27 локализованы в очаговой зоне ранее произошедших дублетных событий $M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$), за 9 часов - 18 афтершоков (двукратное сокращение), за 9 часов после главного события - 96 афтершоков (из которых 24 локализованы в очаговой зоне дублета 6 февраля 2023 г.), формирующих отчётливую круговую (кольцевую) пространственную структуру, принципиально отличную от линейного миграционного процесса дублетных землетрясений 6 февраля 2023 г., что свидетельствует о дифференциации физических механизмов разрывообразования для дублетных и одиночных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная методология анализа дублетных землетрясений на основе алгоритмов машинного обучения обладает структурной адаптируемостью и может быть применена для развития физически обоснованных моделей среднесрочного и долгосрочного прогнозирования сильных сейсмических событий в зонах континентальной коллизии.

ГЛАВА 3.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ, СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНЕ КОЛЛИЗИИ АРАВИЙСКОЙ И ЕВРАЗИЙСКОЙ ПЛИТ

3.1. 2D-поверхностно-волновая томография зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит: скоростные аномалии, тектоническая активность и строение литосферы (2022–2025 гг.)

В настоящей главе представлены фундаментальные результаты комплекса исследований 2D-поверхностно-волновой томографии, объединяющие три последовательные работы (2022–2025 гг.) [20,21,22] и направленные на детальную характеризацию скоростных аномалий земной коры и верхней мантии, выявление высокоскоростных и низкоскоростных аномалий, описание тектонической активности и определение геологической стратификации литосферы в зоне современной континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит.

Несмотря на длительную историю инструментальных наблюдений, многие фундаментальные вопросы региональной геодинамики – термомеханическая эволюция граничных взаимодействий литосферных плит, физика литосферных и мантийных процессов, кинематика активных разломных систем, механизмы континентального утонения и интегральный термический режим литосферы – остаются предметом научной дискуссии и требуют принципиально нового уровня экспериментального обоснования. Метод сейсмической томографии, основанный на анализе характеристик сейсмических волн, генерируемых в земной коре и верхней мантии и распространяющихся по недрам Земли, обеспечивает наиболее эффективный инструмент решения данной задачи: волны распространяются с большей скоростью через холодные плотные среды и с меньшей – через термически нагретые геологические комплексы, что обеспечивает физическую основу для томографической инверсии.

В качестве методологической основы построения 2D-томографических карт применена 2D-линейная инверсия дисперсионных кривых поверхностных волн Рэлея и Лява (метод Ditmar–Yanovskaya) в диапазоне периодов от 5 до 80 с (глубинный охват до ≈ 200 км). В качестве экспериментальной базы использованы локальные и региональные данные

около 1 500 сейсмических событий магнитудного диапазона $M \geq 3,5$, зарегистрированных 20–49 широкополосными и короткопериодными станциями за инструментальный период с 1999 по 2018 г. Полученные 2D-томографические распределения демонстрируют значительную пространственную вариативность скоростей распространения поверхностных волн в различных по структурно-вещественному составу геологических комплексах Кавказа и Республики Армения. В рамках принятой методологической схемы интерпретации низкоскоростные томографические аномалии ассоциированы с термически нагретыми областями (горячими зонами), тогда как высокоскоростные аномалии - с холодными плотными областями. На основе этой методики на обширной территории со сложным тектоническим строением выполнена количественная характеристика горячих зон и обширных холодных асейсмичных областей.

В диапазоне коротких периодов ($5 \leq T \leq 25$ с; глубинный охват 6-30 км) результаты исследования 2022 г. позволили впервые для территории Кавказского региона идентифицировать 15 верхнекоровых потенциальных термоаномальных зон, ассоциированных с верхнекоровыми процессами активного деформирования геологических комплексов, осадочных бассейнов, вулканических массивов (Эльбрус, Арагац, Арарат, Казбек), сегментами активных разломных систем (Памбак-Севан-Сюникский, Северо-Тебризский разломы), нефтегазоносными структурами Центрально-Армянского блока и зонами активных литосферно-тектонических взаимодействий, обоснованных как потенциальные источники геотермальной энергии Республики Армения. Впервые в рамках исследования 2025 г. под северо-западным склоном вулкана Арагац установлена вертикально протяжённая низкоскоростная аномалия в интервале глубин 7–27 км, интерпретируемая как магматический канал коро-мантийного происхождения и принципиально отличающаяся от результатов предшествующих исследований [Koulakov et al., 2012; Zabelina et al., 2016]. Установлено также, что Северо-Армянский блок перекрыт высокоскоростной аномалией, проявляющейся как для волн Рэлея, так и для волн Лява, что свидетельствует о наличии под блоком жёсткой литосферной структуры.

В диапазоне средних периодов ($30 \leq T \leq 45$ с; глубина ≈ 100 –110 км) исследование 2022 г. выявило 2 горячие зоны на глубине ≈ 108 км.

Результаты 2023 г. показали, что низкоскоростные зоны пространственно ассоциированы с областями, интерпретируемыми как зоны подкорового внедрения (underplating) мантийного материала в нижнюю кору с неглубоким залеганием границы литосферы–астеносферы (LAB), тогда как высокоскоростные зоны указывают на наличие нормальной континентальной коры, перекрывающей стабильную и мощную литосферную мантию или океаническую литосферную плиту. Исследование 2025 г. выявило экстремально высокоскоростные аномалии в отдельных структурных единицах региона (в частности, в Малом Кавказе), согласующиеся с современными процессами субдукции; экстремально низкоскоростные аномалии отражают характеристики верхней мантии и свидетельствуют об аномально малой мощности литосферы в сочетании с горячей астеносферой. Впервые в исследовании 2023 г. для Большого Кавказа установлена физико-геодинамическая дифференциация литосферных свойств с запада на восток – слабая, горячая и термически модифицированная литосфера в западном сегменте vs. более жёсткая и холодная литосфера в восточном сегменте, что физически обосновывает дифференциацию режимов сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках и возможный механизм субдукции литосферы Курского бассейна под Скифскую платформу с генерацией глубинных землетрясений.

В диапазоне длинных периодов ($50 \leq T \leq 80$ с; глубина $\approx 180\text{--}200$ км) исследование 2022 г. установило, что большая часть исследуемой территории перекрыта экстремально низкоскоростными аномалиями, интерпретируемыми как устойчивые горячие зоны. Результаты 2023 г. показали, что томографические карты длиннопериодных волн отражают преимущественно скоростную структуру верхней мантии, демонстрируя экстремально низкоскоростные и экстремально высокоскоростные аномалии. Исследование 2025 г. выявило преимущественно равномерное пространственное распределение скоростей с локальными зонами очень низкоскоростных аномалий в верхней мантии, что интерпретируется как следствие аномально малой мощности литосферы или её локального отсутствия в большинстве структурных единиц исследуемого региона, по всей видимости, в результате процессов литосферной деляминации.

Сопоставление полученных результатов с данными предшествующих сейсмологических исследований Кавказского региона демонстрирует их приемлемое согласование с известными геологическими

особенностями современной зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит. Раскрывая новые фундаментальные аспекты понимания термомеханической эволюции литосферы, тектонической активности и реологической стратификации Кавказско-Армянского региона, выполненный комплекс из трёх последовательных исследований формирует научно-методологическую основу для решения задач сейсмического районирования, оценки сейсмической опасности и количественной характеристики геодинамических рисков Кавказско-Армянского региона как ключевого сегмента Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. Принципиальные методологические преимущества работы заключаются в применении томографической инверсии на представительном массиве экспериментальных данных, охватывающем почти двадцатилетний инструментальный период (1999–2018 г.), и в обеспечении устойчивой пространственной разрешённости полученных результатов.

Полученные результаты раскрывают новые аспекты понимания термомеханической эволюции литосферы и тектонического развития региона и формируют научно-методологическую основу для решения задач сейсмического районирования, оценки сейсмической опасности и количественной характеристики геодинамических рисков Кавказско-Армянского региона как ключевого сегмента Альпийско-Гималайского коллизионного пояса.

3.2. Влияние землетрясений Кахраманмараш (2023 г.) на современную геодинамику Кавказа по данным GNSS-наблюдений

Катастрофические сейсмические события, генерируемые в зонах активной тектонической коллизии литосферных плит, индуцируют косейсмические и постсейсмические смещения и деформационные эффекты земной коры, распространяющиеся на значительные расстояния от эпицентральных областей и формирующие региональный отклик геодинамической системы. Количественная оценка степени влияния удалённых сильных сейсмических событий на кинематический и деформационный режим территорий, расположенных за пределами ближней зоны разрушения, представляет собой актуальную научную задачу современной геодинамики и сейсмотектоники, имеющую принципиальное значение для понимания дальнедействующих эффектов крупномасштабных

разрывных процессов в зонах континентальной коллизии Альпийско-Гималайского пояса.

В настоящем исследовании выполнен количественный анализ воздействия серии катастрофических землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. (дублет: $M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$ с временным интервалом ~ 9 часов), произошедших в системе Восточно-Анатолийской разломной зоны на расстоянии $\sim 1\ 000$ км от территории Кавказского региона, на характер современных движений и деформационный режим земной коры Кавказа. Методологической основой исследования послужил статистический анализ временных рядов непрерывных GNSS-наблюдений на региональной сети из 16 станций геодинимического класса, включающей станции национальных и международных сетей наблюдений Республики Армения, Российской Федерации, Азербайджана и Турции. Для каждой GNSS-станции выполнена линейная аппроксимация временных рядов по методу наименьших квадратов с расчётом скоростей изменения координат до и после сейсмических событий и количественной оценкой статистической значимости разностей по критерию Стьюдента.

Впервые установлено статистически значимое влияние удалённого катастрофического сейсмического события на режим современных движений земной коры Кавказского региона, проявляющееся в развороте векторов скоростей горизонтальных движений по часовой стрелке в среднем на 6° (зарегистрировано на 12 из 16 станций), уменьшении модулей скоростей горизонтальных движений и преимущественном увеличении скоростей вертикальных движений (подъёма).

Полученные результаты не противоречат установленным вековым закономерностям вертикальных движений Кавказа, изученным по данным точного нивелирования за последнее столетие, согласно которым подъёмы Большого и Малого Кавказа чередуются, причём в периоды быстрых поднятий Большого Кавказа Малый Кавказ испытывает относительно медленные движения. После Кахраманмарашских землетрясений зарегистрировано усиление подъёма Большого Кавказа при относительной стабильности Малого Кавказа, что соответствует фазе активного воздымания Центрального Кавказа.

Установлено, что общее направление горизонтальных движений GNSS-станций Кавказа согласуется с вектором постсейсмической скорости станции, ближайшей к эпицентральной зоне Кахраманмараш, что

свидетельствует о геодинамической связи далекодействующего отклика Кавказа с тенденцией перемещения Аравийской тектонической плиты. Общие тенденции сочетания до и постсейсмических движений демонстрируют эффект противодействия горных сооружений Малого Кавказа северо-восточному давлению клина Аравийской тектонической плиты.

Полученные результаты имеют принципиальное значение для физико-геодинамической интерпретации механизмов региональной актуотектоники и количественной характеристики роли катастрофических сейсмических событий в формировании режима современных движений земной коры Кавказа. С прикладной точки зрения, выявленные далекодействующие эффекты составляют необходимое физико-геологическое основание для уточнения вероятностных оценок сейсмической опасности (PSHA) и развития методологии непрерывного геодинамического мониторинга территории Республики Армения и сопредельных регионов зоны коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит.

По мере накопления длительных рядов наблюдений на созданной сейсмогеодинамической наблюдательной сети на территории Республики Армения формируется фундаментальная эмпирическая база, обеспечивающая независимую верификацию выявленных эффектов, системное исследование региональной разломной структуры территории Республики Армения и интеграцию полученных результатов в глобальный геодинамический контекст исследований процессов в зонах континентальной коллизии.

3.3. Сравнительный анализ сейсмичности и тектоники территории Республики Армения на основе расчёта фокальных механизмов землетрясений

В настоящем подразделе представлены результаты сравнительного анализа сейсмичности и тектоники территории Республики Армения, направленного на установление связи пространственно-временного распределения сейсмических событий с системой активных разломов и геодинамической блоковой структурой коллизийной зоны Аравийской и Евразийской плит на основе систематического расчёта фокальных

механизмов землетрясений. С позиций фундаментальной сейсмологии расчёт фокальных механизмов представляет собой классическую обратную задачу восстановления параметров очагового излучения по полярностям Р-волн, зарегистрированных сетью сейсмических станций, и обеспечивает количественную реконструкцию кинематики очагового разрыва и ориентации осей главных тектонических напряжений. За инструментальный период 2002 - июнь 2022 гг. на территории Республики Армения и сопредельных районах рассчитаны фокальные механизмы 371 землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ методом первого вступления Р-волны по данным Международного сейсмологического центра (ISC), Евро-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) и Региональной службы сейсмической защиты Республики Армения (NSSP).

Методика расчёта основана на азимутальной зависимости поляризации первого вступления Р-волны: знак вступления (компрессия или растяжение среды) определяется относительно угла падения и азимута на каждую сейсмическую станцию, что позволяет восстановить две взаимно ортогональные нодальные плоскости разрыва. Корректность решения обратной задачи обеспечивается азимутальной полнотой регистрации и метрологической достоверностью данных, формируемых на базе созданной сейсмогеодинамической наблюдательной сети; для каждой пары нодальных плоскостей рассчитаны параметры разломной кинематики (Strike, Dip, Slip/Rake) и углы погружения и азимута осей главных тектонических напряжений (Plunge, Azimuth).

Установлено кинематическое многообразие разломных подвижек на территории Республики Армения (рис. 13): на исследуемой территории выявлены сдвиги (strike-slip), взбросы (reverse), надвиги (thrust), сбросы (normal) и их комбинации с различными компонентами, причём доминирующим режимом является сдвиговая кинематика с компонентами взбросово-сдвиговых и сбросово-сдвиговых подвижек.

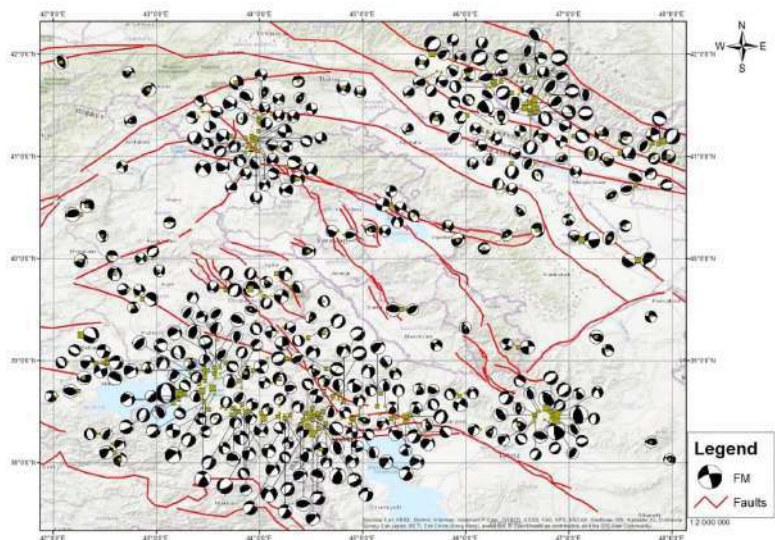


Рисунок 13. Схематическая карта эпицентров и фокальных механизмов землетрясений $M \geq 3,5$ территории Республики Армения и сопредельных районов (2002 - июнь 2022 гг.).

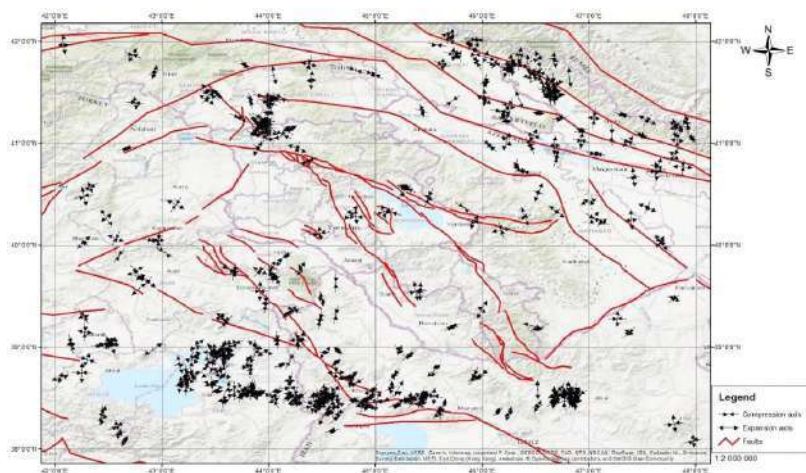


Рисунок 14. Схематическая карта осей сжатия (P) и растяжения (T) главных тектонических напряжений в очагах землетрясений $M \geq 3,5$ территории Республики Армения и сопредельных районах (2002 - июнь 2022 гг.).

Кинематика разломных подвижек, выявленная по фокальным механизмам, пространственно согласована с системой основных активных разломов территории Республики Армения: Памбак-Севан-Сюникский (PSSF), Гарнийский (GF), Джавахетский (JaF), Гаварагетский (GaF), Ереванский (YeF), Гиратахский (GirF) и Дебаклинский (DebF), что обеспечивает количественную верификацию тектонической модели региона, подтверждает связь сильных исторических и инструментальных землетрясений с активными блоками и их структурными сочленениями и методологически согласовано с другими обратными задачами Главы 3 - двумерной поверхностно-волновой томографией литосферы и анализом современной геодинамики по данным GNSS-наблюдений.

Полученные результаты количественно подтверждают принадлежность территории Республики Армения к центральной части коллизионной зоны Аравийской и Евразийской плит, где региональное поле тектонических напряжений характеризуется субгоризонтальным сжатием в направлении северо-восток - юго-запад и субгоризонтальным растяжением в направлении северо-запад - юго-восток (рис. 14), физически согласованным с северо-направленной конвергенцией Аравийской плиты со скоростью около 30 мм/год и формирующим режим север-южного сокращения и восток-западного расширения земной коры. Системное решение обратной задачи восстановления параметров очаговых процессов на представительной выборке 371 события формирует фундаментальную эмпирическую основу для физико-геодинамической интерпретации режима современной сеймотектонической активности территории, уточнения национальной карты сейсмической опасности и сейсмостойкого проектирования, а также обеспечивает сравнительную базу для дальнейшего совместного анализа сейсмологических, GNSS-геодинамических и томографических данных в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит.

ГЛАВА 4.

ЛОКАЛЬНЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ: КАРТА V_s30 , КОТЛОВИННЫЕ ЭФФЕКТЫ И НОРМАТИВНЫЕ СПЕКТРЫ РЕАКЦИИ

4.1. Корреляционная связь топографического градиента с параметром V_s30 для вулканических областей и построение карты V_s30 для территории Республики Армения

В современных уравнениях прогноза параметров грунтовых колебаний (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) и других задачах инженерной сейсмологии параметр V_s30 – средняя скорость распространения поперечных волн в верхней 30-метровой толще грунтов – выступает в качестве основной количественной характеристики локальных грунтовых условий, контролирующей амплитудные искажения сейсмического сигнала на дневной поверхности. Для регионального картирования параметра V_s30 широкое распространение получило применение топографического градиента в качестве косвенной (прокси) переменной, методологическим преимуществом которой служит глобальная доступность цифровых моделей рельефа (DEM) и алгоритмическая простота реализации. В частности, система ShakeMap Геологической службы США (USGS) опирается на карту V_s30 , построенную методом топографического градиента (Wald & Allen, 2007); аналогичные подходы приняты в большинстве национальных систем оценки сейсмической опасности при разработке региональных продуктов V_s30 . Однако корреляционные зависимости «топографический градиент – V_s30 », разработанные преимущественно для осадочных провинций, могут оказаться методологически непригодными для условий вулканических областей, специфические закономерности которых до настоящего времени остаются недостаточно изученными в международной литературе.

В настоящем исследовании на основе репрезентативной выборки из 250 натуральных инструментальных измерений V_s30 , выполненных на территории Республики Армения, проведён систематический анализ характера корреляционной связи между топографическим градиентом и скоростными характеристиками приповерхностной 30-метровой толщи

грунтов в пределах вулканических ландшафтов. Впервые установлено, что в вулканических областях параметр $Vs30$ демонстрирует обратную корреляционную связь с топографическим градиентом, что находится в принципиальном противоречии с классической закономерностью, установленной для невулканических областей (Wald & Allen, 2007), согласно которой увеличение крутизны склона ассоциируется с более жёсткими высокоскоростными грунтами.

Для независимой верификации обнаруженного феномена привлечены инструментальные данные из вулканических провинций острова Хайнань (Китай), где зарегистрирована аналогичная тенденция, что позволяет интерпретировать обратную корреляционную связь между топографическим градиентом и параметром $Vs30$ как фундаментальную физико-геологическую характеристику вулканогенных провинций, не являющуюся уникальной чертой территории Республики Армения, а отражающую общую закономерность, обусловленную спецификой гипергенного выветривания и литологического строения вулканогенно-осадочных толщ. На основе эмпирически оценённых пространственно-статистических характеристик связи «топографический градиент - $Vs30$ » разработаны геостатистические модели кокригинга на основе топографического градиента (Slope-based CoKriging, SCK), методологически адаптированные к региональным условиям территории Республики Армения. Построение итоговой карты $Vs30$ выполнено путём отдельного статистического моделирования вулканогенных и невулканических доменов с применением соответствующих региональных корреляционных зависимостей (рис. 15).

Полученная общенациональная карта $Vs30$ демонстрирует доминирование высокоскоростных грунтов с диапазоном значений приблизительно 450-900 м/с, что согласуется с широким распространением на большей части территории Республики Армения вулканогенных пород плиоцен-четвертичного возраста (лавы, туфы, игнимбриты). В противоположность этому, глобальный мозаичный продукт $Vs30$, применяемый в системе ShakeMap USGS и не учитывающий вулканогенную специфику, даёт существенно заниженные оценки параметра $Vs30$ для территории Республики Армения, наиболее заметные в пределах столичной агломерации (г. Ереван).

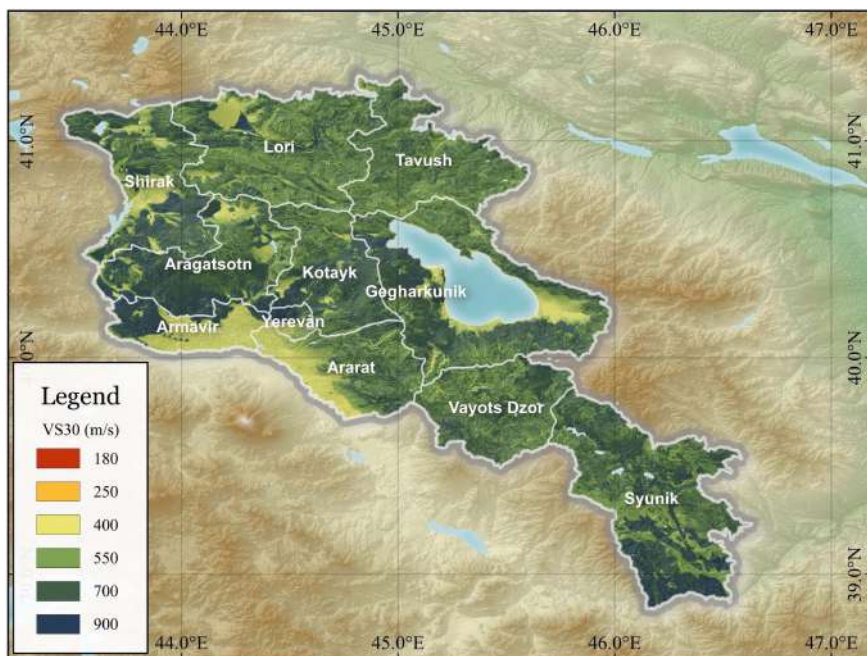


Рисунок 15. Региональная карта пространственного распределения параметра Vs30 территории Республики Армения.

Полученные результаты представляют собой первое систематическое количественное описание функциональной зависимости «топографический градиент - Vs30» для условий вулканических областей и первую построенную на локальных инструментальных измерениях общенациональную карту Vs30 территории Республики Армения. Построенная карта обладает критическим методологическим значением для калибровки региональных уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (GMPE), уточнения вероятностных оценок сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) и решения задач инженерно-сейсмологического риск-менеджмента на территории Республики Армения. Установленное доминирование высоких значений параметра Vs30 свидетельствует о том, что действующие схемы инженерно-геологической классификации грунтовых условий - стандарты NEHRP (США) и Eurocode 8 (Европейский Союз), ориентированные на низкие пороговые

скорости в диапазоне менее 360–760 м/с, - методологически непригодны для адекватного разделения изменчивости локальных грунтовых условий на территории Республики Армения, где региональные вариации параметра V_s30 локализуются в существенно более высоком скоростном диапазоне. В более широком фундаментальном контексте принципиальный физико-геологический контраст между корреляционными зависимостями «топографический градиент - V_s30 » для вулканогенных и невулканических областей подчёркивает необходимость пересмотра и региональной адаптации глобальных моделей V_s30 , основанных на топографическом градиенте, применительно к регионам с обширным развитием вулканогенных толщ. Полученные результаты формируют научно-методологическую основу для развития более совершенных методов численного моделирования V_s30 в условиях вулканических областей и могут быть распространены на другие вулканогенные провинции в пределах Альпийско-Гималайского пояса и сопоставимых тектонических обстановок мира.

4.2. Влияние локальных инженерно-геологических условий на параметры сейсмических волновых полей (на примере Ширакской котловины)

Целью настоящего исследования является количественная характеристика влияния седиментационной котловины на параметры сейсмических колебаний на основе инструментальных записей, полученных созданной сейсмогеодинамической наблюдательной сетью. Методологическая программа исследования включает спектрально-временной анализ волновых форм и волновой коды, а также расчёт физических параметров колебательного процесса, что обеспечивает комплексную количественную оценку не только амплитудно-частотных характеристик, но и длительности колебательного процесса и интегральной интенсивности регистрируемых сейсмограмм. Реализованный методологический подход обеспечивает количественную идентификацию физических механизмов влияния седиментационных котловин на параметры сейсмических записей и их сравнительный анализ с эталонными волновыми формами, регистрируемыми на скальных грунтах вне зон котловинных эффектов.

Ширакская седиментационная котловина расположена в северо-западной части территории Республики Армения, в нагорьях Малого Кавказа (~80 км южнее Главного Кавказского хребта), и ограничена с севера Ширакским хребтом, с востока и запада - терминальными сегментами Памбакского хребта, с юго-востока и юга - массивом четвертичного вулкана Арагац; протяжённость 25–30 км, ширина 18–20 км, абсолютные отметки днища 1350–1600 м. В отличие от городов Спитак и Ванадзор, расположенных на скальных и маломощных аллювиальных основаниях, город Гюмри застроен на широкой аллювиальной равнине над седиментационным бассейном глубиной 3 - 4 км, что и обусловило его принципиальную сейсмическую уязвимость при Спитакском землетрясении 1988 г., непосредственно подтверждённую нехарактерным для удалённого от эпицентра города (около 35 км от очаговой зоны Спитакского землетрясения) масштабом и характером разрушений жилой и инженерной застройки, фотодокументальные материалы которых приведены ниже (рис.16).



Рисунок 16. Фотодокументальные материалы катастрофических разрушений жилой и инженерной застройки города Гюмри при Спитакском землетрясении 7 декабря 1988 г. ($M_w = 6,8$).

Уточнённый геологический разрез по профилю Мармашен - Гюмри - Айгабац мощностью около 450 м (рис. 17) фиксирует сверху вниз четырёхуровневую стратиграфию: верхняя озёрно-аллювиальная толща (суглинки, супеси, галечниково - гравийные отложения, пески, бурые глины) мощностью до 40 м у Мармашена; нижнечетвертичная лимнетическая толща зеленовато-серых высокопластичных глин до 240 м с прослоями базальтовых лав (Айгабац) и галечниково - гравийных пачек (Мармашен); плио-плейстоценовые базальтовые лавы 60–64 м (до 220 м у Айгабаца); подстилающие сармат - мэотис - понтические андезитовые туфовые брекчии мощностью 1000–1200 м, образующие скальный фундамент.

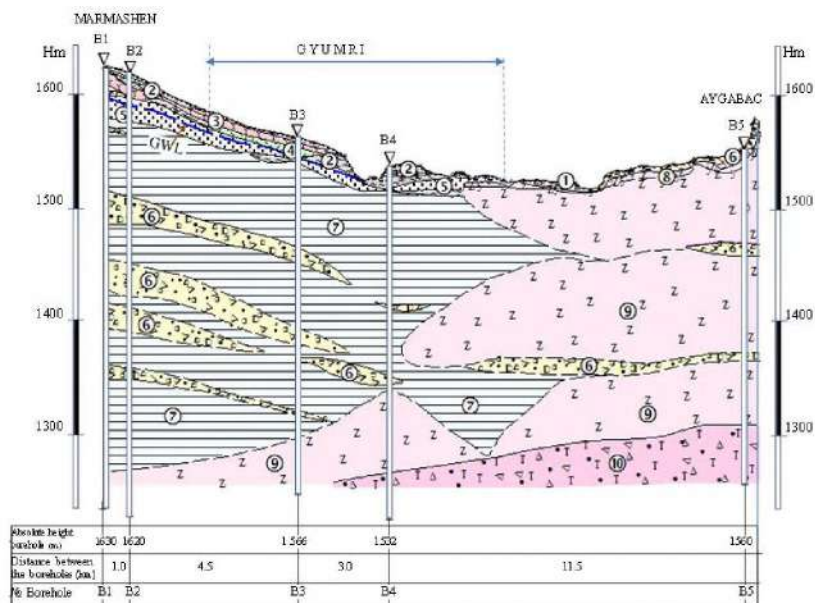


Рисунок 17. Уточнённый геологический разрез Ширакской седиментационной котловины по профилю Мармашен - Гюмри - Айгабац мощностью около 450 м.

В пределах г. Гюмри суммарная мощность лимнетической толщи варьирует в диапазоне 250-350 м, туфовый горизонт на площадках BSR (Бульварный) и KR (Крепость) достигает 5-10 м с выклиниванием в центральной части города (площадка POB, Победа), а сочленение глин со скальным фундаментом по бортам котловины характеризуется резкой латеральной неоднородностью: с востока в озёрные глины вклиниваются

языки базальтовых лав, с запада - линзы галечниково-гравийных и аллювиальных отложений. Скоростные характеристики приповерхностной осадочной толщи существенно понижены - $V_{s30} = 180-400$ м/с против 700–900 м/с на скальных грунтах окружающих хребтов; полученные в подразделе 4.1 расчётным методом геостатистического кокригинга (Slope-based CoKriging, SCK) низкие значения V_{s30} для области Ширакской котловины представляют собой физически реалистичные данные, поскольку они непосредственно отражают реальное существование описанной в настоящем подразделе глубокой седиментационной котловины с бассейном до 3–4 км и низкоскоростной осадочной толщей мощностью до сотен метров, что фиксирует резкий импедансный контраст, физически предопределяющий резонансное усиление сейсмических колебаний.

Описанная инженерно-геологическая структура котловины и подтверждаемые ею низкие значения V_{s30} , полученные в подразделе 4.1 методом SCK, предопределяют физический механизм формирования аномалий сейсмических волновых полей: высокий импедансный контраст на границе рыхлых отложений и скального фундамента обеспечивает резонансное усиление колебаний на собственных частотах осадочной толщи и преимущественное усиление длиннопериодных составляющих спектра, геометрия котловины способствует фокусировке сейсмической энергии в её центральной части, а латеральные границы формируют поверхностные волны седиментационного бассейна с существенно повышенной длительностью колебательного процесса, что и определяет наблюдаемые далее количественные различия амплитудно-частотных характеристик, длительности коды и интегральной интенсивности сейсмических записей в Ширакской котловине по сравнению с эталонными скальными площадками.

Сравнительный анализ записей (рис. 18) наглядно демонстрирует характерные физические особенности, обусловленные влиянием седиментационного чехла. На записи, зарегистрированной в пределах котловинных условий, отчётливо идентифицируются обособленные цуги волн - последовательно сменяющиеся группы колебаний, физически обусловленные многократными отражениями, интерференционными эффектами и резонансным усилением сейсмических волн в рыхлых неконсолидированных отложениях котловины. В отличие от короткой и высокочастотной волновой формы, регистрируемой на скальном основании, волновая форма в котловинных условиях характеризуется существенно

большей длительностью колебательного процесса, доминированием низкочастотных составляющих спектра и характерным ступенчатым затуханием последовательных цугов колебаний, что свидетельствует о принципиальной физико-механической трансформации исходного сейсмического сигнала под воздействием локальных инженерно-геологических условий.

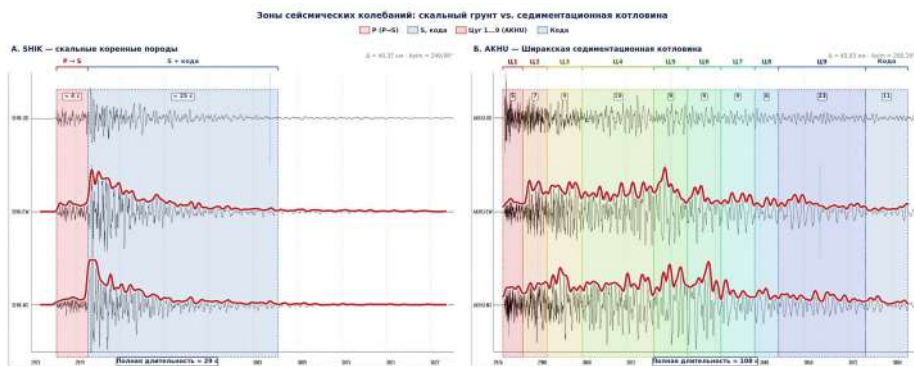


Рисунок 18. Сравнительные волновые формы сейсмических колебаний локального землетрясения 02.11.2025, 15:49:31 UTC ($41,123^\circ$ с.ш., $43,961^\circ$ в.д., $M = 4,3$), зарегистрированного на скальном грунте (А, станция SHIK) и в пределах Широкой седиментационной котловины (Б, станция АКНУ).

Критически важным научно-практическим аспектом полученных результатов является методологическая необходимость их интеграции в действующую нормативную базу сейсмостойкого проектирования, практику инженерно-сейсмологического микрорайонирования урбанизированных территорий и систему долгосрочного градостроительного планирования населённых пунктов, расположенных в седиментационных котловинах сопоставимого тектонического строения. Учёт количественно охарактеризованных котловинных эффектов - резонансного усиления, фокусировки сейсмической энергии и увеличения длительности колебательного процесса - формирует физико-геологическую основу для разработки методов инженерного снижения резонансных явлений, индуцированных сильными сейсмическими воздействиями расчётных землетрясений.

4.3. Моделирование расчётных сейсмических воздействий и их сопоставление с нормативными спектрами реакции

Синтетические акселерограммы представляют собой фундаментальный методологический инструмент инженерно-сейсмологического анализа и сейсмостойкого проектирования, особенно в регионах с ограниченной выборкой инструментальных записей сильных движений. На территории Республики Армения дефицит репрезентативных записей сильных сейсмических воздействий существенно затрудняет адекватную количественную оценку сейсмической опасности и нормативный конструктивный расчёт сооружений, что определяет принципиальную методологическую необходимость разработки региональных алгоритмов численного моделирования расчётных сейсмических воздействий.

Целью настоящего исследования является разработка региональной методологии генерации синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектральными кривыми, обеспечивающей преодоление дефицита инструментальных записей сильных сейсмических событий на территории Республики Армения. В основу разработанной методологии положена единственная репрезентативная инструментальная запись сильных движений Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г., методологически дополненная региональным каталогом слабых сейсмических событий ($M_w \geq 3,5$). Путём систематического накопления и статистической обработки указанных записей формируется синтезированная выборка акселерограмм, достоверно отражающих амплитудно-частотные характеристики сейсмических воздействий для различных категорий грунтовых условий территории Республики Армения.

Предложенный методологический подход базируется на решении обратной задачи спектрального согласования, в рамках которой целевой функцией выступает нормативная спектральная кривая отклика $S_a(T)$ для различных категорий грунтовых условий, регламентированных действующими сейсмическими нормами. Алгоритмическую основу методологии составляет итеративная модификация амплитудного спектра Фурье $|A(\omega)|$ до достижения сходимости расчётного спектра реакции с заданной нормативной кривой при сохранении физически реалистичного фазового спектра, что обеспечивает корректное воспроизведение

временной структуры сейсмических воздействий и их физико-геомеханическую интерпретируемость. Опорной экспериментальной основой расчётных процедур служит единственная инструментальная запись сильных движений Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. на территории Республики Армения (рис. 19).

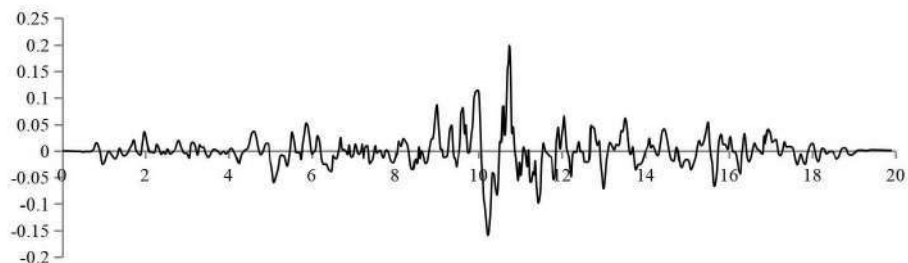


Рисунок 19. Инструментальная акселерограмма Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. (Республика Армения).

На основе предложенной методики рассчитан модифицированный спектр сейсмической реакции для грунтовых условий I категории, построенный по инструментальной акселерограмме Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. (рис. 20).

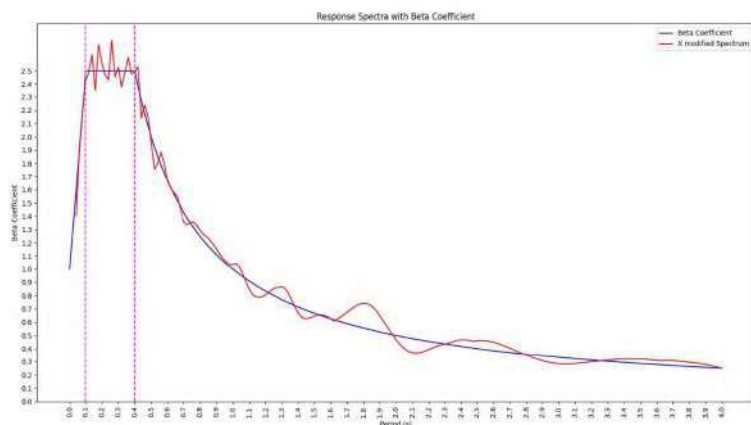


Рисунок 20. Модифицированный спектр сейсмической реакции, построенный по инструментальной акселерограмме Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г., для грунтовых условий I категории.

Для практической реализации разработанной методологии создано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее автоматизированную генерацию акселерограмм, согласованных с заданными нормативными спектральными кривыми. Предложенный методологический подход обеспечивает возможность пространственной экстраполяции расчётных акселерограмм сильных движений на различные сейсмоактивные зоны территории Республики Армения и их применение при построении региональных карт сейсмической опасности - карт пространственного распределения ускорений и спектров реакции для нормативного сейсмостойкого проектирования. Разработанный подход обеспечивает существенно более высокую достоверность прогноза параметров грунтовых колебаний по сравнению с традиционными динамическими кривыми, не имеющими прямой инструментально-эмпирической основы. Генерируемые синтетические акселерограммы могут быть непосредственно применены при инженерно-сейсмологическом анализе сооружений, адекватной количественной оценке сейсмической опасности и уточнении нормативной базы сейсмостойкого проектирования. Несмотря на то, что разработанная методология адаптирована к действующим армянским сейсмическим нормам (BSRA-20.04-2020), её структурная универсальность обеспечивает методологическую адаптируемость к другим международным нормативным системам (Eurocode 8, ASCE 7, ГОСТ 14.13330 и др.), что существенно расширяет её научно-практическую значимость для глобальной инженерной сейсмологии. В рамках настоящего подраздела дополнительно поставлена и решена задача построения кривой коэффициента динамичности $\beta(T, n)$ на основе интегрального параметра колебаний грунтов - параметра кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV). Выполнен сравнительный анализ кривых динамичности $\beta(T, n)$, построенных по двум методологически различным подходам: 1 по максимальным значениям ускорений грунтовых колебаний и 2 по параметру кумулятивной абсолютной скорости. Идентифицированы и количественно охарактеризованы принципиальные физико-методологические различия между указанными представлениями кривых динамичности, что обосновывает необходимость пересмотра традиционных подходов к нормированию сейсмических воздействий и развития методологии инженерной интерпретации спектров реакции с учётом интегральных параметров колебательного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория Республики Армения, занимающая ключевую геодинамическую позицию в зоне активной континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит в пределах Альпийско-Гималайского пояса - крупнейшего тектонически активного суперэлемента планеты, - представляет собой природный полигон фундаментального значения для исследования физико-геодинамических процессов континентальной коллизии. Близмеридиональная конвергенция Аравийской плиты со скоростью около 30 мм/год обуславливает уникальную совокупность фундаментальных геофизических явлений - высокую сейсмическую активность, интенсивный плиоцен-четвертичный вулканизм и сложноструктурированную блоковую тектонику с многоуровневой иерархией активных разломных систем, - что определяет принадлежность территории Республики Армения к областям максимального сейсмического риска планеты. Исторический опыт региона включает катастрофические сейсмические события: Гарнийское 1679 г. ($M \approx 7,0$), Зангезурское 1931 г. ($M = 6,5$), Чалдыранское 1976 г. ($M = 7,3$), трагическое Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. ($M_w = 6,8$, $M_s = 7,0$), унёсшее жизни более 25 000 человек, и катастрофические Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$). Спитакская катастрофа обнажила принципиальные методологические недостатки региональной наблюдательной сейсмологии, существенно ограничивавшие разработку достоверных карт сейсмической опасности и государственных строительных норм, и определила фундаментальную необходимость развёртывания современной комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети нового поколения.

В настоящем научном докладе, посвящённом комплексному решению совокупности актуальных прямых и обратных задач сейсмологии для территории Республики Армения, сформулированы и обоснованы новые научные положения, совокупность которых квалифицируется как решение крупной научной проблемы в области физики Земли, наблюдательной сейсмологии и геодинамики зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, имеющее существенное значение для развития соответствующих отраслей геофизического знания. Полученные результаты создают единую научно-методологическую основу для перехода от фрагментарных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу

территории Республики Армения, отвечающему современному мировому уровню исследований в области физики Земли.

1. Результаты по инструментально-методологическому обеспечению (Глава 1).

В рамках решения базовой методологической задачи, формирующей инструментальную и эмпирическую основу для всех последующих исследований, обоснована, развёрнута и введена в эксплуатацию комплексная сейсмогеодинамическая наблюдательная сеть нового поколения, объединяющая в единой инструментальной конфигурации десять станций международного метрологического стандарта: широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период 120 с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса. На основе количественного спектрально-временного анализа фоновых сейсмических полей в 20 пунктах в соответствии с международными метрологическими стандартами (PQLX; McNamara & Buland, 2004) научно обоснован выбор оптимальных мест развёртывания станций, что обеспечило количественную характеристику фонового сейсмического шума и пространственную локализацию зон минимальных антропогенных и природных воздействий (подраздел 1.1).

Выполнены расчёт и пространственное картирование магнитуды представительности (M_c) каталога сейсмических событий для различных геодинамических зон территории Республики Армения и сопредельных районов; установленное значение $M_c \approx 1,5$ определяет нижний порог чувствительности сети и свидетельствует о том, что созданная сеть обеспечивает систематическую регистрацию сейсмических событий полного магнитудного диапазона - от слабых до сильных, непрерывно пополняющих региональный сейсмологический каталог, и удовлетворяет требованиям современных международных стандартов наблюдательной сейсмологии. Полученные результаты обеспечивают методологическую корректность последующего применения статистических законов сейсмичности (Гутенберга-Рихтера, Омори), оценок параметра b -value и алгоритмов декластеризации.

В результате сравнительного анализа алгоритмов декластеризации сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона (Gardner & Knopoff,

1974; Uhrhammer, 1986; Grünthal, 1985; Reasenberг, 1985; Zaliapin & Ben-Zion, 2013) установлена статистическая сходимость результатов алгоритмов Gardner & Knopoff, Grünthal и Zaliapin & Ben-Zion при существенно различающихся теоретических основах, что обеспечивает достоверное разделение зависимых и независимых сейсмических событий. Усовершенствованная методология декластеризации представляет собой эффективный инструмент идентификации активных разломных структур и обеспечила выявление феномена пространственно-временной миграции сейсмичности как индикатора динамического перераспределения тектонических напряжений в коллизионных областях (подраздел 1.2).

Впервые для Тавро-Кавказского региона построен унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог на основе системной интеграции национальных и международных сейсмологических каталогов; впервые применены диаграммы Вороного для оценки качества декластеризации, что сформировало самостоятельный эмпирический продукт фундаментального и прикладного значения, размещённый в открытом доступе для международного научного сообщества [1].

На примере сейсмической активизации центрального сегмента Эгейской вулканической дуги показано, что широкополосные длиннопериодные станции обеспечивают надёжную дифференциацию тектонических и вулкано-тектонических землетрясений по совокупности спектрально-временных характеристик волновых форм, длительности колебательного процесса и параметров тензора сейсмического момента. Установлена вулкано-тектоническая природа аномального процесса, физически интерпретируемая как результат инъекции магматического вещества и флюидов из верхней мантии в магматический резервуар вулкана Колумбо с последующей диффузионной миграцией по системе линеамента Санторин–Аморгос; выдвинута физико-геодинамическая гипотеза о связи инъекции с предельными упругими напряжениями в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения. Разработанный методологический подход обладает структурной адаптируемостью и может быть распространён на регионы Республики Армения с проявлениями активного вулканизма (вулкан Арагац, Гегамский вулканический массив), что особенно актуально для северной части территории Республики Армения и Джавахетского нагорья, где

сосредоточено более 30 % сейсмичности Кавказского региона и где тектонические и вулкано-тектонические сейсмогенные процессы проявляются в непосредственном пространственном сопряжении (подраздел 1.3).

2. Результаты по обратным задачам сейсмологии (Главы 2 и 3).

В рамках решения обратных задач восстановления параметров очаговых процессов, идентификации сейсмических группировок методами машинного обучения, восстановления глубинной скоростной структуры литосферы, исследования современной геодинамики и расчёта фокальных механизмов землетрясений получена принципиально новая совокупность научных результатов.

2.1. Кластеризация сейсмических событий и распознавание потенциально сейсмоопасных зон (подраздел 2.1).

Применением фундаментальных алгоритмов кластеризации K-means и DBSCAN выполнен системный статистический анализ сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона. Установлено, что комплементарное применение указанных алгоритмов - где K-means обеспечивает корректную классификацию сферических кластеров фиксированного числа, а DBSCAN эффективен для группировок произвольной геометрической формы и переменной плотности, - позволяет устанавливать научно обоснованные корреляционные связи между статистическими характеристиками сейсмичности и геолого-тектоническими структурами региона.

На основе развития классического подхода EPA (Earthquake-Prone Areas; Гельфанд, Кейлис-Борок и др.) разработаны новые методологии формализованного распознавания сейсмоопасных зон - схема обучения с использованием одного класса (one-class classification) и формализованный метод FCAZ (Formalized Clustering and Zoning), обеспечивающий динамическую корректировку результатов в реальном временном масштабе. Разработанные методологии успешно апробированы на материале сейсмологических каталогов Кавказского региона, континентов Северной и Южной Америки, Евразии и субдукционных зон Тихоокеанского сейсмического пояса.

2.2. Дублетная природа катастрофических землетрясений Кахраманмараш 2023 г. (подраздел 2.2).

В рамках комплексного анализа катастрофических восточно-турецких землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) на основе анализа параметров фокальных механизмов, пространственно-временного распределения очагов и афтершоковых процессов установлена дублетная природа указанных событий, характеризующаяся сложной нелинейной структурой магистрального разрыва с четырьмя субочагами. Доказано, что рассматриваемые события связаны не только пространственно-временной и энергетической корреляцией, но и общностью геолого-тектонической природы, причём первое событие выступает триггерным механизмом для последующего землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$). Построенная физико-геодинамическая модель очаговой зоны раскрывает фундаментальные закономерности разрывообразования в условиях близмеридионального вклинивания Аравийской плиты в орогенные структуры Кавказа со скоростью конвергенции около 30 мм/год.

2.3. Дублетный режим сейсмичности и механизм релаксации тектонических напряжений (подраздел 2.3).

На основе усовершенствованной методологии декластеризации с применением ансамблевого алгоритма случайного леса (Random Forest), демонстрирующего статистически значимое превосходство как над традиционными детерминистическими подходами, так и над альтернативными моделями машинного обучения, впервые установлено, что дублетный режим сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе реализуется на всех энергетических уровнях - не только при сильных, но и при относительно слабых сейсмических событиях, проявляющихся во временном интервале от 15 минут до одного часа и характеризующихся миграционным процессом в интервале глубин до 20 км. Этот результат расширяет классические представления о дублетных землетрясениях как редком явлении, характерном исключительно для сильных событий, и переводит их в категорию универсального режима сейсмического процесса в коллизионных тектонических обстановках.

Впервые выявлен принципиально новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах: установлено, что

после второго события дублета количество афтершоков в области первого события сокращается в шесть раз, что свидетельствует о кардинальной трансформации пространственно-временной эволюции афтершокового процесса при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы.

Впервые установлено принципиальное физико-геодинамическое различие в пространственно-временной эволюции афтершоковых процессов для дублетных и одиночных сейсмических событий: афтершоки одиночного землетрясения 20 февраля 2023 г. ($M_w = 6,3$) формируют круговую (кольцевую) пространственную структуру, принципиально отличную от линейного магистрального образа афтершоков дублетных землетрясений 6 февраля 2023 г., что свидетельствует о дифференциации физических механизмов разрывообразования для дублетных и одиночных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках. Установлена принципиальная пространственная закономерность сейсмичности Тавро-Кавказского региона.

2.4. Глубинная скоростная структура литосферы (подраздел 3.1).

Методом 2D-поверхностно-волновой томографии (инверсия дисперсионных кривых волн Рэлея и Лява в диапазоне периодов 5–80 с, глубинный охват до ≈ 200 км) по данным около 1500 сейсмических событий магнитудного диапазона $M \geq 3,5$, зарегистрированных 20–49 широкополосными и короткопериодными станциями за инструментальный период 1999–2018 гг., в рамках комплекса трёх последовательных исследований (2022–2025 гг.) построены детальные скоростные модели земной коры и верхней мантии зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит. Выявлена устойчивая трёхуровневая структура скоростных аномалий: в верхней коре (6–30 км) идентифицированы 15 верхнекоровых горячих зон, ассоциированных с верхнекоровыми процессами активного деформирования вулканогенных и осадочных комплексов, осадочных бассейнов, вулканических массивов и зон неотектонических поднятий; на глубинах 100–110 км выявлены низкоскоростные области, интерпретируемые как зоны подкорового внедрения (underplating) мантийного материала с неглубоким залеганием границы литосферы–астеносферы (LAB); на глубинах 180–200 км доминируют экстремально низкоскоростные аномалии, свидетельствующие об аномально малой

мощности литосферы или о её локальном отсутствии, предположительно в результате процессов литосферной деляминации.

Подтверждено существование вертикально протяжённой низкоскоростной аномалии под северо-западным склоном вулкана Арагац, прослеживаемой в интервале глубин 7-27 км и интерпретируемой как магматический канал коро-мантийного происхождения. Установлено, что Северо-Армянский блок перекрыт высокоскоростной аномалией для волн Рэля и Лява, что свидетельствует о наличии под блоком жёсткой литосферной структуры.

2.5. Современная геодинамика по данным GNSS-наблюдений (подраздел 3.2).

На основе непрерывных GNSS-наблюдений установлено, что удалённые катастрофические землетрясения Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. индуцируют статистически значимые косейсмические изменения кинематического режима земной коры Кавказского региона, что доказывает интегральный характер геодинамического отклика на крупномасштабные разрывные процессы в сопряжённых тектонических провинциях и расширяет представления о дальнедействующих эффектах сильных землетрясений в коллизионных обстановках. По мере накопления длительных рядов наблюдений на созданной сейсмогеодинамической сети формируется фундаментальная эмпирическая база, обеспечивающая независимую верификацию выявленных эффектов и интеграцию полученных результатов в глобальный геодинамический контекст исследований процессов в зонах континентальной коллизии.

2.6. Фокальные механизмы землетрясений и сравнительный анализ сейсмичности и тектоники (подраздел 3.3).

На основе расчёта фокальных механизмов 371 землетрясения магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за инструментальный период 2002–2022 гг. методом первого вступления Р-волны выполнен систематический сравнительный анализ сейсмичности и тектоники территории Республики Армения. Установлено кинематическое многообразие разломных подвижек (сдвиги, взбросы, надвиги, сбросы и их комбинации с доминированием сдвигового режима), пространственно согласованное с системой активных разломов; построенные карты пространственного распределения осей

сжатия (P) и растяжения (T) главных тектонических напряжений демонстрируют преобладание сжатия в направлении СВ–ЮЗ и растяжения в направлении СЗ–ЮВ, физически согласованное с конвергенцией Аравийской плиты.

3. Результаты по прямым задачам сейсмологии (Глава 4).

В рамках решения прямых задач инженерной сейсмологии – количественной характеристики локальных инженерно-геологических условий и их влияния на параметры сейсмических воздействий на территории Республики Армения – получены следующие фундаментальные результаты.

3.1. Корреляционная связь топографического градиента с V_s30 и общенациональная карта V_s30 (подраздел 4.1).

На основе 250 натуральных инструментальных измерений V_s30 впервые для вулканических областей установлена обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и параметром V_s30 – фундаментальная закономерность, противоречащая классической зависимости для невулканических областей (Wald & Allen, 2007) и верифицированная независимыми инструментальными измерениями на вулканических территориях острова Хайнань (Китай). Выявленный феномен интерпретирован как фундаментальная физико-геологическая характеристика вулканогенных провинций, обусловленная спецификой гипергенного выветривания и литологического строения вулканогенно-осадочных толщ.

Впервые построена общенациональная карта V_s30 территории Республики Армения методом геостатистического кокригинга (Slope-based CoKriging, SCK) с отдельным моделированием вулканогенных и невулканических доменов, демонстрирующая доминирование высокоскоростных грунтов с диапазоном значений 450–900 м/с и количественно обосновывающая методологическую непригодность глобальных моделей (в частности, USGS ShakeMap) и стандартных инженерно-геологических классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий Республики Армения (BSRA-20.04-2020).

3.2. Котловинные эффекты на примере Ширакской седиментационной котловины (подраздел 4.2).

На примере Ширакской седиментационной котловины экспериментально установлено, что седиментационные котловины фундаментально модифицируют параметры сейсмических волновых полей: изменяют амплитудно-частотный спектр (резонансное усиление, фокусировка сейсмической энергии), спектральные коэффициенты коды, длительность колебательного процесса и интегральную интенсивность регистрируемых сейсмограмм. Сравнительный анализ волновых форм, зарегистрированных на скальных грунтах и в пределах котловинных условий, выявил отчётливые цуги волн со ступенчатым затуханием, доминирование низкочастотных составляющих спектра и существенно большую длительность колебательного процесса в седиментационной среде по сравнению со скальным основанием, что свидетельствует о принципиальной физико-механической трансформации исходного сейсмического сигнала под воздействием локальных инженерно-геологических условий Ширакской котловины.

3.3. Синтетические акселерограммы и нормативные спектры реакции (подраздел 4.3).

Разработана методология построения синтетических акселерограмм, согласованных с нормативными спектрами реакции и адаптированных к региональным условиям территории Республики Армения, на основе совместной обработки единственной инструментальной записи сильных движений Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. и регионального каталога слабых сейсмических событий ($M_w \geq 3,5$). Методология реализована в форме итеративной процедуры спектрального согласования с сохранением физически реалистичного фазового спектра, что обеспечивает корректное воспроизведение временной структуры расчётных воздействий. Создано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее автоматизированную генерацию акселерограмм, согласованных с заданными нормативными спектральными кривыми.

Сравнительный анализ кривых коэффициента динамичности $\beta(T, n)$, построенных по максимумам ускорений и по параметру кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV), выявил их принципиальные физико-методологические различия, что обосновывает

необходимость пересмотра традиционных подходов к нормированию сейсмических воздействий и развития методологии инженерной интерпретации спектров реакции с учётом интегральных параметров колебательного процесса. Разработанная методология структурно адаптируема к международным нормативным системам (Eurocode 8, ASCE 7, ГОСТ 14.13330, BSRA-20.04-2020).

4. Общий научный итог

В рамках настоящего научного доклада осуществлено комплексное системное решение взаимосвязанной совокупности прямых и обратных задач сейсмологии применительно к территории Республики Армения: от обоснования инструментально-методологической базы и алгоритмов первичной обработки данных (Глава 1), через решение обратных задач формализованного распознавания сейсмоопасных зон, восстановления параметров очаговых процессов, идентификации дублетных землетрясений и феноменологического анализа афтершоковых процессов методами машинного обучения (Глава 2), а также обратных задач восстановления глубинной скоростной структуры литосферы методами томографической инверсии, исследования современной геодинамики методами GNSS-наблюдений и расчёта фокальных механизмов землетрясений (Глава 3), к решению прямых задач инженерной сейсмологии - построению общенациональной карты V_s30 , количественной характеристики котловинных эффектов и разработке методологии синтетических акселерограмм (Глава 4).

Совокупность полученных результатов формирует новый методологический и эмпирический этап в развитии региональной сейсмологии и геодинамики зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, обеспечивая переход от фрагментарных эпизодических наблюдений к системному сейсмогеодинамическому мониторингу территории Республики Армения на единой инструментальной базе с применением формализованных алгоритмов обработки и физико-математической интерпретации многопараметрических данных, отвечающих современному мировому уровню исследований в области физики Земли.

5. Прикладное значение полученных результатов

5.1. Сейсмогеодинамический мониторинг и инструментальная инфраструктура

Создана и введена в эксплуатацию аппаратно-программная геоинформационная инфраструктура непрерывного мониторинга сейсмических и геофизических полей на территории Республики Армения, формирующая национальную систему сейсмологических наблюдений международного метрологического класса. Построенная карта магнитуды представительности ($M_c \approx 1,5$) обеспечивает научное обоснование оптимизации конфигурации наблюдательной сети и однородность исходных данных для всех сейсмоактивных зон региона.

5.2. Сейсмическое микрорайонирование

Полученные количественные оценки котловинных эффектов и построенная общенациональная карта V_s30 непосредственно применимы для инженерно-сейсмологического микрорайонирования урбанизированных территорий Республики Армения, расположенных в седиментационных котловинах сопоставимого тектонического строения.

5.3. Вероятностная оценка сейсмической опасности (PSHA)

Карта V_s30 является критически важной для региональной калибровки уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) и уточнения вероятностных оценок сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) территории Республики Армения и сопредельных регионов.

5.4. Прогноз сильных сейсмических событий

Установленные феноменологические закономерности дублетных землетрясений, пространственно-временной миграции сейсмичности и фокальных механизмов землетрясений формируют физическую основу для развития моделей долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий в коллизионных тектонических обстановках.

5.5. Сейсмостойкое проектирование и строительство

Разработанная методология построения синтетических акселерограмм и созданное специализированное программное обеспечение применимы для оценки динамического отклика зданий и сооружений при расчётных сейсмических воздействиях и для уточнения нормативной базы сейсмостойкого проектирования Республики Армения.

5.6. Пересмотр национальной нормативной базы

Установленная количественная непригодность глобальных моделей Vs30 и стандартных инженерно-геологических классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий Республики Армения, а также выявленные принципиальные различия между кривыми динамичности по максимумам ускорений и по САV формируют научное обоснование пересмотра действующих сейсмических строительных норм и практики сейсмического микрорайонирования республики.

5.7. Оценка геодинамических рисков

Результаты сейсмотомографических исследований - пространственное распределение скоростных аномалий, термический режим коры и верхней мантии, уточнённая геометрия сейсмогенных зон - применимы для комплексной оценки геодинамических рисков территории Республики Армения и сопредельных территорий зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит.

5.8. Международная применимость

Разработанный методологический комплекс - алгоритмы декластеризации каталогов, кластеризации сейсмических событий методами машинного обучения, формализованного распознавания сейсмоопасных зон (FCAZ), томографической инверсии, количественной оценки котловинных эффектов, построения карт Vs30 для вулканических областей и генерации синтетических акселерограмм - обладает структурной адаптируемостью и может быть распространён на другие орогенные области и вулканические провинции в пределах Альпийско-Гималайского пояса и сопоставимых тектонических обстановок мира.

6. Перспективы дальнейших исследований

Полученные в настоящем научном докладе результаты формируют научно-методологическую основу для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований по следующим направлениям:

- дальнейшее развитие сейсмогеодинамической наблюдательной сети с расширением её плотности и интеграцией в международные консорциумы (FDSN, ORFEUS, GEOFON);
- формирование на базе сейсмогеодинамической наблюдательной сети Республики Армения качественно новых массивов больших данных (Big data in Earth science) в науках о Земле, включая систематически

пополняемые сейсмологические каталоги и бюллетени, обеспечивающие методологическую основу для внедрения алгоритмов машинного обучения и нового поколения фундаментальных и прикладных исследований.

- переход от 2D- к 3D-поверхностно-волновой томографии литосферы Республики Армения по мере накопления длительных рядов широкополосных сейсмологических данных;
- системное исследование региональной разломной структуры на основе непрерывных GNSS-наблюдений длительных временных рядов;
- развитие методологии многопараметрического мониторинга предвестниковых аномалий на основе совместного анализа сейсмологических, GNSS и других геофизических данных;
- построение региональных уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (GMPE), адаптированных к специфическим условиям территории Республики Армения;
- систематический анализ дублетного режима сейсмичности на других орогенных областях Альпийско-Гималайского пояса для верификации универсального характера выявленных феноменологических закономерностей;
- интеграция полученных результатов в глобальный геодинамический контекст исследований процессов в зонах континентальной коллизии Альпийско-Гималайского пояса.

В совокупности предложенные постановки и решения формируют целостную научно-методологическую основу системного сейсмогеодинамического мониторинга территории Республики Армения и обеспечивают фундаментальный научный задел для дальнейших исследований в области физики Земли, оценки сейсмической опасности и сейсмостойкого строительства, что соответствует квалификационному уровню докторской диссертации, защищаемой по совокупности опубликованных научных работ с научным докладом, и имеет существенное значение для развития соответствующих отраслей геофизического знания.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science (квартили Q1–Q4)

1. Karapetyan J., Li L., Zhou J., Hovhannisyan L., Wang Y., Karapetyan R., Gevorgyan A., Harutyunyan K. The Problems of Declustering in the Processing of Seismic Information in the Tauro Caucasus Region // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2024. - Vol. 114, No. 4. - P. 2008–2027. - DOI: 10.1785/0120230291. **[Scopus, WoS - Q1]**.
2. Karapetyan J., Li L., Geodakyan E., Yuan S.Y., Karapetyan R. Site Survey and Assessment for the Planned Seismogeodynamic Monitoring Network in the Republic of Armenia // Earthquake Science. - 2022. - Vol. 35. - P. 487–495. - DOI: 10.1016/j.eqs.2022.12.004. **[Scopus, WoS - Q1]**.
3. Karapetyan J.K., Li L. Comprehensive Studies of Seismic Forecast and Seismic Hazard Assessment in Armenia, Current State and Prospects // Acta Geologica Sinica (English Edition). - 2021. - Vol. 95, Suppl. 1. - P. 55–58. - DOI: 10.1111/1755-6724.14831. **[Scopus, WoS - Q2]**.
4. Karapetyan J.K., Sargsyan R.S., Ghazaryan K.S., Dzeranov B.V., Dzeboev B.A., Karapetyan R.K. Current State of Study and Actual Problems of Tectonics, Seismology and Seismotectonics of the Territory of Armenia // Russian Journal of Earth Sciences. - 2020. - Vol. 20. - DOI: 10.2205/2020ES000709. **[Scopus - Q3]**.
5. Karapetyan J.K., Gasparyan A.S., Shakhparonyan S.R., Karapetyan R.K. Registration and Spectral Analysis of Waveforms of 10.24.2019 Earthquake in the Caucasus Using the New IGES-006 Seismic Sensor // Russian Journal of Earth Sciences. - 2020. - Vol. 20, ES6006. - DOI: 10.2205/2020ES000742. **[Scopus - Q3]**.
6. Karapetyan J.K., Hovhannisyan L.Kh., Karapetyan R.K. Simulated Earthquake Wave Compatible with Design Spectrum // Geology and Geophysics of Russian South. - 2025. - Vol. 15(3). - P. 110–127. - DOI: 10.46698/VNC.2025.25.83.001. **[Scopus - Q3]**.
7. Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Исследование динамических характеристик многопролётного моста в Ереване по микросейсмическим колебаниям // Геология и геофизика Юга России. - 2022. - Т. 12(2). - С. 67–77. - DOI: 10.46698/VNC.2022.25.25.005. **[Scopus - Q3]**.
8. Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Сравнительный анализ динамических характеристик зданий различных типов при микросейсмических колебаниях // Геология и геофизика Юга России. - 2021. - Т. 11(3). - С. 103–114. - DOI: 10.46698/VNC.2021.70.17.009. **[Scopus - Q3]**.

9. Карапетян Дж.К., Чилингарян А.З., Карапетян К.А., Мкртчян Г.А. Результаты оценки свойств грунтов Абовянского специального подземного хранилища газа по инженерно-геофизическим исследованиям // Геология и геофизика Юга России. - 2021. - Т. 11(4). - С. 83–93. - DOI: 10.46698/VNC.2021.77.30.007. **[Scopus - Q3]**.
10. Карапетян Дж.К., Айрапетян О.Ю., Мхитарян Д.А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции // Геология и геофизика Юга России. - 2019. - Т. 9, № 1. - С. 110–121. - DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792. **[Scopus - Q3]**.
11. Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Заалишвили В.Б. Учёт результатов зарегистрированных сейсмических колебаний разрушительных землетрясений и Великого Японского землетрясения 11.03.2011 г. при оценке сейсмической опасности // Геология и геофизика Юга России. - 2013. - № 2. - С. 26–38. **[Scopus - Q3]**.
12. Karapetyan J.K. Comparative Analysis of Dynamic Coefficient $\beta(T, n)$ Curves Obtained by Different Methods // Seismic Instruments. - 2013. - Vol. 49. - P. 307–314. - DOI: 10.3103/S0747923913040038. **[Scopus - Q3]**.
13. Soloviev A., Smirnov A., Gvishiani A., Karapetyan J., Simonyan A. Quantification of Sq Parameters in 2008 Based on Geomagnetic Observatory Data // Advances in Space Research. - 2019. - Vol. 64, No. 11. - P. 2305–2320. - DOI: 10.1016/j.asr.2019.08.038. **[Scopus, WoS - Q1]**.
14. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A. Geodynamics, Seismicity and Seismic Hazards of the Caucasus // Earth-Science Reviews. - 2020. - DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222. **[Scopus, WoS - Q1]**.
15. Krasnoperov R., Sidorov R., Grudnev A., Karapetyan J., Lazarev D. On the Magnetic Properties of Construction Materials for Magnetic Observatories // Applied Sciences. - 2023. - Vol. 13, 2246. - DOI: 10.3390/app13042246. **[Scopus, WoS - Q1]**.
16. Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Belov I.O., Karapetyan J.K., Dzeranov B.V., Barykina Y.V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. - 2021. - Vol. 11, 7972. - DOI: 10.3390/app11177972. **[Scopus, WoS - Q1]**.
17. Kaftan V.I., Manevich A.I., Gabsatarov Y.V., Karapetyan J.K., Shevchuk R.V., Losev I.V., Sayapina A.A. Impact of a Series of Destructive Kahramanmaraş Earthquakes (February 6, 2023) on the Regime of Modern Crustal Movements of the Caucasian Region // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. - 2025. - Vol. 61. - P. 831–841. - DOI: 10.1134/S1069351325700648. **[Scopus, WoS - Q3]**.

18. Кафтан В.И., Маневич А.И., Габсатаров Ю.В., Карапетян Дж.К., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Саяпина А.А. Влияние серии катастрофических землетрясений Кахраманмараш (06.02.2023 г.) на режим современных движений земной коры Кавказа // Физика Земли. - 2025. - № 5. - С. 126–138. **[Scopus, WoS - Q3]**.
19. Chilingaryan R.Y., Khachatryan H.F., Mkhitarayan S.A., Hovhannisyan M.A., Antonyan A.P., Minasyan A.M., Drmeyan H.R., Karapetyan J.K., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan A.H. The Suitability of Various Recording Methods and Devices for Registration of Seismic Signals // Journal of Instrumentation. - 2024. - Vol. 19, No. 5, C05040. - DOI: 10.1088/1748-0221/19/05/C05040. **[Scopus, WoS - Q3]**.
20. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. 2D Tomographic Maps of Rayleigh and Love Waves for Armenia and Its Surrounding Areas // Russian Journal of Earth Sciences. - 2025. - Vol. 25, ES3014. - DOI: 10.2205/2025es001019. - EDN: SBYWRB. **[Scopus - Q3]**.
21. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia–Arabia Plates Using 2D Surface Waves Tomography // Russian Journal of Earth Sciences. - 2023. - Vol. 23, ES2004. - DOI: 10.2205/2023ES000835. **[Scopus - Q3]**.
22. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. The Caucasus Territory Hot–Cold Spots Determination and Description Using 2D Surface Waves Tomography // Russian Journal of Earth Sciences. - 2022. - Vol. 22, ES5004. - DOI: 10.2205/2022ES000814. **[Scopus - Q3]**.
23. 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. - 2020. - Vol. 20, ES6010. - DOI: 10.2205/2020ES000754. **[Scopus - Q3]**.
24. 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. - 2019. - Vol. 19, ES6005. - DOI: 10.2205/2019ES000691. **[Scopus - Q3]**.
25. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Ли Л., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Мкртчян Г.А., Карапетян Р.К., Мкртчян М.А. О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги // Геология и геофизика Юга России. - 2025. - Т. 15(4). - С. 42–59. - DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n. **[Scopus - Q3]**.
26. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А. Разрядка сейсмоструктурных напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$) как процесс деструкции геологической среды очаговой области // Геология и

- геофизика Юга России. - 2024. - Т. 14(3). - С. 71–84. - DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f. **[Scopus – Q3]**.
27. Пашаян Р.А., Карапетян Дж.К., Геворкян А.А., Карамян Р.А. Оценка гидрогеологических показателей формирования напряжённого состояния земной коры территории Армении // Геология и геофизика Юга России. - 2024. - Т. 14(2). - С. 61–76. - DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005. **[Scopus – Q3]**.
28. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w = 7,8$) // Геология и геофизика Юга России. - 2023. - Т. 13(4). - С. 42–54. - DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. **[Scopus – Q3]**.
29. Karapetyan J.K., Geodakyan E.G., Shahparonyan S.R., Karapetyan R.K. Magnetovariational Processes Preceding the Earthquakes in the Republic of Armenia and Adjacent Regions from the Data of Nearby Geomagnetic Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2026. - № 4. **[Scopus, WoS – Q3]**.
30. Карапетяна Дж.К., Айрапетяна О.Ю., Элояна А.В., Карапетяна Р.К., Шахпароняна С.Р. Оценка динамических характеристик и сейсмической уязвимости шестиэтажного железобетонного здания в Армении с использованием метода Накамуры // Геология и геофизика Юга России. - 2026. - Т. 16 (2) **[Scopus - Q3]**.
31. Pashayan R., Karapetyan J., Arutyunyan L., Tovmasyan K. Modern Crustal movements of the Armenian highland based on hydrogeochemical monitoring results. *Periodico di Mineralogia*, Volume 95, No. 3, 2026 <https://doi.org/10.5281/zenodo.20410171>. **[Scopus - Q3]**.
32. Sidorov, R., Kudin, D., Ryakhovsky, I., Borodin P., Prikop M, Sapunov V., Karapetyan J., Yusupov V. Advances in hardware and constructions in geomagnetic observatory measurements and practice in Russia and the near abroad. *Acta Geodaetica et Geophysica* (2026). <https://doi.org/10.1007/s40328-026-00503-7>. **[Scopus - Q2]**.
- II. Статьи в рецензируемых научных журналах**
33. Карапетян Дж.К. Сопоставительный анализ расчётных кривых коэффициента динамичности $\beta(T, n)$, полученных различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2012. - Т. 39, № 3. - С. 33–40.
34. Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Шахпаронян С.Р., Карапетян Р.К. Аномалия геомагнитного поля, предшествующая возникновению землетрясений на территории Республики Армения и сопредельных районов // Доклады НАН РА. - 2022. - Т. 122, № 4. - С. 287–299. - DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.4-287.

35. Карапетян Дж.К., Гаспарян А.С., Шахпаронян С.Р., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К., Шахпаронян А.С. Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты // Доклады НАН РА. - 2022. - Т. 122, № 3. - С. 207–217. - DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-207.
36. Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Виноградов Ю.А., Габсатарова И.П., Маргарян С.С., Саргсян Г.В. Шоржинское землетрясение 5 февраля 2021 г. // Известия Национальной академии наук Армении, Науки о Земле. - 2021. - Т. 74, № 2. - С. 33–50.
37. Карапетян Дж. Закономерности изменения спектров реакции в зависимости от магнитуд сильных землетрясений // Известия НАН РА, Науки о Земле. - 2007. - Т. LX, № 1. - С. 56–59.
38. Саакян Б.В., Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Мкртчян М.А. Развитие сейсмотектонических деформаций на сейсмическом линейном элементе Эрзрум–Боржоми–Казбек // Известия Национальной академии наук Армении, Науки о Земле. - 2023. - Т. 76, № 1. - С. 14–23.
39. Пашаян Р.А., Карапетян Дж.К., Арутюнян Л.В., Маргарян С.С., Геворкян А.А., Карамян Р.А., Товмасын К.Г. Сейсмотектоническая активность очаговых зон землетрясений Северной и Центральной Армении за период 2019–2023 гг. // Российский сейсмологический журнал. - 2024. - Т. 6, № 1. - С. 65–79. - DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.04.
40. Пашаян Р.А., Карапетян Дж.К., Арутюнян Л.В., Товмасын К.Г. Геодинамика очаговых зон сильных землетрясений Армении // Российский сейсмологический журнал. - 2023. - Т. 5, № 1. - С. 75–88. - DOI: 10.35540/2686-7907.2023.1.05. - EDN: JGRQUQ.
41. Пашаян Р.А., Карапетян Дж.К., Арутюнян Л.В., Товмасын К.Г., Карамян Р.А. Геофизический мониторинг геодинамического режима Центральной Армении // Российский сейсмологический журнал. - 2022. - Т. 4, № 1. - С. 41–52. - DOI: 10.35540/2686-7907.2022.1.03.
42. Оганян М.В., Симонян А.О., Карапетян Дж.К., Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Сидоров Р.В. Особенности проявления сезонных вариаций геомагнитного поля в северной части территории Армении // Геофизические исследования. - 2019. - Т. 20, № 4. - С. 40–51. - DOI: 10.21455/gr2019.4.3.
43. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Кудин Д.В., Карапетян Дж.К., Симонян А.О. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН. - 2018. - Т. 10, NZ4001. - DOI: 10.2205/2018NZ000357.
44. Оганесян С.М., Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Саакян Б.В. О необходимости изменения расчётных схем на сейсмостойкость в строительных нормах и правилах (СНиП) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2021. - № 5. - С. 22–35. - DOI: 10.37153/2618-9283-2021-5-22-35.

45. Элоян А.В., Карапетян Дж.К., Матевосян Г.М., Карапетян Р.К. Оптимальный выбор расположения опор в задаче устойчивости прямоугольной пластинки при воздействии температурного поля. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;34(3):45–53. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-45-53](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-45-53).
46. Элоян А.В., Карапетян Дж.К. Анализ зависимости оптимального расположения опор по длине пластинки от отношения сторон // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2024. № 6. С. 73–81. DOI 10.37153/2618-9283-2024-6-73-81.
47. Оганесян С.М., Карапетян С.С., Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К. Опыт и результаты сейсмометрического мониторинга объектов гидротехнических сооружений Республики Армения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 1. – С. 55–59.
48. Оганесян С.М., Карапетян С.С., Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К. Система инструментального мониторинга сейсмической безопасности ответственных инженерных сооружений «Гюмри-01» // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 2.
49. Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. Комплексный анализ количественных параметров колебаний грунтов и оценка их зависимостей от магнитуд землетрясений // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2008. – № 3. – С. 59–63.
50. Григорян В.Г., Карапетян Дж.К., Казарян К.С., Саргсян Р.С. Сейсмическая опасность территории Армении: нормативные карты районирования. Предварительный вариант новой карты ОСР // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 71–83. – DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26789.
51. Минасян Р.С., Карапетян Дж.К., Карамян Р.А., Игитян А.А., Геворгян А.А., Нургалиев Д.К., Крылов П.С., Даутов А.Н., Ясонов П.Г., Кузина Д.М. Палеогидрогеологические и геофизические исследования в связи с реконструкцией палеоклимата бассейна озера Севан (Армения) // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 122–134. – DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26793.
52. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Оганесян С.М., Саргсян С.Н. Спектральный анализ сейсмических воздействий в ближней зоне сильного землетрясения и особенности проявления // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 4. – С. 164–171. – DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20909.
53. Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Саргсян С.Н., Карапетян Дж.К. О спектрах сейсмических колебаний грунтов в ближней зоне землетрясения // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 2. – С. 104–108.
54. Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Карапетян Дж.К. К проблеме изучения аномальных проявлений сейсмических воздействий в очаговой и ближней

зонах сильных землетрясений // Геология и геофизика Юга России. - 2014. - № 1. - DOI: 10.23671/VNC.2014.1.55403.

55. Оганесян С.М., Карапетян С.С., Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Аукажиева Ж.М., Гаспарян А.С., Мкртчян Г.А. Опыт и результаты инженерно-сейсмометрического мониторинга объектов гидротехнических сооружений Армении // Геология и геофизика Юга России. - 2013. - № 2. - С. 46–53. - DOI: 10.23671/VNC.2013.2.55546.
56. Pashayan R.A., Karapetyan J.K., Harutyunyan L.V. Geodynamics of Central Armenia Based on the Results of Hydrogeochemical Monitoring // American Journal of Mechanics and Applications. - 2020. - Vol. 8, No. 3. - P. 40–46. - DOI: 10.11648/j.ajma.20200803.12.

III. Главы в коллективных монографиях, изданных международными издательствами

57. Gevorgyan A., Karapetyan J. Comparative Analysis of Seismicity and Tectonics of the Territory of Armenia // Kosterov A., Lyskova E., Mironova I., Apatenkov S., Baranov S. (eds). Problems of Geocosmos – 2022. ICS 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. - Cham: Springer, 2023. - P. 183–194. - DOI: 10.1007/978-3-031-40728-4_13.
58. Геодакян Э.Г., Саакян Б.В., Карапетян Дж.К., Оганесян С.М., Мкртчян М.А. Фрактальность и иерархическая структура сейсмичности центральной части Армении // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: коллективная монография. - Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022. - С. 153–158.

IV. Материалы международных научных конференций

59. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Саакян Б.В., Мкртчян М.А., Оганесян С.М., Мкртчян Г.А. Процесс разрывообразования и механическая модель очага восточно-турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$) // Материалы VIII международной конференции «Актуальные проблемы механики сплошной среды». - Цахкадзор, 2023. - С. 92–96. - ISBN 978-5-8080-1518-0.
60. Оганесян С.М., Карапетян Дж.К., Геодакян Э.Г., Саакян Б.В. О приведении в соответствие величин максимальных ускорений на картах сейсмического районирования // Актуальные проблемы механики сплошной среды: материалы VII международной конференции. - Цахкадзор: Гитутюн НАН РА, 2021. - С. 185–189.
61. Саакян Б.В., Мкртчян М.А., Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Карапетян Дж.К. Геодинамика и сейсмичность на сейсмическом линейменте Эрзрум–Боржоми–Казбек (ЭБК) // Сборник научных материалов XIV Уральской молодёжной школы по геофизике. - Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. - С. 204–209. - ISBN 978-5-903258-47-5.

62. Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Карапетян Дж.К. Характерные особенности проявления сейсмичности территории Армении и сопредельных районов // Сборник научных материалов XIV Уральской молодёжной школы по геофизике. - Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. - С. 144–148. - ISBN 978-5-903258-47-5.

V. Тезисы международных научных конференций

63. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of Modern Regional and Local Anomalous Variations of Seismicity in the Tavo-Caucasian Region // EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 April 2023, EGU23-16905. - DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16905.
64. Karapetyan J., Ghazaryan K., Sargsyan R., Karapetyan R. Efficiency Assessment of Seismological Information, Monitoring System and Seismicity Study for the Republic of Armenia // EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-11385. - DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-11385.
65. Karapetyan J., Karapetyan R. Geophysical and Engineering-Seismological Research in Armenia: Main Directions, Achievements and Prospects for Development // Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2019. - Vol. 21, EGU2019-10958.
66. Zhou J., Karapetyan J., Li L., Wang Y., Wang C., Tian X. Topographic Slope–Vs30 Relationship in Volcanic Terrain and Vs30 Map of Armenia // 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission, Tashkent, Uzbekistan, 25–30 April 2026. - P. 168.
67. Li L., Karapetyan J., Wang Y., Tian X., Zhou J., Wang C., Karapetyan R. Recent Progress of Seismic-Geodynamic Observation Networks in Armenia: A Permanent Infrastructure for Research and Monitoring // 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission, Tashkent, Uzbekistan, 25–30 April 2026. - P. 310.

Ջոն Կոստիկի Կարապետյան
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԱԾՔԻ ՀԱՄԱՐ ԱՐԴԻԱԿԱՆ
ՍԵՅՍԱՐԱՐԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՒՂԻՂ ԵՎ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄՆԵՐ
(ԱՄՓՈՓՈՒՄ)

Գիտական զեկուցումը նվիրված է Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համար արդիական սեյսմաբանության ուղիղ և հակադարձ խնդիրների համալիրի լուծմանը: Ձևակերպված և հիմնավորված են նոր գիտական դրույթներ, որոնց համախումբը որակվում է որպես խոշոր գիտական խնդրի լուծում Երկրի ֆիզիկայի, երկրաշարժագիտության և երկրադինամիկայի բնագավառներում: Ստացված արդյունքները ստեղծում են միասնական գիտամեթոդական հիմք Հայաստանի Հանրապետության տարածքի դրվագային դիտարկումներից համակարգային սեյսմաերկրադինամիկական մշտադիտարկման անցման համար: Վերջիններս համապատասխանում են Երկրի ֆիզիկայի բնագավառում իրականացվող հետազոտությունների ժամանակակից համաշխարհային մակարդակին:

Գիտական զեկույցը կազմված է չորս հիմնական գլուխներից, որտեղ ամփոփված են ստացված արդյունքները: **Առաջին գլուխը** նվիրված է սեյսմաբանական հետազոտությունների գործիքա-մեթոդաբանական ապահովման ու սեյսմաբանական տեղեկատվության մշակման հիմնախնդրին, որտեղ նկարագրված են վերջին տարիներին այդ ոլորտում իրականացված հետազոտությունները, առկա հիմնախնդիրները, կիրառվող մեթոդական հարցերի գերադասելի և թերի կողմերը: Առաջին գլուխը բաղկացած է երեք ենթաբաժիններից (1.1, 1.2, 1.3): Ենթաբաժին 1.1-ը վերաբերում է Հայաստանի Հանրապետության տարածքում ստեղծված սկզբունքային նոր, տարածաշրջանում եզակի սեյսմաերկրադինամիկական ցանցի ենթակառուցվածքի կազմակերպմանը, գործարկմանը, սարք-սարքավորումներով ապահովմանը, տվյալների ստացման լոգիստիկ կառուցվածքին, ինչպես նաև կայանների տեղակայման վայրերի գիտական հիմնավորմանը: Կայանների տեղակայման հիմնավորման նպատակով համապատասխան միջազգային (PQLX; McNamara & Buland, 2004) չափագիտական ստանդարտներին իրականացվել է ֆոնային սեյսմիկ դաշտի քանակական սպեկտրալ-ժամանակային վերլուծություն: Գիտականորեն հիմնավորվել են կայանների տեղակայման օպտիմալ վայրերը, ինչն ապահովել է ֆոնային սեյսմիկ ադմոլների քանակական բնութագրումը և համապատասխանաբար, վերջիններիս ազդեցությունների նվազագույն գոտիներում կայանների տեղայնացումը (ենթաբաժին 1.1): Այնուհետև՝ ըստ միջազգային չափորոշիչների իրականացվել են կայանների դասակարգումը: Գործածության մեջ է դրվել նոր սերնդի համալիր սեյսմաերկրադինամիկական դիտարկումների համակարգ, որը միավորում է մեկ գործիքային ձևաչափում միջազգային չափագիտական ստանդարտի տասը կայաններ՝ լայնատիրույթ սեյսմաչափեր (սեփական տատանման պարբերությունը՝

120 վրկ), աքսելերոմետրեր գրունտների ուժեղ շարժումները գրանցելու նպատակով և երկրադինամիկական առաջին դասի GNSS կայաններ: Զեկույցում մանրամասն նկարագրված է ստեղծված կայանների և տվյալների հավաքագրման կենտրոնի լոգիստիկ կառուցվածքը: Հատկապես կարևոր է նշել, որ Հայաստանի Հանրապետության տարածքում առաջին անգամ կիրառվել է սեյսմաբանական տվյալների իրական ժամանակում ստացման արբանյակային կապուղին: Բացի դրանից, որպես տվյալների փոխանցման այլընտրանքային կապուղի, լոգիստիկ սխեմայում ինտեգրված է հինգերորդ սերնդի շարժական կապ (5G), ինչը երաշխավորում է տեղեկատվության անընդհատ ստացումը անգամ հիմնական արբանյակային ալիքի ժամանակավոր անհասանելիության դեպքում և ձևավորում է հեռահաղորդակցության երկմակարդակ կայուն համակարգ: Գործող կայանների ձևաչափերի դեպքում Հայաստանի Հանրապետության և հարակից շրջանների տարբեր երկրադինամիկական գոտիների համար հաշվարկվել և քարտեզագրվել են ներկայացուցչական մագնիսոտիների (Mc) շեմային արժեքները: Հաշվարկների արդյունքում պարզվել է, որ ներկայացուցչական մագնիսոտի էներգիական դասը $Mc \approx 1,5$: Հատկապես կարևոր է նշել, որ սեյսմաբանական նյութի մշակման ճշտությունը սեյսմիկ վտանգի գնահատման ժամանակ էական նշանակություն ունի: Այդ նպատակով 1.2 ենթաբաժնում Տավրոս-Կովկասի տարածքի համար դիտարկվել է սեյսմաբանական նյութի մշակման դեկլաստերավորման տարբեր մեթոդների կիրառելիության հիմնախնդիրը: Մասնավորապես, Տավրոս-Կովկասի տարածաշրջանի սեյսմաբանական կատալոգի դեկլաստերավորման ալգորիթմների համեմատական վերլուծության արդյունքում (Gardner & Knopoff, 1974; Uhrhammer, 1986; Grünthal, 1985; Reasenber, 1985; Zaliapin & Ben-Zion, 2013) հաստատվել է Gardner & Knopoff, Grünthal և Zaliapin & Ben-Zion ալգորիթմների արդյունքների վիճակագրական զուգամիտությունը, չնայած դրանց էապես տարբերվող տեսական հիմքերին, ինչն ապահովում է կապված և անկախ սեյսմիկ իրադարձությունների վստահելի առանձնացումը: Կատարելագործված դեկլաստերավորման մեթոդաբանությունը հանդիսանում է ակտիվ բեկվածքային կառուցվածքների նույնականացման արդյունավետ գործիք, որն ապահովել է կոլիզիոն տիրույթներում որպես տեկտոնիկ լարումների վերաբաշխման ցուցիչ՝ սեյսմիկության տարածա-ժամանակային միգրացիայի երևույթի բացահայտումը (ենթաբաժին 1.2): Առաջին անգամ Տավրոս-Կովկասի տարածաշրջանի համար հանրապետական և միջազգային սեյսմաբանական շտեմարանների համակարգային ինտեգրման հիման վրա կազմվել է միասնական դեկլաստերիզացված սեյսմաբանական շտեմարան: Առաջին անգամ դեկլաստերավորման որակի գնահատման համար կիրառվել են Վորոնոյի դիագրամները, որոնք ձևավորել են հիմնարար և կիրառական նշանակության էմպիրիկ արդյունք՝ ապահովելով շտեմարանի հասանելիությունը միջազգային գիտական հանրության համար [1]:

Ենթաբաժին 1.3-ում քննարկվել է երկրաշարժերի բնույթը, մասնավորապես դիտարկվել են տեկտոնական և հրաբխատեկտոնական երկրաշարժերի

տարբերակման մեթոդաբանական հարցեր՝ էգեյան հրաբխային աղեղի օրինակով: Ցույց է տրվել, որ լայնատիրոյթ կայաններն ապահովում են տեկտոնիկ և հրաբխատեկտոնիկ երկրաշարժերի վստահելի տարբերակում: Մշակված մեթոդական մոտեցումը ճկուն է և կարող է կիրառվել Հայաստանի Հանրապետության ակտիվ հրաբխականություն դրսևորող շրջաններում: Վերջինս հատկապես արդիական է Հայաստանի Հանրապետության հյուսիսի և հարակից Զավախքի սեյսմակտիվ լեռնաշխարհի տարածքի համար, ինչպես գիտենք այդ հատվածին բաժին է ընկնում Կովկասի տարածաշրջանի սեյսմիկության ավելի քան 30 %-ը, որտեղ տեկտոնիկ ու հրաբխատեկտոնիկ սեյսմածին գործընթացները դրսևորվում են անմիջական տարածական զուգակցմամբ (ենթաբաժին 1.3):

Երկրորդ գլուխը նվիրված է մեքենայական ուսուցման մեթոդների կիրառությանը Տավրոս-Կովկասի սեյսմիկության ուսումնասիրմանը, օրինաչափությունների հայտնաբերմանն և այլ բնութագրական հիմնախնդիրների բացահայտմանը: Ժամանակակից մեքենայական ուսուցման մեթոդներով հետազոտվել են սեյսմիկության տարածա-ժամանակային բաշխվածությունները, որոնց միջոցով հնարավոր է եղել բացահայտել զույգ երկրաշարժերի դրսևորման նոր օրինաչափություններ: Մասնավորապես, K-means և DBSCAN կլաստերավորման հիմնարար ալգորիթմների կիրառմամբ իրականացվել է Տավրոս-Կովկասի տարածաշրջանի սեյսմաբանական շտեմարանի համակարգային վերլուծություն: Նշված ալգորիթմների համակարգային կիրառումը տվյալ տարածաշրջանների համար բացահայտել են նոր օրինաչափություններ, մասնավորապես, դուրս գալով տարածաշրջանի սեյսմատեկտոնական պայմաններից K-means ապահովում է ֆիքսված թվով շրջանաձև կլաստերների ճիշտ դասակարգումը, իսկ DBSCAN-ը առավել արդյունավետ է կամայական երկրաչափական ձևի և փոփոխական խտության խմբավորումների համար և թույլ է տալիս սահմանել գիտականորեն հիմնավորված կապեր սեյսմիկության և տարածաշրջանի երկրաբանատեկտոնական կառուցվածքների միջև: Բացի դրանից, EPA (Earthquake-Prone Areas; Գեյֆանդ, Կելիս-Բորոկ և այլք) դասական մոտեցման զարգացման հիման վրա մշակվել են հնարավոր սեյսմավտանգ գոտիների ճանաչման նոր մեթոդաբանություններ՝ օրինակ, մեկ դասի կիրառմամբ ուսուցման սխեման (one-class classification) և FCAZ (Formalized Clustering and Zoning) մեթոդը, որն ապահովում է արդյունքների դինամիկ ճշգրտում իրական ժամանակի մասշտաբով: Մշակված մեթոդաբանությունները հաջողությամբ փորձարկվել են Կովկասի տարածաշրջանի համար: Ստացված արդյունքները հետազայում կարող են օգտագործվել խորքային բեկվածքների տարածականորեն ճշգրտման, ինչպես նաև հնարավոր սեյսմավտանգ օջախային գոտիների տարանջատման ժամանակ (ենթաբաժին 2.1): 2023 թ. փետրվարի 6-ի աղետալի արևելա-թուրքական երկրաշարժերը հանդիսանում են դասական օրինակներ հատկապես դուբլետ երկրաշարժերի համակողմանի ուսումնասիրման տեսանկյունից: Այն ունեցել է դուբլետ բնույթ և հատկապես դրանց հետցնցումային պրոցեսի դաշտը

արտահայտվել է առանձնահատուկ, որն էլ հանդիսացել է զեկույցի հիմնական խնդիրներից մեկը: 2023 թ. փետրվարի 6-ի արևելա-թուրքական երկրաշարժերի ($M_w = 7,8$ և $M_w = 7,5$) համալիր վերլուծության շրջանակներում, օջախների մեխանիզմների պարամետրերի, էպիկենտրոնների տարածա-ժամանակային բաշխման և հետցնցումային գործընթացների վերլուծության հիման վրա, հաստատվել է նշված իրադարձությունների դուբլետ բնույթը, որը բնութագրվում է չորս ենթաօջախից կազմված, բազմաակտ, ոչ գծային կառուցվածքով խզումնագոյացման պրոցես: Բացահայտվել է, որ դիտարկվող իրադարձությունները կապված են ոչ միայն տարածա-ժամանակային և էներգետիկ դասական հարաբերակցությամբ, այլև երկրաբանատեկտոնական առանձնահատկություններով, ընդ որում առաջին իրադարձությունը հանդիսանում է հարուցման մեխանիզմ 2023 թ. փետրվարի 20-ի երկրաշարժի ($M_w = 6,3$) համար: Երկրորդ գլխում ուսումնասիրվել են նշված երկրաշարժի դուբլետ բնույթի ռեժիմն ու տեկտոնիկ լարումների ռելաքսացիայի մեխանիզմը (ենթաբաժին 2.3): Ժամանակակից Random Forest ալգորիթմի կիրառմամբ հիմնավորվել են վիճակագրորեն նշանակալի առավելություններ թե՛ ավանդական դետերմինիստական մոտեցումների, թե՛ մեքենայական ուսուցման այլընտրանքային մոդելների նկատմամբ: Առաջին անգամ հաստատվել է, որ Տավրոս-Կովկասյան տարածաշրջանում դուբլետ բնույթի ռեժիմն արտահայտվում է սեյսմիկության բոլոր էներգետիկ մակարդակներում - ոչ միայն ուժեղ, այլև համեմատաբար թույլ սեյսմիկ իրադարձությունների ժամանակ, որոնց հաջորդականությունը դրսևորվում են 15 րոպեից մինչև մեկ ժամ միջակայքում և բնութագրվում են մինչև 20 կմ խորությունների միգրացիոն գործընթացով: Այս արդյունքն ընդլայնում է դուբլետ բնույթ ունեցող երկրաշարժերի մասին դասական պատկերացումները, որպես ուժեղ սեյսմիկ իրադարձությունները բացառապես բնորոշող հազվադեպ երևույթ: Բացի դրանից առաջին անգամ բացահայտվել է օջախային գոտիներում տեկտոնիկ լարումների ռելաքսացիայի սկզբունքորեն նոր ֆիզիկական մեխանիզմ. հաստատվել է, որ դուբլետ երկրաշարժի դեպքում երկրորդ իրադարձությունից հետո առաջին իրադարձության շրջանում հետցնցումների թիվը կրճատվում է վեց անգամ, ինչը վկայում է խզվածքային համակարգի հարակից սեզմենտների հաջորդական ակտիվացման դեպքում հետցնցումային գործընթացի տարածա-ժամանակային զարգացման կարդինալ վերափոխման հանգամանքին: Առաջին անգամ հաստատվել է դուբլետ և եզակի սեյսմիկ իրադարձությունների հետցնցումային գործընթացների տարածա-ժամանակային զարգացման երկրադինամիկական սկզբունքային տարբերությունը. 2023 թ. փետրվարի 20-ի երկրաշարժի ($M_w = 6,3$) հետցնցումները ձևավորում են շրջանաձև (օղակաձև) տարածական կառուցվածք, որը սկզբունքորեն տարբերվում է 2023 թ. փետրվարի 6-ի դուբլետ երկրաշարժերի հետցնցումների գծային մագիստրալային պատկերից, ինչը վկայում է կոլիզիոն տեկտոնական պայմաններում դուբլետ և եզակի սեյսմիկ իրադարձությունների խզվածքաձևավորման ֆիզիկական մեխանիզմների տարբերակման մասին:

Հաստատվել են նաև Տավրոս-Կովկասի տարածաշրջանի սեյսմիկության բնորոշ տարածական օրինաչափությունները:

Երրորդ գլուխը նվիրված է Արաբական և Եվրասիական սալերի բախման գոտում խորքային կառուցվածքին, ժամանակակից երկրադինամիկային և Հայաստանի Հանրապետության տարածքի և հարակից շրջանների երկրաշարժերի ֆոկալ մեխանիզմներին: Խորքային կառուցվածքի ուսումնասիրման տեսանկյունից իրականացվել է 2D մակերևույթա-ալիքային տոմոգրաֆիա, օգտագործելով Ռելեյի և Լյավի ալիքների դիսպերսիոն կորերի ինվերսիայի մեթոդաբանությունը՝ 5–80 վրկ պարբերությունների համար ընդգրկելով մինչև ≈ 200 կմ խորություն: Օգտագործվել են 1999–2018 թթ. դիտարկման ժամանակահատվածում 1500 և ավել սեյսմիկ իրադարձությունների ($M \geq 3,5$) գործիքային գրանցումներ: Խորությունների երեք մակարդակների համար (≈ 30 կմ, 100–110 կմ, 180–200 կմ) կառուցվել են արագությունների բաշխման կորերը, որոնք հիմք են հանդիսացել բացահայտել տարրաբնույթ անոմալիաների հիմնական օրինաչափություններ և բնութագրական առանձնահատկություններ: Արդյունքում նույնականացվել են 15 վերին-կեղևային «տաք» գոտիներ: Բացահայտվել են արագությունների դաշտի ցածր արժեքներ 100–110 կմ խորություններում, որոնք մեկնաբանվել են, որպես մանթիայի նյութի ենթակեղևային ներդրման (underplating) գոտիներ լիթոսֆերա–ասթենոսֆերա սահմանի ոչ շատ խորը տեղադրմամբ: Խորությունների 180–200 կմ տիրույթում բացահայտվել են ցածր արագությունների դաշտի անոմալիաներ, որոնք վկայում են լիթոսֆերայի շատ փոքր հզորության կամ դրա տեղային բացակայության մասին: Բացի դրանից բացահայտվել է ուղղահայաց ուղղությամբ ձգված արագությունների դաշտի ցածր արժեքների առկայությունը Արագած հրաբխի հյուսիս-արևմտյան լանջի տակ՝ 7–27 կմ խորությունների միջակայքում: Հաստատվել է, որ Հյուսիս-Հայկական բլրկը ծածկված է արագությունների բարձր անոմալիաներով, ինչը ամենայն հավանականությամբ վկայում է բլրկի տակ կոշտ լիթոսֆերային կառուցվածքի առկայության մասին (ենթաբաժին 3.1): Ենթաբաժին 3.2-ում մանրամասն նկարագրվել են ժամանակակից GNSS դիտարկումների տվյալներով 2023 թ. փետրվարի 6-ի Թուրքիայի երկրաշարժի ազդեցությունը Կովկասի տարածաշրջանի երկրակեղևի կինեմատիկական ռեժիմի համատեքստում: Մասնավորապես, շարունակական GNSS դիտարկումների տվյալների հիման վրա բացահայտվել են, որ 2023 թ. փետրվարի 6-ի Թուրքիայի երկրաշարժերը առաջացրել են զգալի կոսեյսմիկ փոփոխություններ Կովկասյան տարածաշրջանի երկրակեղևի կինեմատիկական ռեժիմում: Երրորդ գլխի վերջին ենթաբաժնում 3.3 հետազոտվել են Հայաստանի Հանրապետության և հարակից շրջանների երկրաշարժերի օջախների մեխանիզմները, ինչպես նաև դրանց կապը տեկտոնական կառուցվածքի հետ: Մասնավորապես, 2002–2022 թթ. դիտարկումների ժամանակահատվածի համար մագնիտուդների $M \geq 3,5$ տիրույթում հաշվարկվել է 371 երկրաշարժի օջախների մեխանիզմներ, որի արդյունքում իրականացվել է Հայաստանի Հանրապետության տարածքի սեյսմիկության և

տեկտոնական կառուցվածքի համեմատական վերլուծություն: Բացահայտվել է, որ տեկտոնական շարժումների (խորքային բեկվածքների) կինեմատիկական բազմազանությունը, որը տարածականորեն համահունչ է տարածաշրջանի տարբեր հիերարխիկ ակտիվ բեկվածքային համակարգերին:

Չորրորդ գլուխը նվիրված է լոկալ ինժեներա-երկրաբանական պայմաններին և դրանց ազդեցությունը սեյսմիկ վտանգի (ազդեցություններ) քանակական պարամետրերի հիմնախնդրին: Առաջին անգամ Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համար կառուցվել է Vs30 թվային քարտեզը, որի համար հիմք են հանդիսացել թվային ռեյլեֆի, լիթալոգիայի և երկրաբանության համալիր տվյալները: Բացի դրանից դիտարկվել է որպես առանձնահատուկ ինժեներաերկրաբանական պայմանների, մասնավորապես գոգավորությունների էֆեկտը սեյսմակայուն շինարարության համատեքստում, ինչպես նաև առաջարկվել է սինթետիկ աքսելերոգրամների հաշվարկման նոր մեթոդաբանություն: Բնապայման 250 գործիքային չափումների հիման վրա առաջին անգամ Հայաստանի Հանրապետության տարածքի հրաբխային շրջանների համար բացահայտվել են տեղագրական գրադիենտի և Vs30 պարամետրի միջև հակառակ կոռելիացիոն կապ - հիմնարար օրինաչափություն, որը հակասում է ոչ հրաբխային շրջանների դասական կախվածությանը (Wald & Allen, 2007), սակայն ստացված արդյունքները հաստատվել են անկախ գործիքային չափումներով, որոնք իրականացվել էին Հայնան կղզու հրաբխային տարածքներում (Չինաստան) (ենթաբաժին 4.1): Առաջին անգամ Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համար կառուցվել է Vs30 ռեզոնալ քարտեզը ժամանակակից երկրափճակագրական կոկրիգինգի (Slope-based CoKriging, SCK) մեթոդով՝ հրաբխային և ոչ հրաբխային տիրույթների առանձին մոդելավորմամբ: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս Vs30-ի բարձր 450–900 մ/վրկ արժեքներ: Հետազոտության արդյունքները ցույց են տալիս գլոբալ մոդելների մեթոդական (մասնավորապես՝ USGS ShakeMap) և ստանդարտ ինժեներա-երկրաբանական դասակարգումների (NEHRP, Eurocode 8) ոչ կիրառելիությունը Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համար (ենթաբաժին 4.1): Ենթաբաժին 4.2-ում, օգտագործելով սեյսմաերկրադինամիկական ցանցի ալիքային պատկերները, բացահայտվել են, որ գոգավորությունները էապես փոխում են սեյսմիկ ալիքների ամպլիտուդա-հաճախականային բնութագրերը: Ըստ համեմատական վերլուծության բացահայտվել է, որ արմատական և ոչ արմատական ապարների գործիքային գրանցումներում առաջ են գալիս աստիճանաձև մարման հստակ արտահայտված ալիքային փնջեր, ինչը վկայում է ելակետային սեյսմիկ ազդանշանի սկզբունքային ֆիզիկա-մեխանիկական բնույթի վերափոխման մասին և փաստում է Շիրակի գոգավորության ազդեցությունը շենքերի ու կառուցվածքների տատանումների դինամիկ բնութագրերի, համապատասխանաբար վնասվածության աստիճանի վրա, հատկապես Սպիտակի 1988 թ. դեկտեմբերի 7-ի կործանարար երկրաշարժի ժամանակ: Ենթաբաժին 4.3-ում, օգտագործելով 1988 թ. դեկտեմբերի 7-ի

Ապիտակի երկրաշարժի ուժեղ շարժումների միակ գործիքային գրանցման և թույլ սեյսմիկ իրադարձությունների ($M_w \geq 3,5$) տարածաշրջանային շտեմարանի տվյալները, դիտարկվել է սինթետիկ արքսելերոգրամների կառուցման մեթոդաբանություն, որը համապատասխանեցված է նորմատիվային հակազդեցության սպեկտրներին և Հայաստանի Հանրապետության տարածքի ինժեներատեխնիկական պայմաններին: Մշակվել է մասնագիտացված ծրագրային ապահովածություն, որն ապահովում է տրված նորմատիվային սպեկտրով կորերի հետ համաձայնեցված արքսելերոգրամների ավտոմատացված գեներացիան: Բացի դրանից, ենթաբաժին 4.3-ում իրականացվել են գրունտների առավելագույն արագացումների (PGA) և կոմպլաստիվ բացարձակ արագության (Cumulative Absolute Velocity, CAV) պարամետրով կառուցված դինամիկության $\beta(T, n)$ կորերի համեմատական վերլուծություն, որի արդյունքում բացահայտվել են դրանց սկզբունքային տարբերությունները:

Այսպիսով, սույն գիտական զեկուցման շրջանակներում իրականացվել է Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համար արդիական սեյսմաբանության ուղիղ և հակադարձ խնդիրների փոխկապակցված համախմբի համալիր համակարգային լուծումը՝ գործիքա-մեթոդական բազայի և տվյալների առաջնային մշակման ալգորիթմների հիմնավորմամբ (Գլուխ 1), սեյսմավտանգ գոտիների ճանաչման, օջախի մեխանիզմների պարամետրերի վերականգնման, դուբետ բնույթ ունեցող երկրաշարժերի նույնականացման և մեքենայական ուսուցման մեթոդներով հետցնցումային գործընթացների երկույթաբանական վերլուծության հակադարձ խնդիրների լուծման միջոցով (Գլուխ 2), ինչպես նաև տոմոգրաֆիկ ինվերսիայի մեթոդներով լիթոսֆերայի խորությունից ունեցած արագության դաշտի կառուցվածքի վերականգնման, GNSS դիտարկումների մեթոդներով ժամանակակից երկրադինամիկայի ուսումնասիրման և երկրաշարժերի օջախի մեխանիզմների հաշվարկման հակադարձ խնդիրների միջոցով (Գլուխ 3), մինչև ինժեներական սեյսմաբանության ուղիղ խնդիրների լուծումը՝ Vs30 ռեզիոնալ քարտեզի կառուցումը, զոգավորության էֆեկտների քանակական բնութագրումն ու սինթետիկ արքսելերոգրամների մեթոդաբանության մշակումը (Գլուխ 4):

Ստացված արդյունքների կիրառական նշանակությունը

Երկրաշարժի մշտադիտարկում և մոդելավորում - ստեղծվել և գործածության մեջ է դրվել Հայաստանի Հանրապետության տարածքում սեյսմաերկրադինամիկական համալիր մշտադիտարկման գործիքա-ծրագրային աշխարհատեղեկատվական ենթակառուցվածք, որը ձևավորում է միջազգային չափագիտական դասի սեյսմաբանական դիտարկումների համակարգ: Վերջինս հնարավորություն է տալիս գրանցել ներկայացուցչական մագնիտուդի ($M_c \approx 1,5$) երկրաշարժեր, որն ապահովում է ցանցի ձևաչափի օպտիմալացման գիտական հիմնավորումն ու տարածաշրջանի գրեթե բոլոր սեյսմակտիվ գոտիների համար ելակետային տվյալների համասեռությունը:

Սեյսմիկ միկրոշրջանացում

Նոր մեթոդով կառուցված Vs30 ռեգիոնալ թվային քարտեզը անմիջականորեն կիրառելի է Հայաստանի Հանրապետության առանձին տարածքների միկրոշրջանացման աշխատանքների, նորմատիվ հակազդեցության սպեկտրների մշակման և այլ ինժեներա-սեյսմաբանական խնդիրների լուծման ժամանակ:

Սեյսմիկ վտանգի հավանականային գնահատում (PSHA)

Կառուցված Vs30 քարտեզը կիրառելի է գրունտների տատանումների պարամետրերի կանխատեսման հավասարումների (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) տարածաշրջանային չափաբերման և Հայաստանի Հանրապետության և հարակից շրջանների սեյսմիկ վտանգի հավանականային գնահատումների (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA) ճշգրտման և նոր քարտեզի մշակման համար:

Ուժեղ սեյսմիկ իրադարձությունների կանխատեսում

Բացահայտված երևույթաբանական օրինաչափությունները կապված դուբլետ երկրաշարժերի, սեյսմիկության տարածա-ժամանակային միգրացիայի և երկրաշարժերի օջախների մեխանիզմների հետ ձևավորում են կոլիզիոն տեկտոնական պայմաններում ուժեղ սեյսմիկ իրադարձությունների երկարաժամկետ, միջնաժամկետ և կարճաժամկետ նախանշանների կանխատեսման մոդելների զարգացման ֆիզիկական հիմքը:

Սեյսմակայուն շինարարություն

Մշակված սինթետիկ արբելերոգրամների կառուցման մեթոդաբանությունը և ծրագրային ապահովածությունը կիրառելի են շենքերի և կառուցվածքների սեյսմիկ ազդեցությունների վերլուծության ժամանակ և Հայաստանի Հանրապետության սեյսմակայուն շինարարության նախագծման նորմատիվային բազայի ճշգրտման ու թարմացման համար:

Ազգային նորմատիվային հիմքի վերանայում

Vs30 գլոբալ մոդելների և NEHRP, Eurocode 8 ստանդարտ ինժեներա-երկրաբանական դասակարգումների քանակական գնահատականների սկզբունքային տարբերությունները Հայաստանի Հանրապետության տարածաշրջանային պայմանների համար, գիտականորեն հիմնավորում են գործող սեյսմակայուն շինարարության նախագծման նորմերի և Հանրապետության սեյսմիկ վտանգի գնահատման, սեյսմիկ միկրոշրջանացման պրակտիկայի վերանայման անհրաժեշտությունը:

Երկրադինամիկական ռիսկերի գնահատում

Սեյսմատունոգրաֆիկ հետազոտությունների արդյունքները – արագությունների դաշտի անոմալ տարածական բաշխումը, երկրակեղևի և վերին մանթայի ջերմային ռեժիմը, սեյսմաձին գոտիների ճշգրտված երկրաչափությունը - կիրառելի են Հայաստանի Հանրապետության տարածքի և Արաբական ու

Եվրասիական սալերի բախման գոտու սահմանակից շրջանների երկրադինամիկական ռիսկերի համալիր գնահատման համար:

Միջազգային կիրառելիություն

Մշակված մեթոդական համալիրը՝ կատալոգների դեկլաստերավորման ալգորիթմները, մեքենայական ուսուցման մեթոդներով սեյսմիկ իրադարձությունների կլաստերավորումը, սեյսմավտանգ գոտիների ճանաչումը, տոմոգրաֆիկ ինվերսիան, գոգավորության էֆեկտների քանակական գնահատումը, հրաբխային շրջանների Vs30 քարտեզների կառուցումն ու սինթետիկ արտելերոգրամների գեներացիան՝ կառուցվածքային տեսանկյունից հարմարեցման հատկություն ունեն և կարող են տարածվել համեմատելի սեյսմատեկտոնական պայմանների, լեռնագրական շրջանների ու հրաբխային տարածքների վրա:

Հետագա հետազոտությունների հեռանկարները

Սույն գիտական զեկուցումում ստացված արդյունքները ձևավորում են գիտամեթոդական հիմք հետագա հիմնարար և կիրառական հետազոտությունների համար հետևյալ ուղղություններով՝

- սեյսմաերկրադինամիկական դիտարկումների ցանցի հետագա զարգացում դրա խտության ընդլայնմամբ և միջազգային կոնսորցիումներում (FDSN, ORFEUS, GEOFON) ինտեգրմամբ;
- Երկրի մասին գիտությունների ոլորտում մեծ տվյալների (Big data in Earth science) հետ աշխատանք, ժամանակակից շտեմարանների, բյուլետենների կազմում;
- 2D-ից 3D մակերևույթա-ալիքային տոմոգրաֆիայի անցում ներգրավելով սեյսմաբանական տվյալների երկարատև ժամանակային շարք;
- տարածաշրջանային բեկվածքների կառուցվածքի համակարգային հետազոտում շարունակական GNSS դիտարկումների երկարատև ժամանակային շարքերի հիման վրա;
- բազմապարամետրական նախանշանային մշտադիտարկման մեթոդաբանության զարգացում սեյսմաբանական, GNSS, ուժեղ շարժումների և այլ երկրաֆիզիկական տվյալների համատեղ վերլուծության հիման վրա;
- Հայաստանի Հանրապետության տարածքի առանձնահատուկ պայմաններին հարմարեցված տարածաշրջանային GMPE-ների (Ground Motion Prediction Equations) կառուցում;
- համանման տարածքներում սեյսմիկության դուբլետ ռեժիմի համակարգային վերլուծություն՝ բացահայտված երևույթաբանական օրինաչափությունների ունիվերսալ բնույթի հաստատման համար;
- ստացված արդյունքների ինտեգրում Ալյա-հիմալայան գոտու մայրցամաքային բախման գոտիներում գործընթացների գլոբալ երկրադինամիկական համատեքստին:

Ստացված արդյունքների համախումբը ձևավորում է Արաբական և Եվրասիական մայրցամաքային բախման գոտու տարածաշրջանային սեյսմաբանության և երկրադինամիկայի գիտական ուղղության զարգացման նոր

մեթոդական և էմպիրիկ փուլ, ապահովելով Հայաստանի Հանրապետության տարածքի կտրուկ դրվագային դիտարկումներից, միասնական գործիքակազմի հենքի վրա, անցումը համակարգային սեյսմաերկրադինամիկական մշտադիտարկման, նոր ալգորիթմների կիրառման և բազմապարամետրական տվյալների ֆիզիկա-մաթեմատիկական մեկնաբանման, որը համապատասխանում է Երկրի ֆիզիկայի բնագավառում հետազոտությունների ժամանակակից զարգացման համաշխարհային մակարդակին: Համախմբված, առաջարկված ձևակերպումներն ու լուծումները ձևավորում են Հայաստանի Հանրապետության տարածքի համակարգային սեյսմաերկրադինամիկական մշտադիտարկման ամբողջական գիտամեթոդական հիմք և ապահովում են հիմնարար գիտական պաշար Երկրի ֆիզիկայի, սեյսմիկ վտանգի գնահատման և սեյսմակայուն շինարարության բնագավառներում հետագա հետազոտությունների համար, որը համապատասխանում է հրապարակված գիտական աշխատանքների համախմբով, գիտական զեկուցումով պաշտպանվող դոկտորական ատենախոսության որակավորման մակարդակին և ունի էական նշանակություն երկրաֆիզիկայի համապատասխան ճյուղերի զարգացման ուղղություններում:

Jon Kostik Karapetyan
**SOLUTIONS TO FORWARD AND INVERSE SEISMOLOGICAL PROBLEMS RELEVANT
TO THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ARMENIA
(SUMMARY)**

The territory of the Republic of Armenia, occupying a key geodynamic position within the active continental collision zone of the Arabian and Eurasian lithospheric plates within the Alpine–Himalayan Belt - the planet's largest tectonically active superelement - represents a natural laboratory of fundamental significance for investigating the physico-geodynamic processes of continental collision. The near-meridional convergence of the Arabian Plate at a rate of approximately 30 mm/year produces a unique combination of fundamental geophysical phenomena - pronounced seismic activity, intense Plio–Quaternary volcanism, and complexly structured block tectonics characterized by a multi-level hierarchy of active fault systems - placing the territory of the Republic of Armenia among the regions of maximum seismic hazard on the planet. The historical record of the region encompasses catastrophic seismic events: the Garni earthquake of 1679 ($M \approx 7.0$), the Zangezur earthquake of 1931 ($M = 6.5$), the Caldiran earthquake of 1976 ($M = 7.3$), the tragic Spitak earthquake of 7 December 1988 ($M_w = 6.8$, $M_s = 7.0$), which claimed the lives of more than 25,000 people, and the catastrophic Kahramanmaraş earthquakes of 6 February 2023 ($M_w = 7.8$ and $M_w = 7.5$). The Spitak catastrophe revealed fundamental methodological deficiencies in the regional observational seismology of that period, which substantially constrained the development of reliable seismic hazard maps and national building codes, and it definitively determined the necessity of deploying a modern, comprehensive, new-generation seismo-geodynamic observational network.

The present scientific report, devoted to the comprehensive solution of a coordinated set of forward and inverse problems of seismology for the territory of the Republic of Armenia, formulates and substantiates new scientific propositions whose totality is qualified as the solution of a major scientific problem in the fields of Earth physics, observational seismology, and the geodynamics of the Arabian–Eurasian continental collision zone, possessing substantial significance for the advancement of the corresponding branches of geophysical knowledge. The obtained results establish a unified scientific–methodological foundation for the transition from fragmentary episodic observations to systematic seismo-geodynamic monitoring of the territory of the Republic of Armenia, conforming to the contemporary global standards of research in Earth physics.

1. Results in Instrumental and Methodological Provision (Chapter 1)

Within the framework of the foundational methodological task forming the instrumental and empirical basis for all subsequent investigations, a comprehensive new-

generation seismo-geodynamic observational network has been substantiated, deployed, and brought into operational service. The network integrates, within a unified instrumental configuration, ten stations of international metrological standard: broadband seismic stations equipped with long-period velocimeters (natural period 120 s), strong-motion accelerometers with extended dynamic range, and continuous geodynamic-class GNSS stations. On the basis of quantitative spectral-temporal analysis of background seismic fields at 20 sites in accordance with international metrological standards (PQLX; McNamara & Buland, 2004), the optimal locations for station deployment have been scientifically justified, ensuring the quantitative characterization of background seismic noise and the spatial localization of zones with minimal anthropogenic and natural disturbances (Subsection 1.1). Calculation and spatial mapping of the magnitude of completeness (M_c) of the seismic event catalog have been performed for the various geodynamic zones of the territory of the Republic of Armenia and adjacent areas; the established value of $M_c \approx 1.5$ defines the lower sensitivity threshold of the network and indicates that the network provides systematic registration of seismic events across the full magnitude range - from weak to strong - continuously updating the regional seismological catalog, and conforms to the requirements of contemporary international standards of observational seismology. The obtained results ensure the methodological correctness of the subsequent application of the statistical laws of seismicity (Gutenberg-Richter, Omori), b-value estimation, and declustering algorithms.

A comparative analysis of declustering algorithms applied to the seismological catalog of the Tauro-Caucasus region (Gardner & Knopoff, 1974; Uhrhammer, 1986; Grünthal, 1985; Reasenberga, 1985; Zaliapin & Ben-Zion, 2013) has established the statistical convergence of the Gardner & Knopoff, Grünthal, and Zaliapin & Ben-Zion algorithms despite their substantially differing theoretical foundations, ensuring reliable separation of dependent and independent seismic events. The refined declustering methodology constitutes an effective instrument for the identification of active fault structures and has enabled the discovery of the phenomenon of spatio-temporal seismicity migration as an indicator of the dynamic redistribution of tectonic stresses in collision domains (Subsection 1.2). For the first time for the Tauro-Caucasus region, a unified declustered seismological catalog has been constructed on the basis of the systemic integration of national and international seismological catalogs; for the first time, Voronoi diagrams have been applied for the evaluation of declustering quality, forming an independent empirical product of fundamental and applied significance placed in open access for the international scientific community [1].

Through the case study of seismic activation in the central segment of the Aegean volcanic arc, it has been demonstrated that broadband long-period stations enable the reliable discrimination between tectonic and volcano-tectonic earthquakes on the basis of the combined spectral-temporal waveform characteristics, oscillation

duration, and seismic moment tensor parameters. The volcano-tectonic nature of the anomalous process has been established and physically interpreted as the result of magma and fluid injection from the upper mantle into the magmatic reservoir of Kolumbo volcano, with subsequent diffusion-driven migration along the Santorini–Amorgos lineament system. A physico-geodynamic hypothesis has been formulated linking the injection process to limiting elastic stresses in the focal region of an incipient large tectonic earthquake. The developed methodology possesses structural adaptability and may be extended to regions of the Republic of Armenia exhibiting active volcanism (Mt. Aragats, the Geghama volcanic massif), which is especially relevant for the northern part of the territory of the Republic of Armenia, which accounts for more than 30% of the seismicity of the Caucasus region and where tectonic and volcano-tectonic seismogenic processes are manifested in direct spatial conjugation (Subsection 1.3).

2. Results in Inverse Problems of Seismology (Chapters 2 and 3)

Within the framework of the inverse problems of focal-process parameter recovery, machine-learning-based identification of seismic clusters, lithospheric velocity structure reconstruction, contemporary geodynamics analysis, and calculation of earthquake focal mechanisms, a fundamentally new body of scientific results has been obtained.

2.1. Clustering of Seismic Events and Recognition of Earthquake-Prone Zones (Subsection 2.1)

Through the application of the fundamental clustering algorithms K-means and DBSCAN, a systematic statistical analysis of the seismological catalog of the Tauro–Caucasus region has been performed. It has been established that the complementary application of these algorithms - wherein K-means provides correct classification of spherical clusters of fixed cardinality, while DBSCAN is effective for groupings of arbitrary geometric form and variable density - enables the establishment of scientifically grounded correlations between the statistical characteristics of seismicity and the geological–tectonic structures of the region.

Through the development of the classical EPA (Earthquake-Prone Areas; Gelfand, Keilis-Borok et al.) approach, novel methodologies for formalized recognition of earthquake-prone zones have been developed: the one-class classification scheme and the formalized FCAZ method (Formalized Clustering and Zoning), which provides dynamic adjustment of results in real time. The developed methodologies have been successfully validated on the seismological catalogs of the Caucasus region, the North and South American continents, Eurasia, and the subduction zones of the Pacific seismic belt.

2.2. The Doublet Nature of the Catastrophic Kahramanmaraş Earthquakes of 2023 (Subsection 2.2)

Within the framework of the comprehensive analysis of the catastrophic Kahramanmaraş earthquakes of 6 February 2023 in eastern Türkiye ($M_w = 7.8$ and $M_w = 7.5$), based on the analysis of focal mechanism parameters, the spatio-temporal distribution of hypocenters, and the aftershock processes, the doublet nature of these events has been established, characterized by the complex nonlinear structure of the principal rupture with four sub-foci. It has been demonstrated that these events are connected not only by spatio-temporal and energetic correlation but also by a common geological-tectonic nature, with the first event acting as a triggering mechanism for the subsequent earthquake of 20 February 2023 ($M_w = 6.3$). The constructed physico-geodynamic model of the focal zone elucidates the fundamental regularities of rupture formation under conditions of near-meridional indentation of the Arabian Plate into the orogenic structures of the Caucasus at a convergence rate of approximately 30 mm/year.

2.3. The Doublet Regime of Seismicity and the Mechanism of Tectonic Stress Relaxation (Subsection 2.3)

On the basis of an enhanced declustering methodology employing the ensemble Random Forest algorithm - which demonstrates statistically significant superiority over both classical deterministic approaches and alternative machine-learning models - it has been established for the first time that the doublet regime of seismicity in the Tauro-Caucasus region operates across all energy levels - manifesting not only in strong but also in relatively weak seismic events, occurring within a temporal interval of 15 minutes to one hour and characterized by a migratory process within the depth range of up to 20 km. This result extends the classical conception of doublet earthquakes as a rare phenomenon characteristic exclusively of strong events and reclassifies them as a universal regime of the seismic process in collisional tectonic settings.

For the first time, a fundamentally new physical mechanism of tectonic stress relaxation in focal zones has been identified: it has been established that following the second event of a doublet, the number of aftershocks in the region of the first event decreases by a factor of six, which testifies to the radical transformation of the spatio-temporal evolution of the aftershock process upon sequential activation of adjacent fault segments.

For the first time, a fundamental physico-geodynamic difference has been established in the spatio-temporal evolution of aftershock processes for doublet and single seismic events: the aftershocks of the single earthquake of 20 February 2023 ($M_w = 6.3$) form a circular (ring-like) spatial structure, fundamentally different from the linear principal-rupture pattern of the aftershocks of the doublet earthquakes of 6 February 2023, which testifies to the differentiation of the physical mechanisms of rupture formation for doublet and single seismic events in collisional tectonic settings. A

fundamental spatial regularity of seismicity in the Tauro–Caucasus region has been established [1].

2.4. The Deep Velocity Structure of the Lithosphere (Subsection 3.1)

By means of 2D surface-wave tomography (inversion of Rayleigh and Love wave dispersion curves in the period range of 5–80 s, with a depth coverage of up to ≈ 200 km), based on the data of approximately 1,500 seismic events in the magnitude range $M \geq 3.5$ registered by 20–49 broadband and short-period stations during the instrumental period 1999–2018, within the framework of a series of three sequential investigations (2022–2025), detailed velocity models of the Earth's crust and upper mantle in the Arabian–Eurasian collision zone have been constructed.

A stable three-tier structure of velocity anomalies has been revealed: in the upper crust (6–30 km), 15 upper-crustal hot zones have been identified, associated with near-surface processes of active deformation of volcanogenic and sedimentary complexes, sedimentary basins, volcanic massifs, and zones of neotectonic uplift; at depths of 100–110 km, low-velocity domains have been detected, interpreted as zones of underplating of mantle material with a shallow lithosphere–asthenosphere boundary (LAB); and at depths of 180–200 km, extremely low-velocity anomalies dominate, attesting to the anomalously thin lithosphere or its local absence, presumably as a consequence of lithospheric delamination processes.

The existence of a vertically extensive low-velocity anomaly beneath the northwestern flank of Mt. Aragats has been confirmed, traceable within the depth range of 7–27 km and interpreted as a magmatic conduit of crust–mantle origin. It has been established that the North–Armenian Block is overlain by a high-velocity anomaly for both Rayleigh and Love waves, attesting to the presence of a rigid lithospheric structure beneath this block.

2.5. Contemporary Geodynamics from GNSS Observations (Subsection 3.2)

On the basis of continuous GNSS observations, it has been established that the distant catastrophic Kahramanmaraş earthquakes of 6 February 2023 induce statistically significant coseismic alterations in the kinematic regime of the Earth's crust of the Caucasus region, demonstrating the integral character of the geodynamic response to large-scale rupture processes in conjugate tectonic provinces and broadening the conception of the long-range effects of strong earthquakes in collisional settings. With the accumulation of long-term observational time series on the established seismo-geodynamic network, a fundamental empirical basis is being formed, ensuring the independent verification of the identified effects and the integration of the obtained results into the global geodynamic context of investigations of continental collision processes.

2.6. Earthquake Focal Mechanisms and Comparative Analysis of Seismicity and Tectonics (Subsection 3.3)

On the basis of the calculation of focal mechanisms of 371 earthquakes in the magnitude range $M \geq 3.5$ for the instrumental period 2002–2022 by the P-wave first-arrival method, a systematic comparative analysis of seismicity and tectonics of the territory of the Republic of Armenia has been performed. A kinematic diversity of fault motions has been established (strike-slip, reverse, thrust, normal, and their combinations with a dominance of the strike-slip regime), spatially consistent with the system of active faults; the constructed maps of the spatial distribution of the principal-stress compression (P) and extension (T) axes demonstrate the predominance of compression in the NE–SW direction and extension in the NW–SE direction, physically consistent with the convergence of the Arabian Plate.

3. Results in Forward Problems of Seismology (Chapter 4)

Within the framework of the forward problems of engineering seismology - the quantitative characterization of local engineering–geological conditions and their influence on the parameters of seismic ground motion in the territory of the Republic of Armenia - the following fundamental results have been obtained.

3.1. The Topographic-Slope/Vs30 Correlation and the National-Scale Vs30 Map (Subsection 4.1)

On the basis of 250 in-situ instrumental Vs30 measurements, an inverse correlation between topographic slope and the Vs30 parameter has been established for the first time for volcanic regions - a fundamental regularity in contradiction with the classical relationship for non-volcanic regions (Wald & Allen, 2007), independently verified by instrumental measurements in the volcanic territories of Hainan Island (China). The identified phenomenon has been interpreted as a fundamental physico-geological characteristic of volcanogenic provinces, conditioned by the specifics of hypergene weathering and the lithological composition of volcano-sedimentary sequences. For the first time, a national-scale Vs30 map of the territory of the Republic of Armenia has been constructed by means of geostatistical co-kriging (Slope-based CoKriging, SCK) with separate modeling of volcanogenic and non-volcanogenic domains, demonstrating the predominance of high-velocity soils within the range of 450–900 m/s and quantitatively substantiating the methodological inadequacy of global models (in particular, USGS ShakeMap) and standard engineering–geological classifications (NEHRP, Eurocode 8) for the regional conditions of the Republic of Armenia (BSRA-20.04-2020).

3.2. Basin Effects: A Case Study of the Shirak Sedimentary Basin (Subsection 4.2)

Through the case study of the Shirak sedimentary basin, it has been experimentally established that sedimentary basins fundamentally modify the parameters of seismic wavefields: they alter the amplitude–frequency spectrum (resonance

amplification, focusing of seismic energy), coda spectral coefficients, oscillation duration, and the integral intensity of the registered seismograms. The comparative analysis of waveforms registered on bedrock and within basin conditions has revealed distinct wave trains with stepwise attenuation, the predominance of low-frequency spectral components, and a substantially greater oscillation duration in the sedimentary medium relative to bedrock, attesting to the fundamental physical–mechanical transformation of the original seismic signal under the influence of the local engineering–geological conditions of the Shirak basin.

3.3. Synthetic Accelerograms and Code Response Spectra (Subsection 4.3)

A methodology has been developed for the construction of synthetic accelerograms compatible with code response spectra and adapted to the regional conditions of the Republic of Armenia, on the basis of the joint processing of the unique strong-motion instrumental record of the Spitak earthquake of 7 December 1988 and a regional catalog of weak seismic events ($M_w \geq 3.5$). The methodology is realized as an iterative procedure of spectral matching with preservation of a physically realistic phase spectrum, ensuring the correct reproduction of the temporal structure of design ground motions. Specialized software has been developed, providing automated generation of accelerograms compatible with prescribed normative spectral curves.

The comparative analysis of dynamic-coefficient curves $\beta(T, n)$, constructed on the basis of peak accelerations and the Cumulative Absolute Velocity (CAV) parameter, has revealed their fundamental physico-methodological differences, substantiating the necessity of revising the traditional approaches to the codification of seismic actions and developing a methodology of engineering interpretation of response spectra incorporating integral parameters of the oscillation process. The developed methodology is structurally adaptable to the international normative systems (Eurocode 8, ASCE 7, GOST 14.13330, BSRA-20.04-2020).

4. Overall Scientific Outcome

Within the framework of the present scientific report, a comprehensive systemic solution of the interconnected aggregate of forward and inverse problems of seismology has been realized for the territory of the Republic of Armenia: from the substantiation of the instrumental–methodological basis and the algorithms of primary data processing (Chapter 1), through the solution of inverse problems of formalized recognition of earthquake-prone zones, the recovery of focal-process parameters, the identification of doublet earthquakes, and the phenomenological analysis of aftershock processes by machine-learning methods (Chapter 2), as well as inverse problems of recovering the deep velocity structure of the lithosphere by tomographic inversion methods, the investigation of contemporary geodynamics by GNSS observation methods, and the calculation of earthquake focal mechanisms (Chapter 3), to the solution of forward problems of engineering seismology - the construction of a national-scale Vs30

map, the quantitative characterization of basin effects, and the development of the synthetic-accelerogram methodology (Chapter 4).

The aggregate of the obtained results forms a new methodological and empirical stage in the development of regional seismology and the geodynamics of the Arabian–Eurasian continental collision zone, ensuring the transition from fragmentary episodic observations to systematic seismo-geodynamic monitoring of the territory of the Republic of Armenia on a unified instrumental basis with the application of formalized processing algorithms and the physico-mathematical interpretation of multi-parameter data, conforming to the contemporary global standards of research in Earth physics.

5. Applied Significance of the Obtained Results

5.1. Seismo-geodynamic monitoring and instrumental infrastructure

A hardware–software geoinformation infrastructure for the continuous monitoring of seismic and geophysical fields in the territory of the Republic of Armenia has been established and brought into service, constituting a national system of seismological observations of international metrological class. The constructed magnitude-of-completeness map ($M_c \approx 1.5$) provides scientific justification for the optimization of the observational network configuration and homogeneity of the input data for all seismically active zones of the region.

5.2. Seismic microzonation

The obtained quantitative estimates of basin effects and the constructed national-scale V_s30 map are directly applicable to engineering seismological microzonation of the urbanized territories of the Republic of Armenia situated in sedimentary basins of comparable tectonic structure.

5.3. Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA)

The V_s30 map is critically important for the regional calibration of Ground Motion Prediction Equations (GMPE) and the refinement of probabilistic seismic hazard estimates for the territory of the Republic of Armenia and adjacent regions.

5.4. Forecasting strong seismic events

The established phenomenological regularities of doublet earthquakes, spatio-temporal seismicity migration, and earthquake focal mechanisms constitute the physical foundation for the development of medium-term, long-term, and short-term forecasting models for strong seismic events in collisional tectonic settings.

5.5. Earthquake-resistant design and construction

The developed methodology for synthetic-accelerogram construction and the developed specialized software are applicable to the assessment of the dynamic response of buildings and structures under design seismic actions and to the refinement of the normative basis of earthquake-resistant design in the Republic of Armenia.

5.6. Revision of the national normative framework

The established quantitative inadequacy of global Vs30 models and standard engineering–geological classifications (NEHRP, Eurocode 8) for the regional conditions of the Republic of Armenia, together with the identified fundamental differences between dynamic-coefficient curves based on peak accelerations and on CAV, constitute the scientific basis for the revision of the existing seismic building codes and the practice of seismic microzonation of the Republic of Armenia.

5.7. Geodynamic risk assessment

The results of seismotomographic investigations - the spatial distribution of velocity anomalies, the thermal regime of the crust and upper mantle, and the refined geometry of seismogenic zones - are applicable to the comprehensive assessment of geodynamic risks in the territory of the Republic of Armenia and the adjacent regions of the Arabian–Eurasian collision zone.

5.8. International applicability

The developed methodological framework - algorithms of catalog declustering, machine-learning-based clustering of seismic events, formalized recognition of earthquake-prone zones (FCAZ), tomographic inversion, quantitative assessment of basin effects, construction of Vs30 maps for volcanic regions, and generation of synthetic accelerograms - possesses structural adaptability and may be extended to other orogenic regions and volcanic provinces within the Alpine–Himalayan Belt and comparable tectonic settings worldwide.

6. Prospects for Further Research

The results obtained in the present scientific report constitute a scientific–methodological foundation for further fundamental and applied investigations along the following directions:

- further development of the seismo-geodynamic observational network with expansion of its density and integration into the international consortia (FDSN, ORFEUS, GEOFON);
- the formation, on the basis of the seismogeodynamic observational network of the Republic of Armenia, of qualitatively new arrays of big data (Big Data in Earth Science) in the Earth sciences, including systematically updated seismological catalogues and bulletins, providing the methodological foundation for the implementation of machine-learning algorithms and a new generation of fundamental and applied research;
- transition from 2D to 3D surface-wave tomography of the lithosphere of the Republic of Armenia upon the accumulation of long-term broadband seismological data series;
- systematic investigation of the regional fault structure on the basis of continuous GNSS observations of long-term time series;

- development of the methodology of multi-parameter precursor-monitoring on the basis of the joint analysis of seismological, GNSS, and other geophysical data;
- construction of regional Ground Motion Prediction Equations (GMPE) adapted to the specific conditions of the territory of the Republic of Armenia;
- systematic analysis of the doublet seismicity regime in other orogenic regions of the Alpine–Himalayan Belt for the verification of the universal character of the identified phenomenological regularities;
- integration of the obtained results into the global geodynamic context of investigations of processes in the continental collision zones of the Alpine–Himalayan Belt.

In aggregate, the proposed problem formulations and solutions constitute an integral scientific–methodological foundation for the systematic seismo-geodynamic monitoring of the territory of the Republic of Armenia and provide a fundamental scientific reserve for further research in the fields of Earth physics, seismic hazard assessment, and earthquake-resistant construction, corresponding to the qualifying level of a doctoral dissertation defended in the form of a scientific report on the basis of the published scientific works, and possessing substantial significance for the development of the corresponding branches of geophysical knowledge.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1974. Vol. 64, № 5. P. 1363–1367.
2. Uhrhammer R.A. Characteristics of northern and central California seismicity // *Earthquake Notes*. 1986. Vol. 57, № 1. P. 21–37.
3. Grünthal G. The up-dated earthquake catalogue for the German Democratic Republic and adjacent areas // *Proc. 3rd Int. Symp. on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk*. Liblice, 1985. P. 19–25.
4. Reasenberг P. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982 // *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90, № B7. P. 5479–5495. DOI: 10.1029/JB090iB07p05479.
5. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. Vol. 118, № 6. P. 2847–2864. DOI: 10.1002/jgrb.50179.
6. Eroglu Azak T., Kalafat D., Şeşetyan K., Demircioğlu M.B. Effects of seismic declustering on seismic hazard assessment: a sensitivity study using the Turkish earthquake catalogue // *Bull. Earthq. Eng.* 2018. Vol. 16, № 8. P. 3339–3366. DOI: 10.1007/s10518-017-0174-y.
7. MacQueen J.B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // *Proc. 5th Berkeley Symp. on Mathematical Statistics and Probability*. Berkeley: Univ. of California Press, 1967. Vol. 1. P. 281–297.
8. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // *Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. Portland: AAAI Press, 1996. P. 226–231.
9. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Книппер А.А., Прозоров А.Г., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие районы) // *Вычислительная сейсмология*. М.: Наука, 1976. Вып. 9. С. 3–91.
10. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient noise levels in the continental United States // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. Vol. 94, № 4. P. 1517–1527. DOI: 10.1785/012003001.
11. Wiemer S., Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2000. Vol. 90, № 4. P. 859–869. DOI: 10.1785/0119990114.
12. Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis (CORSSA)*. 2012. 45 p. DOI: 10.5078/corssa-00180805.

13. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography // *Solid Earth*. 2012. Vol. 3, № 2. P. 327–337. DOI: 10.5194/se-3-327-2012.
14. Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I., El Khrepy S., Al-Arifi N. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography // *J. Asian Earth Sci.* 2016. Vol. 119. P. 87–99. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.010.
15. Wald D.J., Allen T.I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2007. Vol. 97, № 5. P. 1379–1395. DOI: 10.1785/0120060267.
16. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
17. Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P. Public release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // *Seismol. Res. Lett.* 2013. Vol. 84, № 5. P. 810–815. DOI: 10.1785/0220130034.
18. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004. 229 p.
19. ASCE/SEI 7-22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston: American Society of Civil Engineers, 2022.
20. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минстрой России, 2018. 122 с.
21. BSRA-20.04-2020. Earthquake Engineering. Design Standards, Republic of Armenia. Yerevan, 2020. 93 p.
22. NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-2082). Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2020.
23. Worden C.B., Wald D.J. ShakeMap Manual Online: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide. U.S. Geological Survey, 2016. DOI: 10.5066/F7D21VPQ.
24. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1944. Vol. 34, № 4. P. 185–188.
25. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. Vol. 30. P. 521–605.
26. Voronoi G. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques // *J. reine angew. Math.* 1908. Bd. 133. S. 97–178.

