

ОТЗЫВ

официального оппонента

на научный доклад **Карапетяна Джона Костиковича** «Актуальные для территории Республики Армения решения прямых и обратных задач сейсмологии», представленный на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 24.01.08 - «Геофизика, методы поиска полезных ископаемых».

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Зона континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит, в пределах которой расположена территория Республики Армения, представляет собой природную лабораторию для изучения фундаментальных проблем физики Земли - реологии литосферы в условиях горизонтального сокращения, динамики разрывообразования при сложно-напряжённом тектоническом поле, нелинейного взаимодействия магматических и сейсмогенных процессов, а также механизмов релаксации тектонических напряжений в дискретной геофизической среде. Историческая последовательность катастрофических событий - Гарнийское 1679 г. ($M \approx 7,0$), Зангезурское 1931 г. ($M = 6,9$), Чалдыранское 1976 г. ($M = 7,3$), Спитакское 7 декабря 1988 г. ($M_w = 6,8$, $M_s = 7,0$) и Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $7,5$) - формирует уникальный эмпирический ряд для постановки фундаментальных задач сейсмологии и геодинамики в коллизионных тектонических обстановках.

Спитакская катастрофа выявила принципиальную невозможность решения корректно поставленных обратных задач сейсмологии при отсутствии метрологически однородной инструментальной базы и определила фундаментальное методологическое противоречие региональной геофизики: между необходимостью количественного описания процессов в трёхмерной

неоднородной среде и фрагментарностью исходных данных. В этом контексте тема исследования Дж. К. Карапетяна, направленная на системное решение совокупности прямых и обратных задач сейсмологии на основе принципиально новой комплексной сейсмогеодинамической наблюдательной сети, носит фундаментальный характер и приоритетна для физики Земли в её региональном измерении.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений и выводов работы обеспечивается математической корректностью постановки решаемых задач, метрологической однородностью эмпирической базы, применением апробированных физико-математических методов и независимой верификацией результатов.

Метрологическая корректность инструментальной базы. Введённая в эксплуатацию комплексная сейсмогеодинамическая наблюдательная сеть нового поколения объединяет 10 станций международного метрологического стандарта - широкополосные сейсмические станции с длиннопериодными велосиметрами (собственный период $T_0 = 120$ с), акселерометры сильных движений с расширенным динамическим диапазоном и непрерывные GNSS-станции геодинамического класса. Выбор мест развёртывания обоснован количественным спектрально-временным анализом фоновых сейсмических полей в 20 пунктах в соответствии со стандартом PQLX (McNamara & Buland, 2004), что обеспечивает спектральную идентификацию станций по уровню инструментальных шумов в диапазоне частот 0,01–10 Гц.

Представительность эмпирической базы. Обработка ~1 500 сейсмических событий магнитудного диапазона $M \geq 3,5$ за инструментальный период 1999–2018 гг. для томографической инверсии; расчёт фокальных механизмов 371 землетрясения за 2002–2022 гг.; выполнение 250 натурных инструментальных измерений Vs_{30} ; построение унифицированного сейсмологического каталога Тавро-Кавказского региона объёмом 25 778

событий с $M \geq 2,5$ за период 1961–2023 гг. - удовлетворяет требованиям статистической достоверности и репрезентативности при оценке параметров законов Гутенберга–Рихтера и Омори.

Математическая строгость применяемых методов. Сравнительный анализ пяти алгоритмов декластеризации существенно различной теоретической природы - детерминистических оконных (Gardner & Knopoff, 1974; Uhrhammer, 1986; Grünthal, 1985), стохастического алгоритма связывания эпицентров (Reasenberг, 1985) и алгоритма статистической классификации событий по метрике пространственно-временной близости в смысле теории ближайших соседей (Zaliapin & Ben-Zion, 2013), - обеспечивает методологический контроль через сходимость решений алгоритмов различной теоретической основы. В томографических исследованиях применён классический метод 2D-линейной инверсии дисперсионных кривых поверхностных волн Рэлея и Лява (метод Ditmar–Yanovskaya) с регуляризацией Тихонова, что обеспечивает корректную постановку обратной задачи восстановления скоростной структуры в классе функций ограниченной вариации. Кластерный анализ выполнен с использованием алгоритмов K-means (минимизация внутрикластерной дисперсии в L^2 -метрике) и DBSCAN (плотностная кластеризация на основе ϵ -окрестностей) с верификацией числа кластеров по индексу Krzanowski–Lai.

Независимая верификация результатов. Обратная корреляционная связь топографического градиента и параметра $Vs30$ для вулканических областей подтверждена независимыми инструментальными измерениями на вулканических территориях острова Хайнань (Китай). Методологии FCAZ и распознавания сейсмоопасных зон апробированы на материале сейсмологических каталогов континентов Северной и Южной Америки, Евразии и субдукционных зон Тихоокеанского сейсмического пояса, что обеспечивает универсальную верификацию методологий в широком диапазоне геодинамических обстановок.

Публикационная активность. Основные результаты опубликованы в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science (квартили Q1–Q4), включая 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». Апробация проведена на Генеральных ассамблеях Азиатской сейсмологической комиссии (ASC), Европейского союза наук о Земле (EGU) и Американского геофизического союза (AGU).

Совокупность приведённых факторов обеспечивает высокую степень обоснованности научных положений и позволяет квалифицировать представленную работу как методологически зрелое научно-квалификационное исследование в области физики Земли.

3. Научная новизна результатов исследования

Научная новизна работы носит принципиальный физико-математический характер и охватывает три направления, каждое из которых формирует самостоятельный научный результат фундаментальной значимости.

Глава 1. Инструментально-методологическое обеспечение сейсмологических наблюдений.

Впервые для территории Республики Армения обоснована, развёрнута и введена в эксплуатацию (2024 г.) комплексная сейсмогеодинамическая наблюдательная сеть нового поколения международного метрологического стандарта. Принципиально новым техническим элементом является применение спутникового канала связи для непрерывной передачи данных большой объёмности (Big Data) - впервые в инструментальной сейсмологии Республики Армения, что обеспечивает интегральную регистрацию волновых полей в широком частотно-динамическом диапазоне. Выполнен расчёт

пространственного распределения магнитуды представительности каталога; установленное значение $M_c \approx 1,5$ для различных геодинамических зон территории обеспечивает методологическую корректность последующего применения статистических законов сейсмичности - Гутенберга-Рихтера и Омори. Построен унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона (25 778 событий с $M \geq 2,5$ за 1961–2023 гг.; параметры закона Гутенберга-Рихтера: $b = 1,01$, $a = 8,3$; $M_c = 4,3$), размещённый в открытом доступе и являющийся самостоятельным эмпирическим продуктом фундаментальной значимости. Впервые установлена статистическая сходимость алгоритмов декластеризации Gardner & Knopoff, Grünthal и Zaliapin & Ben-Zion при существенно различающихся теоретических основах в условиях Тавро-Кавказского региона, что математически обосновывает разрешение методологической дискуссии о применимости этих алгоритмов в зонах континентальной коллизии. Разработан методологический подход к физической идентификации тектонической и вулcano-тектонической природы землетрясений на основе совместного анализа полных волновых полей, спектрально-временных характеристик и параметров тензора сейсмического момента, апробированный на материале Эгейской вулканической дуги; выдвинута физико-геодинамическая гипотеза о связи инъекции магматического вещества с предельными упругими напряжениями в очаговой области, устанавливающая физическую связь магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках.

Глава 2. Методы машинного обучения в анализе сейсмичности Тавро-Кавказского региона.

Выполнено сравнительное исследование фундаментальных алгоритмов кластеризации - K-means (метод минимизации внутрикластерной дисперсии в евклидовой метрике) и DBSCAN (плотностная кластеризация Хана-Эстера), демонстрирующих комплементарную эффективность в задачах выявления пространственно-временных кластеров сейсмических событий различной

геометрии и плотности. Разработаны новые методологии формализованного распознавания потенциально сейсмоопасных зон Тавро-Кавказского региона: схема распознавания высокосейсмичных дислокационных узлов на основе обучения с использованием одного класса (one-class classification, в основе - теория опорных векторов Schölkopf et al., 2001), методологически адаптированная к условиям ограниченной выборки сильных сейсмических событий, и формализованный метод FCAZ (Formalized Clustering and Zoning), обеспечивающий динамическую корректировку результатов в реальном временном масштабе. На примере катастрофических землетрясений Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,5$) обоснована их дублетная природа на основе анализа параметров тензора сейсмического момента, пространственно-временного распределения очагов и афтершоковых процессов; установлено, что магистральный разрыв Газиантепского землетрясения представляет собой сложный нелинейный процесс разрывообразования и включает четыре субочага, что свидетельствует о многостадийной природе разрывного процесса. На основе ансамблевого алгоритма машинного обучения Random Forest впервые установлено принципиально новое физическое явление: дублетный режим сейсмичности в Тавро-Кавказском регионе реализуется на всех энергетических уровнях, проявляясь во временном интервале $\Delta t \in [15 \text{ мин}, 1 \text{ ч}]$ и характеризующийся миграционным процессом в интервале глубин до 20 км. Этот результат принципиально расширяет классические представления о дублетных землетрясениях и переводит их в категорию универсального режима сейсмического процесса в коллизионных обстановках.

Впервые выявлен принципиально новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах: после второго события дублета количество афтершоков $N(t)$ в области первого события сокращается шестикратно. Это фундаментальное эмпирическое наблюдение раскрывает кардинальную нелинейную трансформацию пространственно-временной

эволюции афтершокового процесса при последовательной активизации смежных сегментов разломной системы и формирует новый класс физических закономерностей релаксации напряжений в дискретной геофизической среде. Впервые установлено принципиальное физико-геодинамическое различие в топологии пространственно-временной структуры афтершоковых процессов: афтершоки дублетных землетрясений формируют линейный магистральный образ вдоль разломной плоскости, тогда как афтершоки одиночных событий формируют круговую (кольцевую) пространственную структуру, что раскрывает существование двух фундаментально различных физических механизмов разрывообразования в коллизионных тектонических обстановках.

Глава 3. Глубинное строение, современная геодинамика и фокальные механизмы землетрясений.

Методом 2D-поверхностно-волновой томографии (диапазон периодов $T \in [5, 80]$ с, глубинный охват до ≈ 200 км) впервые для зоны коллизии Аравийской и Евразийской плит выявлена устойчивая трёхуровневая структура скоростных аномалий: (i) в диапазоне коротких периодов (глубины 6–30 км) идентифицированы 15 верхнекоровых горячих зон с относительными скоростными возмущениями $\delta V_s/V_s \sim -5 \div -8$ %, ассоциированных с процессами активного деформирования; (ii) в диапазоне средних периодов (100–110 км) выявлены низкоскоростные зоны, интерпретируемые как области подкорового внедрения (underplating) мантийного материала с неглубоким залеганием границы литосфера–астеносфера (LAB); (iii) в диапазоне длинных периодов (180–200 км) доминируют экстремально низкоскоростные аномалии, свидетельствующие об аномально малой мощности литосферы или о её локальном отсутствии 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 физически интерпретируемой как магматический канал коро-мантийного происхождения. Впервые установлена физико-

геодинамическая дифференциация литосферы Большого Кавказа с запада на восток, выявленная по различиям в структуре скоростных аномалий волн Рэлея и Лява: западный сегмент характеризуется жёсткой литосферной структурой, тогда как восточный демонстрирует признаки активного латерального течения литосферного материала, отражая региональную асимметрию процессов континентальной коллизии.

По данным непрерывных GNSS-наблюдений впервые установлено принципиально новое геодинамическое явление: удалённые катастрофические землетрясения Кахраманмараш 6 февраля 2023 г. индуцируют статистически значимые косейсмические изменения кинематического режима земной коры Кавказского региона на расстоянии $\Delta \approx 1\,000$ км от эпицентральной зоны, проявляющиеся в развороте векторов скоростей горизонтальных движений по часовой стрелке в среднем на 6° . Это эмпирическое наблюдение раскрывает интегральный характер геодинамического отклика литосферы на крупномасштабные разрывные процессы в сопряжённых тектонических провинциях и существенно расширяет представления о дальнедействующих эффектах сильных землетрясений в коллизионных обстановках. 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; 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 количественной оценки сейсмической опасности.

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

Впервые для вулканических областей установлена новая фундаментальная физико-геологическая закономерность - обратная корреляционная связь между топографическим градиентом и параметром V_{s30} , противоречащая классической зависимости Wald & Allen (2007), разработанной для невулканических областей. Принципиально важно, что выявленный феномен независимо верифицирован на инструментальных измерениях вулканических территорий острова Хайнань (Китай), что обосновывает его универсальный характер для вулканогенных провинций мира и устанавливает новую фундаментальную закономерность в области инженерной геофизики. Впервые построена общенациональная карта V_{s30} территории Республики Армения на основе 250 натурных инструментальных измерений методом геостатистического кокригинга (Slope-based CoKriging, SCK) с отдельным моделированием вулканогенных и невулканических доменов; карта демонстрирует доминирование высокоскоростных грунтов в диапазоне $V_{s30} \in [450, 900]$ м/с, что физически согласуется с широким распространением вулканогенных пород плиоцен-четвертичного возраста. Количественно обоснована методологическая непригодность глобальных моделей V_{s30} (ShakeMap USGS) и стандартных грунтовых классификаций (NEHRP, Eurocode 8) для региональных условий Республики Армения. 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.

Разработана региональная методология построения синтетических акселерограмм $a(t)$, согласованных с нормативными спектрами реакции $S(T, \xi)$ и адаптированных к условиям ограниченной выборки инструментальных записей сильных движений. Методология реализована на основе итеративной процедуры

спектрального согласования с сохранением физически реалистичного фазового спектра, что обеспечивает корректное воспроизведение временной структуры расчётных воздействий и удовлетворяет нормативным требованиям международных строительных норм. Создано специализированное программное обеспечение, обладающее структурной универсальностью и методологической адаптируемостью к различным нормативным системам (Eurocode 8, ASCE 7, ГОСТ 14.13330). Выполнен сравнительный анализ кривых динамичности $\beta(T, n)$, построенных по двум методологически различным подходам - по максимальным значениям ускорений и по интегральному параметру кумулятивной абсолютной скорости (Cumulative Absolute Velocity, CAV), что развивает теоретические основы нормирования сейсмических воздействий с учётом интегральных энергетических характеристик колебательного процесса.

Совокупность перечисленных результатов формирует целостный научно-методологический комплекс и квалифицируется как решение крупной научной проблемы в области физики Земли, наблюдательной сейсмологии и геодинамики зоны континентальной коллизии.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы определяется её фундаментальным вкладом в физику Земли по ряду направлений: (i) развитие представлений 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; (ii) раскрытие физических механизмов формирования дублетных землетрясений и принципиально нового механизма релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах, выражающегося в шестикратном сокращении количества афтершоков после второго события дублета; (iii) установление физической связи между процессами магматизма и сейсмогенеза в коллизионных тектонических обстановках; (iv) развитие представлений о далекодействующих эффектах катастрофических землетрясений через

установление статистически значимых косейсмических изменений кинематического режима на расстояниях ~ 1000 км; (v) установление новой фундаментальной закономерности - обратной корреляционной связи между топографическим градиентом и параметром V_s30 для вулканических областей.

Практическая значимость работы характеризуется непосредственной приложимостью к национальным задачам Республики Армения. Унифицированный декластеризованный сейсмологический каталог Тавро-Кавказского региона обеспечивает региональную калибровку уравнений прогноза параметров грунтовых колебаний (GMPE), проведение вероятностной оценки сейсмической опасности (PSHA) и обновление национальных карт общего сейсмического районирования. Построенная общенациональная карта V_s30 и количественные оценки котловинных эффектов формируют научное обоснование для пересмотра действующих сейсмических строительных норм и практики сейсмического микрорайонирования урбанизированных территорий. Разработанные методология и программное обеспечение генерации синтетических акселерограмм имеют прямую применимость для нормативного сейсмостойкого проектирования сооружений.

5. Замечания и дискуссионные вопросы

Высокая научная зрелость представленной работы не исключает наличия отдельных замечаний дискуссионного и развивающего характера.

5.1. Обнаруженный автором эффект примерно шестикратного сокращения числа афтершоков после второго события дублета представляет несомненный фундаментальный интерес; в порядке пожелания его со временем было бы ценно дополнить физико-математической моделью и, при наличии данных, расширить статистическую базу за счёт других дублетных событий.

5.2. При построении карты V_s30 методом кокригинга было бы желательно - в порядке дополнения - привести оценку пространственной погрешности

(дисперсию ошибки кокригинга), что обычно для геостатистических построений и удобно пользователям карты.

5.3. Установленная дифференциация литосферы Большого Кавказа с запада на восток представляет значительный теоретический интерес; при дальнейшем развитии работы её обсуждение можно было бы дополнить кратким сопоставлением с альтернативными геодинамическими моделями.

5.4. В качестве замечания технического (редакционного) характера можно отметить желательность унификации обозначений магнитудной шкалы (M , M_w , M_s , M_c) и включения единого свода принятых сокращений и обозначений.

Приведённые замечания носят дискуссионный или развивающий характер и не ставят под сомнение основные научные результаты, выносимые на защиту, и не снижают высокую общую оценку работы.

6. Соответствие диссертационной работы требованиям ВКК Республики Армения

Диссертационная работа Дж. К. Карапетяна представлена в форме научного доклада, защищаемого по совокупности опубликованных научных работ. Её соответствие квалификационным требованиям подтверждается публикацией основных результатов в рецензируемых периодических изданиях Scopus и Web of Science квартилей Q1–Q4 (Bulletin of the Seismological Society of America, Earth-Science Reviews и др.) и в журналах из перечня ВКК РА; многоступенчатой апробацией на Генеральных ассамблеях ASC, EGU и AGU; соответствием автореферата основному содержанию научного доклада; логичной структурой и ясным научным языком; полным соответствием паспорту специальности 24.01.08 - «Геофизика, методы поиска полезных ископаемых» и требованиям к докторским диссертациям в области физико-математических наук. Личный вклад соискателя в полученные научные результаты не вызывает сомнений: автор является ведущим разработчиком методологий, основным исполнителем экспериментальных и теоретических

работ и научным руководителем коллективных исследований по теме диссертации.

Заключение

На основании всестороннего и тщательного рассмотрения представленного научного доклада, автореферата и опубликованных работ соискателя считаю необходимым заключить следующее.

Диссертационная работа Карапетяна Джона Костиковича «Актуальные для территории Республики Армения решения прямых и обратных задач сейсмологии», представленная в форме научного доклада по совокупности опубликованных научных работ, является завершённым самостоятельным научно-квалификационным исследованием, в котором получены принципиально новые научные результаты фундаментальной значимости, формирующие целостный научно-методологический комплекс системного решения совокупности актуальных прямых и обратных задач сейсмологии для территории Республики Армения как ключевого сегмента зоны континентальной коллизии Аравийской и Евразийской литосферных плит. Полученные результаты включают, в частности, выявленную трёхуровневую структуру скоростных аномалий литосферы, обнаруженный новый физический механизм релаксации тектонических напряжений в очаговых зонах (шестикратное сокращение афтершоков после второго события дублета), установленную дальнодействующую геодинамическую реакцию земной коры на расстоянии ~ 1000 км от эпицентра, и новую фундаментальную физико-геологическую закономерность - обратную корреляцию топографического градиента и параметра V_{s30} для вулканических областей.

Совокупность полученных автором результатов квалифицируется как решение крупной научной проблемы в области физики Земли, наблюдательной сейсмологии и геодинамики зоны континентальной коллизии, имеющее существенное значение для развития соответствующих отраслей геофизического

знания и значительную практическую значимость для оценки сейсмической опасности, сейсмостойкого проектирования и долгосрочного прогноза сильных сейсмических событий.

Представленная работа полностью соответствует требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней Высшей квалификационной комиссии Республики Армения, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор - Карапетян Джон Костикович - несомненно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 24.01.08 - «Геофизика, методы поиска полезных ископаемых».

Официальный оппонент:

член-корреспондент Российской академии наук,
доктор физико-математических наук, профессор,
врио директора Института теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук



Шебалин Пётр Николаевич

Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, корп. 2

E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

« 17 » ноя 2026 г.

Подпись заверяю:

Чл. секретарь ИТПЗ РАН Сеслова О.В.

