

УДК 550.34

СЕЙСМОТЕКТОНИКА И СЕЙМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА

© 2024 г. Р. С. Ибрагимов¹, *, Т. Л. Ибрагимова¹, У. А. Нурматов¹, Ю. М. Садыков¹,
М. А. Мирзаев¹, С. Х. Ашуров¹

¹Институт сейсмологии им. Г. Мавлянова, Академия наук Республики Узбекистан,
д. 3, ул. Зулфияханум, 100028 Ташкент, Узбекистан

*e-mail: ibrroma@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

После повторной доработки 06.08.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Проведен анализ сейсмотектонической позиции территории Центрального и Южного Узбекистана. Показано, что территория характеризуется слоисто-блоковым строением. Выделено четыре крупных блока земной коры. Два блока относятся к Туранской микроплите, остальные блоки относятся к Западно-Тянь-Шаньской и Афгано-Таджикской микроплитам. Проведено описание положительных и отрицательных морфоструктур каждого геодинамического блока. Выделены активные разломы земной коры трех различных направлений. В Центральной части Узбекистана наиболее активными являются разломы северо-западного простирания. Эти разломы характеризуются длительной историей развития, сложным внутренним строением, высокими значениями амплитуды неотектонических движений. К таким разломам приурочены приразломные прогибы. Вновь возникшие разломы северо-восточного направления усложнили строение крупных региональных структур. Если в пределах Центрального Узбекистана эти разломы имели второстепенное значение при формировании современной деформационной структуры земной коры региона исследования, то на территории Южного Узбекистана разломы этого направления являются основными и контролируют современную сейсмичность. Проведен вероятностный анализ сейсмической опасности территории Центрального и Южного Узбекистана. Рассмотрено три типа расчетных моделей источников сейсмических колебаний: квази-однородные сейсмологические провинции, активные разломы земной коры и сейсмогенные зоны. Проведена параметризация моделей сейсмических источников, включающая определение сейсмического потенциала, параметров повторяемости землетрясений различных магнитуд, преобладающего кинематического типа подвижки в очагах землетрясений каждого источника.

Расчет сейсмических воздействий проведен с использованием нескольких зависимостей затухания, разработанных для Центрально-Азиатского региона. Вес к зависимостям затухания подобран на основе процедуры ранжирования по степени применимости к исследуемой территории. Проведена оценка сейсмической опасности в инженерных параметрах сейсмических колебаний. С учетом периодов повторения сейсмических воздействий разработаны вероятностные карты детального сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана.

Ключевые слова: активные разломы, сейсмотектоника, сейсмическая опасность, макросейсмическая интенсивность, кинематика подвижек, слоисто-блоковая структура, сейсмическое районирование

DOI: 10.31857/S0016853X24060059, EDN: RWGFUM

ВВЕДЕНИЕ

На территории Центрального и Южного Узбекистана расположены Сырдарьинская, Самаркандская, Джизакская, Сурхандарьинская и Кашкадарьинская области, в которых проживает более 12 миллионов жителей [19]. Здесь сосредоточено большое количество сельскохозяйственных и промышленных предприятий, объектов топливно-энергетического комплекса, ведется интенсивное освоение полезных ископаемых. Огромную ценность представляют расположен-

ные на данной территории многочисленные памятники древней архитектуры, составляющие историческое и культурное наследие Республики Узбекистан.

За исторический и инструментальный период наблюдений на территории Центрального и Южного Узбекистана произошло множество разрушительных землетрясений:

- Уратюбинские в 1897 г.;
- Каратагские в 1907 г.;
- Байсунские в 1935, 1968, 2022 гг.;

- Камашинские 1999, 2000, 2001 гг.;
- Марджанбулакское в 2013 г.

Отдельные землетрясения данной территории имели магнитуду $M \geq 7.0$ и интенсивность сотрясений в эпицентре $I_0 \geq 9$ баллов по шкале MSK-64. Весьма ощутимыми здесь являются сейсмические воздействия от землетрясений, эпицентры которых расположены в соседних с Узбекистаном странах (Афганистане, Туркменистане, Казахстане и Таджикистане). Поэтому проблема обеспечения сейсмической безопасности для данной территории весьма актуальна.

Территория Центрального и Южного Узбекистана имеет неравномерное по площади распределение сейсмической активности [1, 2, 4, 13, 15, 26, 54, 60, 61].

Были приведены оценки опасности Центрального и Южного Узбекистана, полученные в рамках детерминистического и вероятностно-детерминистического подходов, без учета эпистемических и алеаторных неопределенностей в параметрах сейсмического процесса и сейсмических воздействий [1, 2, 4, 13, 15, 26, 34].

Было показано, что это может приводить к существенной недооценке сейсмической опасности исследуемой территории [44].

Сейсмическое районирование проводилось с использованием классического вероятностного подхода [42, 50, 54, 60]. Однако, учитывая, что сейсмическая опасность в этих исследованиях оценивалась для всего Центрально-Азиатского региона, площадная детальность этих построений недостаточно высока.

Целью настоящей статьи является разработка карт детального сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана, выражающих на вероятностной основе сейсмическую опасность исследуемой территории в показателях макросейсмической интенсивности и физических характеристиках сейсмических воздействий.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Для получения количественных характеристик сейсмической опасности Центрального и Южного Узбекистана исследовалась территория, ограниченная географическими координатами $37^{\circ}.00' - 41^{\circ}.30'$ с.ш. и $64^{\circ}.00' - 69^{\circ}.30'$ в.д.. Показано положение региона исследования в общей структуре Высокой Азии показано (рис. 1).

Современная структура Центрального и Южного Узбекистана сформировалась в результате внутриконтинентального коллизионного горообразования в условиях взаимодействия Евразийской, Индийской и Аравийской плит.

В пределах исследуемой территории выделяются западное погружение постплатформенной орогенной области Южного Тянь-Шаня и прилегающие к нему прибортовые части Амударьинской и Сырдарьинской депрессий Туранской плиты, которые формировались в течение неотектонического периода кайнозойской истории геологического развития [6, 10, 12].

Слоисто-блоковая структура земной коры Центрального и Южного Узбекистана

Геолого-геофизическими исследованиями установлено, что земная кора Центрального и Южного Узбекистана имеет слоисто-блоковую структуру, в которую входят следующие структуры [6, 14, 15] (рис. 2):

- Амударьинский и Нуратинский новейшие блоки Туранской микроплиты;
- Южно-Тянь-Шаньский блок Западно-Тянь-Шаньской микроплиты;
- блок, включающего в себя юго-западные отроги Гиссара Афгано-Таджикской микроплиты.

Амударьинский блок. В пределах исследуемой территории располагается только восточная часть Амударьинского блока, представленная Бухарской и Чарджоуской тектоническими ступенями, которые ограничены Амударьинской, Учбаш-Каршинской, Караиль-Лянгарской флексурно-разрывными зонами (ФРЗ) и Южно-Тянь-Шаньским разломом (см. рис. 2).

С Южно-Тянь-Шаньским разломом связаны Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. с магнитудой $M \geq 7.0$.

Отмеченные флексурно-разрывные зоны представляют собой уступы в рельефе фундамента и обеспечивают ступенчато-наступательное развитие восточного блока на восток. С Учбаш-Каршинской флексурно-разрывной зоной связаны исторические Бухарские землетрясения 1390 г. и 1821 г. с магнитудой $M \geq 6.0$.

Нуратинский блок. В пределах Нуратинского блока с севера на юг выделяются Северо-Нуратинское, Южно-Нуратинское, Зирабулакское, Каратепинское поднятия (см. рис. 2).

Поднятия разделены активными разломами земной коры и следующими межгорными впадинами и прогибами (см. рис. 2):

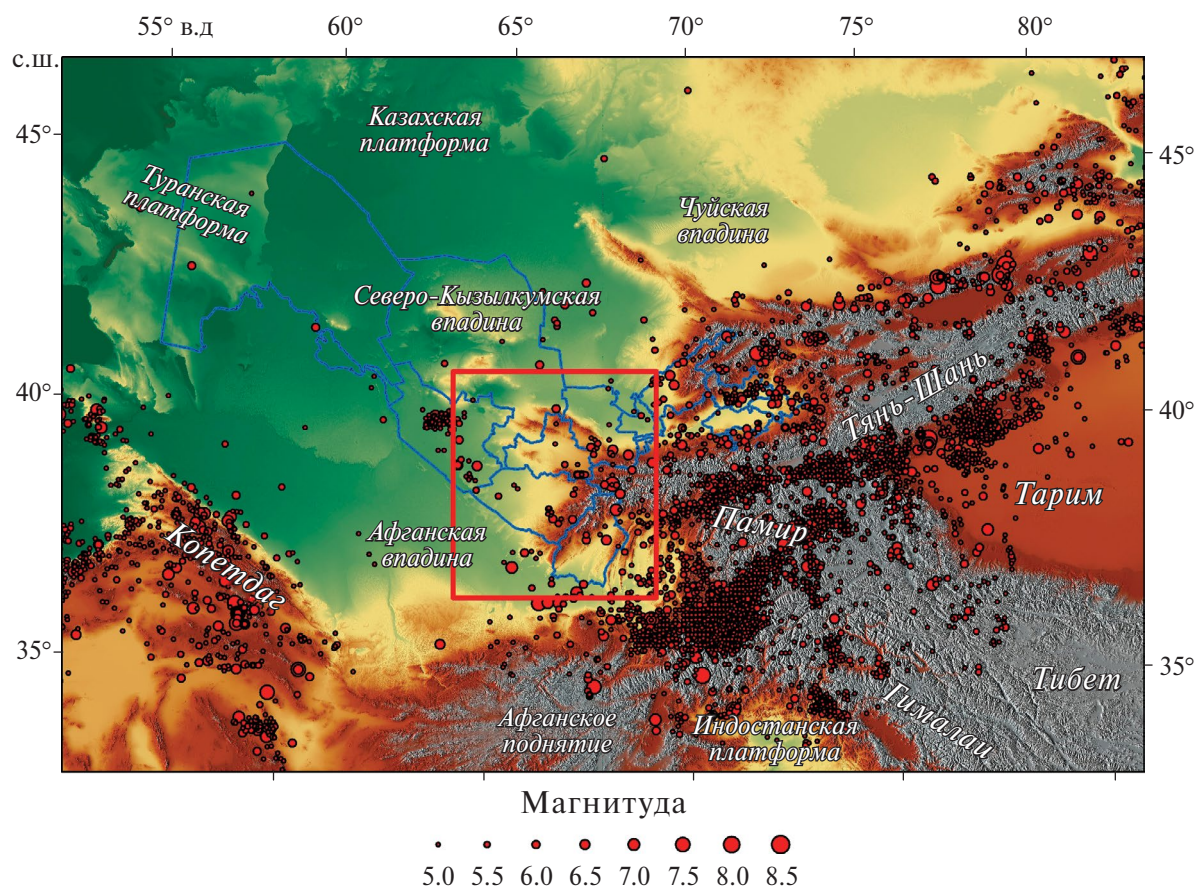


Рис. 1. Расположение района исследований в общей структуре района Высокой Азии (по данным [17], с дополнениями).

Обозначено: регион исследования (контур красным); государственная граница Республики Узбекистан (линия бирюзовым)

- Рават-Галляаральский прогиб;
- Санзарский прогиб;
- Каттакурганская впадина;
- Самаркандская впадина;
- Пянджикентский прогиб.

Южно-Тянь-Шаньский блок. Этот блок Западно-Тянь-Шанской микроплиты образуют Туркестанское, Зарафшанское и Гиссарское поднятия субширотного простирания (см. рис. 2).

Данные поднятия являются орогенными структурами, современная активность которых подтверждается множеством произошедших землетрясений с интенсивностью $I = 8-9$ баллов [6,10].

Юго-западные отроги Гиссара. Афгано-Таджикская микроплита на анализируемой территории представлена неотектоническими структурами юго-западных отрогов Гиссара и Сурхандарьинской впадиной (см. рис. 2).

Юго-западные отроги Гиссара образованы виргацией и погружением палеозойских структур Гиссара под мощные отложения мезозой-кайно-

зой (MZ–KZ). Сетью разломов северо-восточного простирания фундамент разбит на сравнительно узкие фрагменты. Сурхандарьинская впадина образована системой узких линейных антиклинальных зон с широкими и плоскими прогибами [8].

На западе впадина ограничена Кутитанг-Кара-тагской флексурно-разрывной зоной. Структуры мезозойско-кайнозойских отложений и фундамента имеют отчетливое северо-восточное простирание.

Кроме геодинамических блоков, мы приводим схему активных разломов земной коры северо-западного, северо-восточного и субширотного простирания, выделенных по геофизическим и сейсмологическим данным, а также по материалам геологической съемки территории Центрального и Южного Узбекистана [5, 8, 14, 15, 23, 25, 30] (см. рис. 2).

Северо-восточная система разломов. Разломы северо-восточного простирания уверенно выделяются в пределах юго-западных отрогов Гиссара

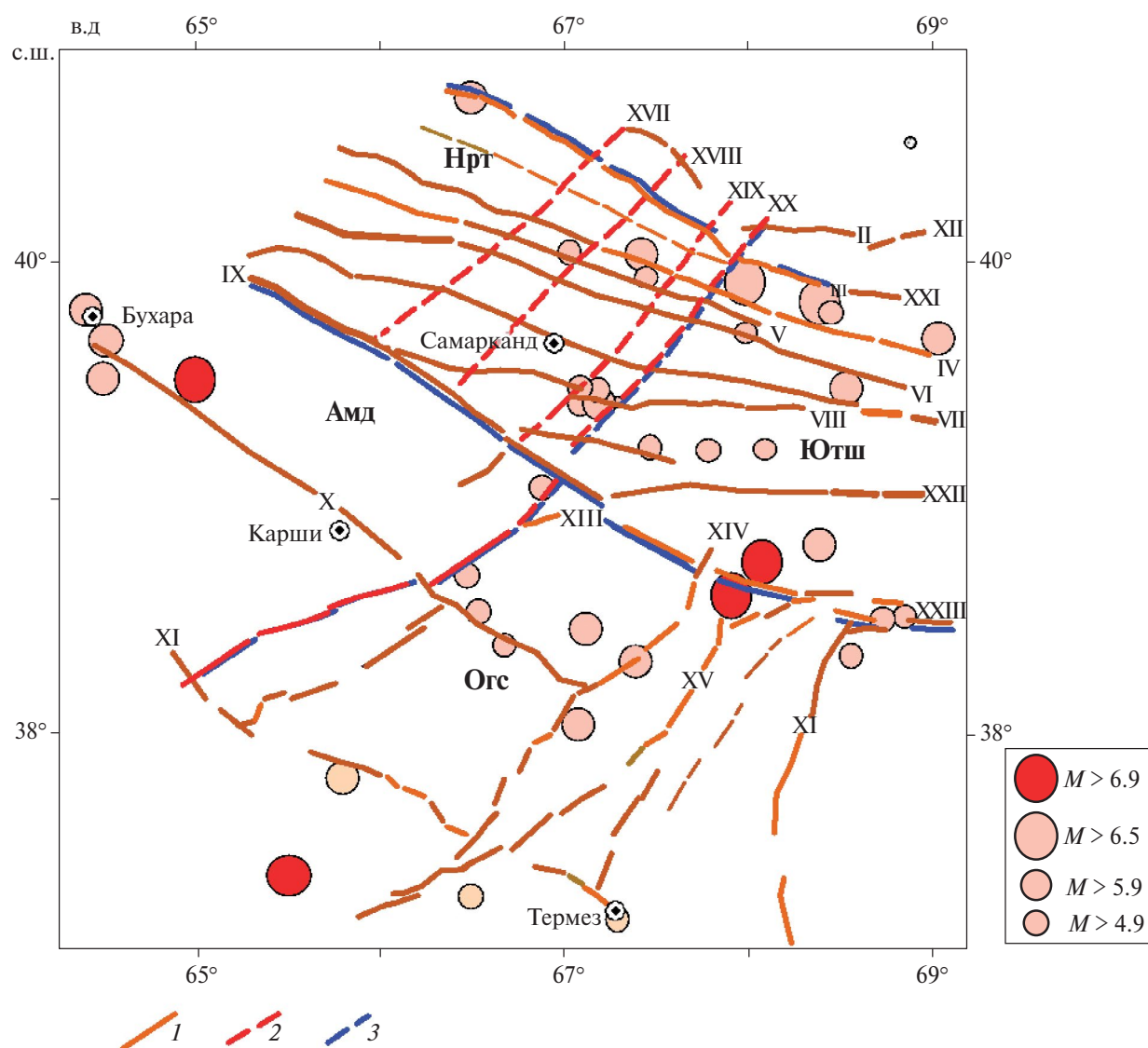


Рис. 2. Активные разломы Центрального и Южного Узбекистана и эпицентры сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 4.9$.

Блоки: Амд – Амударьинский; Нрт – Нуратинский; Ютш – Южно-Тянь-Шанский; Огс – отроги Гиссара (юго-западные).

Разломы северо-западного простирания (I–XI): I – Писталитауский; II – Северо-Мехнаткашский; III – Северо-Нуратинский; IV – Нуратау-Катранский; V – Северо-Актау-Южно-Карачатау-Северо-Гобдунтау-Южно-Молгузарский; VI – Южно-Актау-Южно-Гобдунтау-Северо-Туркестанский; VII – Южно-Каратау-Южно-Туркестанский; VIII – Северо-Зерабулак-Северо-Зарафшанский; IX – Южно-Тянь-Шанский; X – Учбаш-Каршинский; XI – Амударьинский.

Разломы северо-восточного простирания (XII–XXI): XII – Северо-Ферганский; XIII – Лянгар-Караильская флексуно-разрывная зона; XIV – Байсун-Кугитангский; XV – Сурхантау-Шерабад-Келифский; XVI – Бабатагский; XVII – Санганак-Ханбандытауский; XVIII – Западно-Каратепе-Койташ-Писталитауский; XIX–XXI – Поперечно-Западно-Тянь-Шанские.

Субширотная система разломов (XXII–XXIV): XXII – Южно-Ферганский; XXIII – Главный Гиссарский; XXIV – Гиссаро-Кокшаальский.

1–2 – простирание разломов: 1 – северо-западное, 2 – северо-восточное; 3 – границы блоков

и в большинстве случаев представлены флексуно-разрывной зоной (см. рис. 2).

В пределах Нуратинского блока разломы носят сравнительно скрытый характер и выделя-

ются в основном по комплексу геофизических материалов. Но отдельные их отрезки четко дешифрируются на материалах аэрокосмической съемки.

Северо-западная система разломов. Она морфологически выражена и уверенно трассируется на материалах топографической и аэрокосмической съемок [7, 13]. Сочленение положительных и отрицательных структур в зоне разломов северо-восточной ориентации. Смещения неотектонических структур, относительно друг друга, резкое погружение шарниров положительных структур в их периклинальных частях также происходит в зоне этих разломов.

Проведенный нами сеймотектонический анализ показал, что эти факторы, хотя косвенно, могут свидетельствовать об их значимости при проявлении современной сейсмичности региона исследования.

Современная активность системы разломов северо-западной ориентации подтверждается морфологической выраженностью и уверенным дешифрированием на материалах топографической и аэрокосмических съемок. Большинство эпицентров землетрясений концентрируются в зонах разломов.

В Нуратинском блоке выделенные нами разломы являются природными границами положительно и отрицательно развивающихся неотектонических структур. Почти все разломы имеют северо-западное простирание, они являются прямым продолжением краевых и внутренних разломов Южного Тянь-Шаня, в который входят Туркестанское, Зеравшанское и Гиссарское поднятия более высокого ранга. Этот регион рассматривается как область устойчивых новейших и современных поднятий, сейсмический потенциал которых подтвержден современными сильными землетрясениями и деформациями горного рельефа в результате сильнейших доисторических землетрясений (см. рис.2).

Субширотная система разломов. Эта система развита на Южно-Тянь-Шаньском блоке Западно-Тянь-Шаньской микроплиты, в которую входят наиболее протяженные и сейсмически активные разломы. В пределах субширотной системы разломов произошли в 1897, 1907, 1924, 2011 годах сильные с магнитудой $M \geq 6.0$ землетрясения, большая часть которых возникла в зоне Южно-Ферганского разлома [10, 15].

Основные сейсмогенные зоны. Нами выделены основные сейсмогенные зоны изучаемой территории, которые при оценке сейсмической опасности приняты нами в качестве источников сейсмических колебаний (см. рис. 2).

Интенсивные, контрастные движения, сформировавшие современный структурный план реги-

она, начались с этапа новейшей эпиплатформенной активизации. Этими движениями обусловлено формирование морфоструктур, возникновение молодых и возобновление древних разломов, по которым происходили перемещения. Наиболее активными в Западном Узбекистане являются разломы северо-западного простирания. К ним часто приурочены приразломные прогибы и высокие значения амплитуд неотектонических движений.

Неотектонические структуры региона исследования, как положительные, так и отрицательные единообразно сплюснуты по оси, которая имеет северо-западную ориентацию. Можно предположить, что наиболее вероятным направлением стрессовых напряжений, сформировавших неотектонические структуры, является северо-восточное. Для субширотных неотектонических структур Южно-Тянь-Шаньского постплатформенного орогена, стрессовые напряжения имеют субмеридиональное направление.

В пределах территории Центрального Узбекистана разломы северо-восточного направления имели второстепенное значение при формировании современной деформационной структуры земной коры региона. В регионе Южного Узбекистана разломы этого направления являются сейсмоактивными.

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

При изучении сейсмичности региона мы использовали параметры исторических и инструментальных землетрясений Каталога землетрясений территории Узбекистана и прилегающих территорий [1, 64], составленного в Институте сейсмологии АН РУз (Ташкент, Узбекистан). Для классификации землетрясений, произошедших в период от 1955 г. до 2003 г., по величине в данном Каталоге приведен энергетический класс землетрясений K , определяемый по сумме амплитуд объемных P - и S -волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой [21, 55].

Для Средней Азии энергетический класс K связан с локальной магнитудой M_L соотношением [21, 55]:

$$K = 1.8 M_L + 4. \quad (1)$$

Начиная с 2003 г. и по настоящее время для всех землетрясений, происходящих на территории Узбекистана, определяются магнитуды M_L и M_b . Для расчета сейсмической опасности исследуе-

мой территории в инженерных характеристиках сейсмических воздействий локальная магнитуда M_L пересчитывалась в магнитуду M_w , поскольку в уравнениях прогнозируемого движения грунта (GMPE, [65, 66]) используется моментная магнитуда.

Перевод магнитуды M_L в магнитуду M_w проводился по зависимости [18]:

$$\ln(M_w) = 0.642 \ln(M_L) + 0.649. \quad (2)$$

Приведена карта эпицентров землетрясений, произошедших на территории Центрального и Южного Узбекистана, начиная с исторического периода времени по 2023 год, построенная по региональному каталогу [1, 64] (рис. 3, а). Самое ранее историческое землетрясение в региональном каталоге датировано 1208 годом.

Показаны гистограммы распределения сейсмических событий различных магнитуд по глубинам и графики повторяемости землетрясений Регионального каталога [1, 64] (см. рис. 3, б-г). Рассчитанный нами угловой коэффициент графика повторяемости представительных землетрясений равен $b=1.1174$. Большая часть землетрясений с магнитудой $M_w \geq 5.0$ расположена в сейсмоактивном слое от 11 до 20 км (см. рис. 3 в).

Учитывая, что этот диапазон магнитуд землетрясений создает наиболее значимые сейсмические воздействия, при расчете сейсмической опасности рассматривались три возможные глубины $H_1=10$ км, $H_2=15$ км и $H_3=20$ км, которые вошли в логическое дерево с весом $w_1=0.2$, $w_2=0.6$, $w_3=0.2$.

При оценке представительности землетрясений регионального каталога мы опирались на исследования, в которых на основе данных о сети сейсмических станций, действовавшей в 1930, 1940, 1950, 1955, 1965, 1975, 1985 гг., и чувствительности приборов на каждой станции, была построена серия карт, показывающих изолинии нижнего энергетического уровня представительных землетрясений [31, 64]. Представительность землетрясений на этих картах дается для энергетического класса K и магнитуды M_L , которая, впоследствии через соотношения (1)–(2), переводилась в представительность каталога в магнитуде M_w .

После 1985 года нижний порог представительных землетрясений для всей территории Узбекистана практически не менялся. Во второй половине 2000-х годов, в связи с переходом на цифровую регистрацию землетрясений, началась реорганиза-

ция сети. В настоящее время на территории Узбекистана действуют 53 стационарные цифровые сейсмические станции.

Показаны временные интервалы представительной регистрации землетрясений различных магнитуд M_w (рис. 4).

Удаление групповых сейсмических событий из регионального каталога [1, 64] мы проводили с использованием пространственно-временных окон (размеры по [46]).

При оценке сейсмической опасности исследуемой территории для учета сейсмических воздействий от землетрясений, эпицентры которых расположены на территории государств Афганистан, Туркменистан, Казахстан и Таджикистан, граничащих с Узбекистаном, кроме регионального каталога [1, 64], мы использовали каталоги землетрясений Центральной Азии, в которых землетрясения характеризуются моментной магнитудой [51, 54].

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА

Вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) является аналитическим методом, в котором для исследуемого пункта оценивается вероятность превышения каждого фиксированного уровня сейсмических воздействий в течение определенного промежутка времени. Обычно в практике ВАСО этот временной промежуток составляет либо один год, либо охватывает период, сопоставимый со средним сроком службы сооружений (50–100 лет).

Зависимость, связывающая вероятность превышения сейсмического воздействия с уровнем этого воздействия называется кривой опасности, и ее построение является конечной целью ВАСО. При этом, в качестве сейсмического воздействия может рассматриваться, как макросейсмическая интенсивность в исследуемом пункте, выраженная в баллах макросейсмической шкалы, так и физические параметры колебаний грунта при землетрясениях (значения амплитуд смещений, скоростей и ускорений сейсмических колебаний, а также их спектральные составляющие) [42, 50].

Теоретические основы вероятностного анализа сейсмической опасности приведены в [42, 50]. Реализация ВАСО предполагает построение двух взаимосвязанных расчетных моделей:

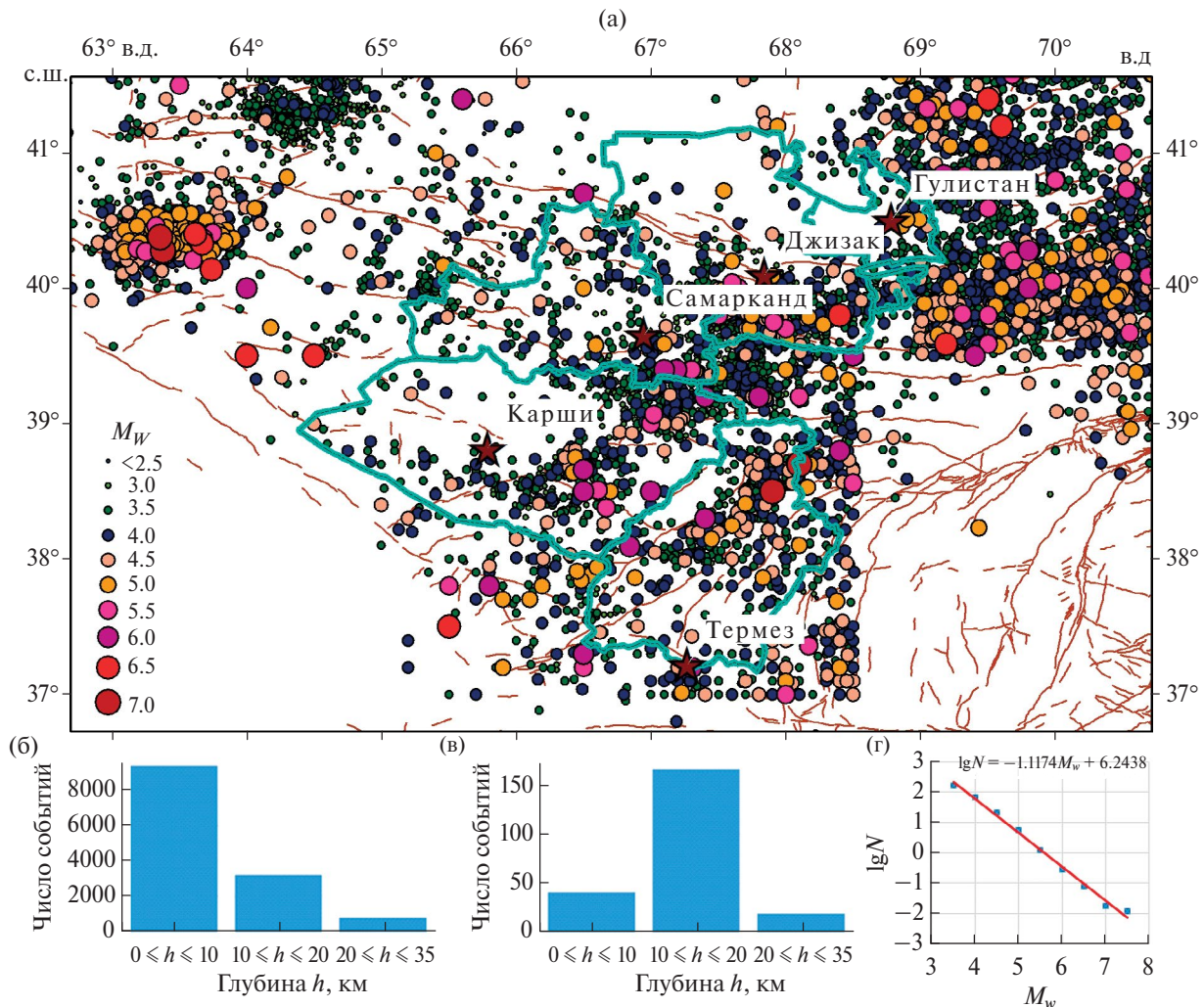


Рис. 3. (а) Карта эпицентров землетрясений изучаемой территории (по данным [1, 64]); (б)–(г) гистограммы распределения представительных землетрясений каталога по глубинам (б) – землетрясения с магнитудой $M \leq 5.0$; (в) – землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$; (г) – график повторяемости землетрясений различного энергетического уровня

– модель сейсмических источников, окружающих исследуемый пункт;

– модель сейсмического эффекта, предсказывающая величину сейсмического воздействия в исследуемом пункте от каждого сейсмического события, происходящего в пределах сейсмических источников.

Для расчета сейсмической опасности территории Центрального и Южного Узбекистана рассматривались расчетные модели сейсмических источников трех типов:

- активные разломы земной коры;
- сейсмогенные зоны, представляющие собой буферные зоны разломов;
- площадные источники землетрясений – квазиоднородные сейсмологические провинции.

Совокупность привлекаемых расчетных моделей сейсмических источников, как мы полагаем, достаточно полно характеризует реальный сейсмический процесс, в котором есть две важнейшие составляющие:

- рассеянная (фоновая) сейсмичность, которая проявляется в пределах площадных образований (блоки, микроплиты);
- сейсмичность, сосредоточенная в пределах линейных структур (активные разломы земной коры, сейсмогенные зоны).

Параметризация моделей сейсмических источников

Наряду с заданием геометрических характеристик каждого источника в плане и по глубине,

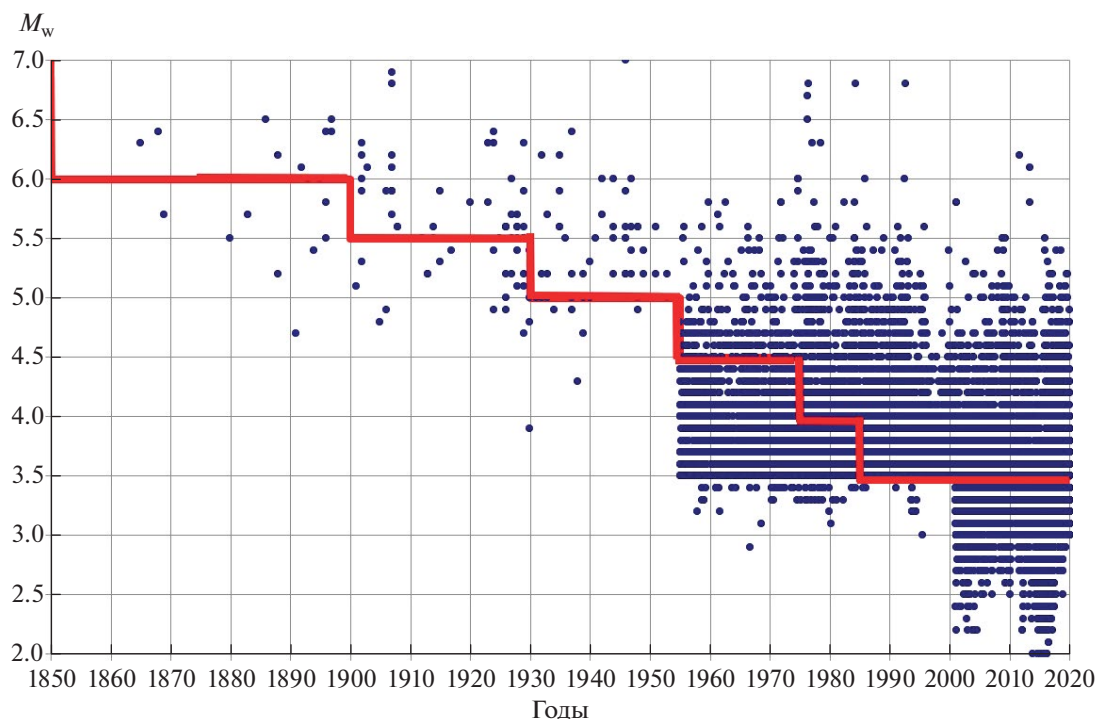


Рис. 4. Временной интервал представительности землетрясений различных магнитуд (M_w) (по данным [31]).

формализованное описание расчетной модели сейсмических источников включает в себя определение сейсмического потенциала этих источников, частоты повторения землетрясений различных магнитуд, кинематического типа подвижек в очагах землетрясений, происходящих в пределах каждого источника.

Расчетная модель активных разломов земной коры

Совместно с региональной схемой активных разломов земной коры территории Центрального и Южного Узбекистана (см. рис. 2), мы использовали базу данных активных разломов Евразии (Active Fault Database of Eurasia - AFEAD) [7, 67] (рис. 5, а–в).

Для каждого активного разлома в базе данных AFEAD [7, 67] имеются сведения о его морфологии, кинематике с количественными показателями поздне-четвертичных смещений (атрибут RATE). По скорости движения разломы разделены на три ранга:

- 1 ранг – более 5 мм/год;
- 2 ранг – от 1 до 5 мм/год;
- 3 ранг – менее 1 мм/год.

Разломы дифференцированы на четыре класса (А, В, С, D) по степени выраженности (достоверности) проявления современной геодинамической активности – атрибут CONF.

Для разломов, отнесенных к категории А в базе данных AFEAD, выявлены сразу несколько независимых явных признаков активности, установленные в поле или четко выраженные на детальных дистанционных материалах деформации молодых форм рельефа и датированные смещения позднеплейстоцен–голоценовых отложений, а также проявление в зоне разлома сильных землетрясений или палеоземлетрясений [7].

Разломы, включенные в категорию В, характеризуются проявлением одним из признаков активности, однако допускается их меньшая выраженность. Для разломов категории “С” перечисленные признаки активности или хотя бы один из них присутствуют, но все они выражены нечетко, тогда как плиоцен–четвертичные смещения по разлому несомненны.

К категории D в базе данных AFEAD отнесены разломы с проявлениями плиоцен–четвертичных движений, по которым признаки молодых смещений пока не найдены. Вместе с тем, косвенные признаки дают основание полагать, что следы такой активности могут быть обнаружены при более детальном целенаправленном изучении [7].

Для оценки сейсмического потенциала активных разломов, как правило, используются соотношения, основанные на корреляции величины $M_{\max}$ с геометрическими характеристиками тек-

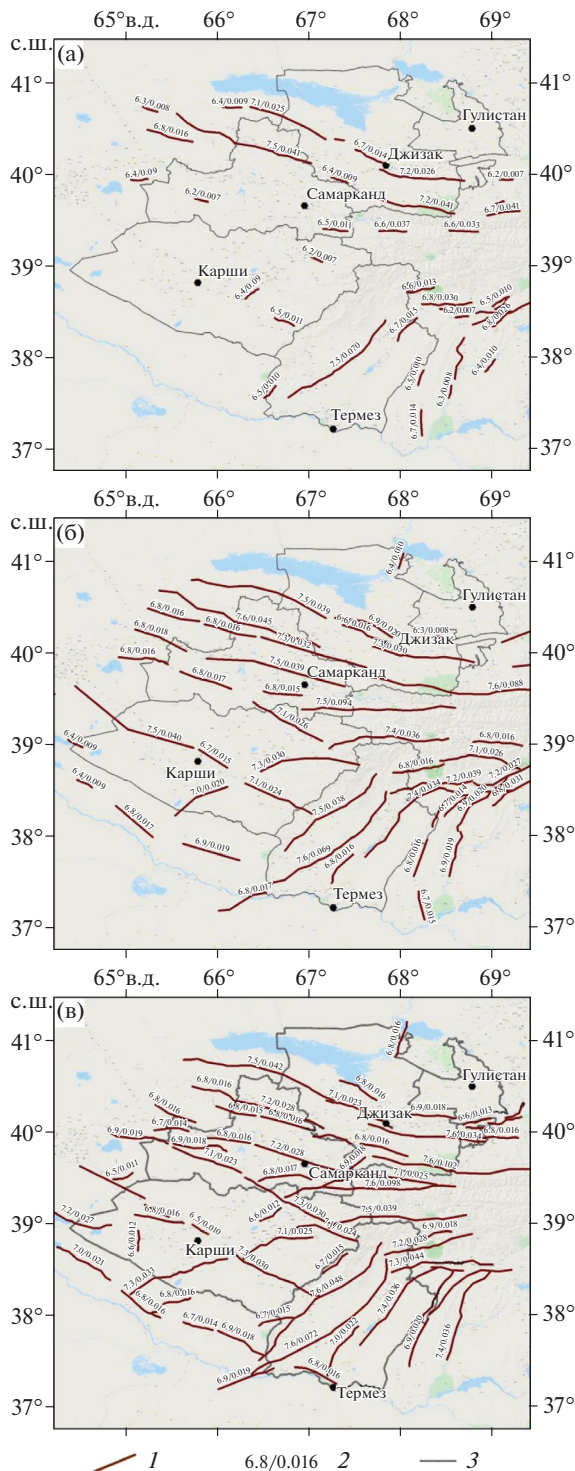


Рис. 5. Расчетные модели активных разломов земной коры (по данным [7, 67]).

(а)–(в) – активные разломы земной коры с классом достоверности проявления современной геодинамической активности: (а) – А–В, (б) – А–С, (в) – А–Д. 1 – активные разломы земной коры; 2 – сейсмический потенциал / среднегодовая частота возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$; 3 – границы областей, расположенных на территории Центрального и Южного Узбекистана

тонического нарушения (длина разлома L , длина максимального возможного на данном разломе поверхностного разрыва l , отвечающая этой длине ширина разрыва W , площадь максимального поверхностного разрыва $A = l \cdot W$).

В данном исследовании расчетное значение величины $M_{\max}$ для каждого активного разлома земной коры находилось путем усреднения с равным весом оценок сейсмического потенциала по пяти различным зависимостям, полученным в [43, 48, 49, 62], в которых величина $M_{\max}$ выражается через длину и площадь разрыва:

$$- \text{Leonard [48, 49]} - M_{\max} = \lg(A) + 4.19, \quad (3)$$

$$- \text{Leonard [48, 49]} - M_{\max} = 1.67 \cdot \lg(l) + 4.32, \quad (4)$$

$$- \text{Hanks [43]} - M_{\max} = \frac{4}{3} \cdot \lg(A) + 3.07, \quad (5)$$

– Wells и Coppersmith [62] –

$$M_{\max} = 0.9 \cdot \lg(A) + 4.33, \quad (6)$$

– Wells и Coppersmith [62] –

$$M_{\max} = 1.22 \cdot \lg(l) + 5. \quad (7)$$

Уточним, что в нашем исследовании полагалось, что ширина разрыва составляет половину от его длины ($W = l/2$). Сама же длина разрыва l , который может образоваться в случае возникновения землетрясения с максимальной магнитудой $M_{\max}$ составляет только определенный процент от всей протяженности разлома L .

Было проведено исследование отношения l/L [29, 52].

На основании экспериментальных данных было показано, что для больших разломов (например, разлом Сан-Андреас в США) это отношение не превосходит значения $l/L = 0.5$ [29].

Было предложено брать это отношение l/L различным для разломов с разной длиной L [52]. В логическое дерево были включены следующие соотношения между длиной разлома L и длиной максимального разрыва в очаге l для разломов с длиной [52]:

– $L > 100$ км с весами $w=0.6$ и $w=0.4$ принимались значения l , составляющие 37% и 50% от длины разлома соответственно;

– $50 < L < 100$ км с весами $w = 0.5$ и $w = 0.5$ принимались значения l , составляющие 37% и 50% от длины разлома;

– $L < 25$ км длина разрыва бралась равной длине разлома.

В нашем исследовании соотношение l/L было принято таким же, как в [52].

Для оценки среднегодовой повторяемости землетрясений различных магнитуд $N(M)$ в модели активных разломов земной коры нами применялись четыре соотношения, полученные в исследованиях [33, 63] и их программная реализация, описанная в [38]. Зависимости [33, 63] различаются между собой характером высвобождения сейсмического момента M_0 , логарифм которого связан с магнитудой землетрясений линейной зависимостью:

$$\log(M_0) = c + dM. \quad (8)$$

Значения констант c и d по мировым данным [45] следующие: $c = 16.05$, $d = 1.5$.

В работе [33] для средней частоты повторения землетрясений различных магнитуд $N(M)$ получены три различных соотношения:

$$N_1(M) = \left(\frac{\bar{d} - \bar{b}}{\bar{d}} \right) \cdot \left(\frac{s}{\beta} \right) \cdot e^{\bar{b}(M_{\max} - M)} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{d}}{2} M_{\max} \right)}, \quad (9)$$

$$N_2(M) = \left(\frac{\bar{d} - \bar{b}}{\bar{b}} \right) \cdot \left(\frac{s}{\beta} \right) \cdot \left[e^{\bar{b}(M_{\max} - M)} - 1 \right] \cdot e^{-\left(\frac{\bar{d}}{2} M_{\max} \right)}, \quad (10)$$

$$N_3(M) = \frac{\bar{d}(\bar{d} - \bar{b})}{\bar{b}} \cdot \left(\frac{s}{\beta} \right) \cdot \left\{ \frac{1}{\bar{b}} \cdot \left[e^{\bar{b}(M_{\max} - M)} - 1 \right] - (M_{\max} - M) \right\} \cdot e^{-\left(\frac{\bar{d}}{2} M_{\max} \right)}. \quad (11)$$

В формулах (9)–(11) приняты следующие обозначения:

M – магнитуда землетрясения, для которого оценивается годичная частота возникновения;

$M_{\max}$ – величина максимального возможного землетрясения на разломе;

b – угол наклона графика повторяемости землетрясений в зоне разлома;

$$\bar{b} = b \ln(10);$$

$$\bar{d} = d \ln(10);$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha M_0(0)}{\mu W}};$$

D – смещение по разрыву;

L – длина разрыва;

$$\alpha = \frac{D}{L};$$

$M_0(0)$ – сейсмический момент, отвечающий землетрясению с магнитудой M

В более поздней работе [63] для средней частоты повторения землетрясений различных магнитуд $N(M)$ получено соотношение:

$$N_4(M) = \frac{\mu A_f S(d - b) \left[1 - e^{-b \ln(10)(M_{\max} - M)} \right]}{b M_0 e^{-b \ln(10)(M_{\max} - M)}}, \quad (12)$$

где S – скорость смещения (Slip rate); $A_f = l \cdot W$ – площадь разрыва.

Значение сейсмической активности $N(M)$, приведенное к магнитуде $M=5.0$, при расчете сейсмической опасности исследуемой территории находилось как среднее арифметическое по соотношениям (9)–(12).

Однако кинематическая модель разломов недостаточно полна, чтобы полностью представлять сейсмическую активность земной коры, особенно события с малой магнитудой. Поэтому, в расчетную модель разломов нами был добавлен фоновый слой сейсмичности. Магнитуда землетрясений фонового слоя была лимитирована значением $M_{\max} = 5.5$. Считалось, что для событий больших магнитуд плоскости разрыва должны быть классифицированы как разломы, и уже содержаться в базе данных AFEAD по разломам [7, 67].

По результатам анализа базы данных активных разломов земной коры, мы рассмотрели три различные расчетные модели сейсмических источников активных разломов, с учетом классов достоверности проявления современной геодинамической активности (атрибут CONF в базе данных AFEAD [67]) (см. рис. 5):

– 1-й вариант – разломы с классами достоверности А и В;

– 2-й вариант – учтены, кроме классов достоверности А и В, разломы класса С;

– 3-й вариант – разломы с классами достоверности А, В, С и D.

Показаны три рассмотренные модели разломов региона (см. рис. 5, а–в).

Для каждого разлома приведено соотношение:

$M_{\max}$ (значение сейсмического потенциала – в числителе) / (среднегодовая частота возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$ – в знаменателе).

Параметр b – угловой коэффициент графика повторяемости землетрясений принимался, равным 1

в каждой из трех рассмотренных моделей разломов, что близко к его региональному значению.

Расчетная модель источников в виде сейсмогенных зон

Сейсмогенная зона является областью активного динамического влияния крупного разлома, или системы близко расположенных и одинаково направленных разрывов земной коры, которые на стадии тектонической активизации региона генерируют сильные землетрясения [15]. В плане сейсмогенные зоны представляют собой перекрывающуюся по простиранию совокупность плейстосейстовых областей от землетрясений, которые могут происходить в пределах этих зон.

Контуры сейсмогенных зон определяются пространственным положением активных разломов. При этом учитываются геометрические и морфологические особенности тектонических нарушений, а также возраст их заложения.

На территории Центрального и Южного Узбекистана выделено 20 сейсмически активных зон, способных генерировать землетрясения с магнитудой $M_{max} \geq 5.5$ [15] (рис. 6).

Мы провели расчет величины максимального возможного землетрясения сейсмогенных зон M_{max} на основе полученных сейсмологических и сейсмотектонических данных.

Ведущим фактором, определяющим величину M_{max} сейсмогенерирующих зон при оценке сейсмического потенциала сейсмотектоническими методами, является масштабный уровень процессов, характеризующих деформирование и разрушение горных пород, который обладает такими параметрами, как длина разрыва, глубина его заложения, размеры и степень консолидации блоков, подвергающихся смещению как единое целое [15].

Смещение по разрыву зависит от амплитуды и скорости тектонических движений, состава и прочностных свойств пород. Величина максимального возможного землетрясения определялась как верхний предел магнитуд землетрясений, зарегистрированных в различных сейсмогенерирующих зонах со схожими сейсмотектоническими параметрами. В качестве основных характеристик при сопоставлении структур принимались [14]:

- история геологического развития;
- интенсивность и направленность новейших и современных движений;
- масштабная сопоставимость тектонических структур и их целостность с позиций протекания сейсмотектонических процессов.

Для сейсмологической оценки величины M_{max} были использованы следующие методы, основанные на:

- корреляция сейсмической активности сейсмоактивных зон с величиной максимального возможного землетрясения, возникающего в их пределах [1, 24];
- оценка толщины и линейной протяженности сейсмоактивного слоя [28];
- оценка величины M_{max} , базирующийся на статистике максимального правдоподобия при анализе правых частей графиков повторяемости землетрясений [20];
- статистика экстремальных значений [11].

Были использованы другие статистические методы [1].

Среднеквадратическое отклонение в оценках величины M_{max} при его определении перечисленными методами составляло $\sigma = \pm 0.25M$ магнитудных единиц для каждой сейсмоактивной зоны.

Для большей части сейсмоактивных зон территории Центрального и Южного Узбекистана определение величины максимального возможного землетрясения на основе сейсмологических данных удовлетворительно (в пределах $\sigma=0.5M$ магнитудных единиц) согласуется со значением M_{max} , рассчитанным на основе сейсмотектонических методов. Расчет сейсмической опасности исследуемой территории проводился при наибольшем значении величины M_{max} при сейсмологическом и сейсмотектоническом его определении для каждой сейсмогенной зоны.

Нахождение параметров повторяемости для расчетной модели источников в виде сейсмогенных зон проводилось следующим образом.

Для источников, в пределы которых попадало достаточное количество сейсмических событий для надежного построения графика повторяемости, сейсмическая активность, отнесенная к магнитуде $M = 4$ и угловой коэффициент прямой (параметр b) снимались непосредственно с этого графика.

Для сейсмогенерирующих зон с малым числом сейсмических событий принималось региональное значение параметра b , сейсмическая активность при данном значении угла наклона графика повторяемости, рассчитывалась по выборке землетрясений, попадающих в пределы сейсмического источника. При этом использовались традиционные методы распределения и суммирования определения сейсмической активности [9, 24]. Приведены полученные значения сейсмического

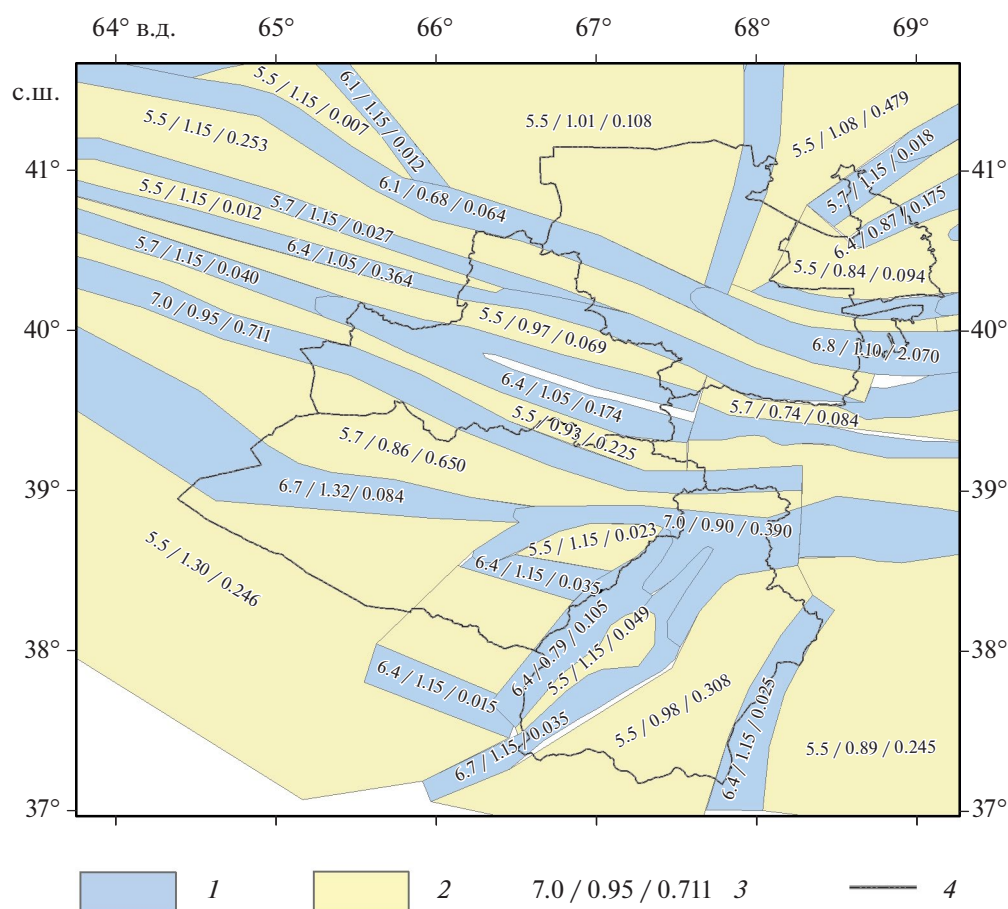


Рис. 6. Расчетная модель источников в виде сейсмогенных зон для территории Центрального и Южного Узбекистана.

1 – сейсмогенные зоны; 2 – источники, расположенные вне сейсмогенных зон; 3 – оценка сейсмического потенциала $M_{\max}$, параметра b и сейсмической активности, приведенной к магнитуде $M=4$; 4 – административные границы областей, расположенных на территории Центрального и Южного Узбекистана

потенциала и параметров повторяемости землетрясений для каждого сейсмического источника в модели сейсмогенных зон (см. рис. 6).

Хотя расчетные модели сейсмогенных зон и активных разломов земной коры отражают локализованное в пределах линейных структур проявление сильных землетрясений, параметризация этих моделей существенно различается между собой, что позволяет рассматривать эти как модели, независимые друг от друга.

Расчетная модель площадных источников

Контуры расчетной модели площадных источников были сформированы нами ранее при разработке карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана ОСР-2017 [35]. Данная модель достаточно отчетливо отражает блоковое строение земной коры и особенности распределения сейсмичности в пределах оро-

генической и платформенной части региона, разграниченных Западно-Тянь-Шаньским линейamentом. В этой модели рассматриваются Южно-Узбекистанская и Западно-Узбекистанская мегазоны, к которым на северо-востоке примыкают западные окончания Приташкентской и Ферганской мегазон (рис. 7).

Каждая мегазона поделена на подзоны – участки с различной сейсмической активностью. Для оценки сейсмической опасности приграничных районов мы включили в рассмотрение дополнительные площадные зоны, расположенные полностью или частично на территории соседних государств.

В качестве оценки сейсмического потенциала площадных источников использовалось значение, полученное добавлением к магнитуде максимального наблюдаемого землетрясения в этом источнике значения $0.3-0.5M$ магнитудных единиц.

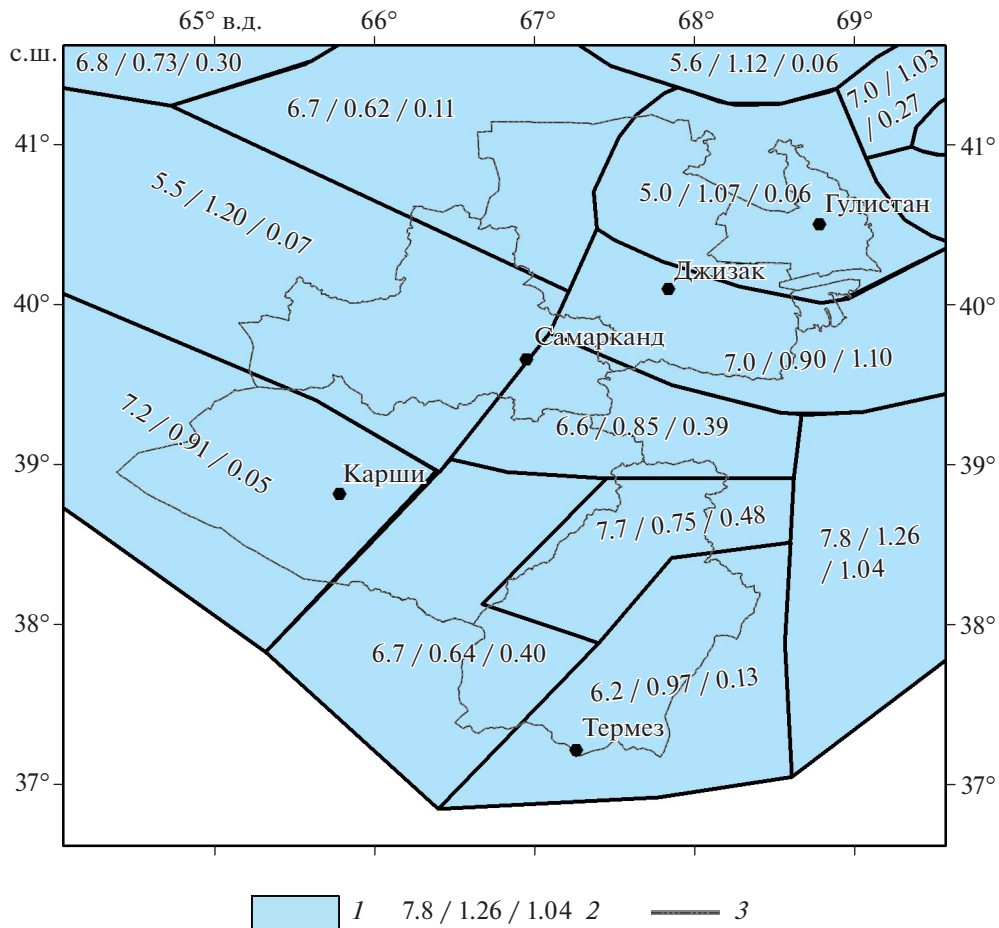


Рис. 7. Расчетная модель площадных источников.

1 – контур площадного источника; 2 – оценки сейсмического потенциала $M_{\max}$, параметра b и сейсмической активности, приведенной к магнитуде $M=4.0$; 3 – границы областей, расположенных на территории Центрального и Южного Узбекистана

Правило нахождения параметров повторяемости для модели источников площадных зон было такое же, как и для модели сейсмогенных зон.

Преобладающим кинематическим типом подвижки в очагах землетрясений исследуемой территории является взброс [17, 56]. Поэтому, именно этот тип использовался нами в уравнениях прогнозируемого движения грунта (GMPE) [65, 66].

ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ

Для оценки сейсмической опасности территории Центрального и Южного Узбекистана в значениях макросейсмической интенсивности было отобрано несколько уравнений затухания интенсивности сейсмических воздействий с расстояни-

ем. Наряду с зависимостью Шебалина [27, 59], полученной по мировым данным:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg R + 3, \quad (13)$$

рассматривались три зависимости, установленные нами на основе анализа схем изосейст сильных землетрясений, произошедших на территории Центральной Азии [3].

Зависимость типа Блейка–Шебалина [27, 59]:

$$I = 1.32M - 3.01 \lg R + 3.55, \quad (14)$$

где $\sigma = 0.7$.

Зависимость типа Ковеслигети [47]:

$$I = 1.33M - 2.37 \lg R - 0.00205 R + 2.24, \quad (15)$$

где $\sigma = 0.73$.

Зависимость, в которой коэффициент затухания зависит от глубины очага землетрясения [3]:

$$I = 1.475M - 2.646\lg H + 1.905 - 0.498M\lg(R/H) + 1.159\lg H\lg(R/H) - 1.401\lg(R/H), \quad (16)$$

где $\sigma = 0.6$.

К анализу также была привлечена полученная несколько ранее для этого сейсмоактивного региона зависимость Бинди [37]:

$$I = 0.898M + 1.215 - 1.809\lg(R/H) - 0.0034(R-H), \quad (17)$$

где $\sigma = 0.73$.

В приведенных зависимостях затухания в формулах (13)–(17), относящихся к макросейсмической интенсивности используется в качестве расстояния R – гипоцентрального расстояния R_{hyp} , в качестве магнитуды M – магнитуда M_S .

Увеличение числа привлекаемых уравнений, как правило, не уменьшает эпистемическую неопределенность в прогнозе сейсмических воздействий. Наиболее эффективным инструментом в решении данной задачи является процедура ранжирования уравнений движения грунта, состоящая в придании веса уравнению, в зависимости от степени соответствия прогнозируемых на его основе сейсмических воздействий экспериментальным данным, имеющимся для исследуемого региона.

Нами было проведено ранжирование приведенных моделей затухания [16]. Использовались методы ЛН [57] и ЛЛН [58]. Результатом ранжирования моделей методом ЛН является отнесение ее к одному из четырех классов А, В, С и D по степени соответствия прогнозируемого на ее основе сейсмического эффекта реальным экспериментальным данным, имеющимся для исследуемого региона. В отличие от метода ЛН, который характеризует модели затухания качественно, метод ЛЛН позволяет придать количественный вес w_i каждой из рассматриваемых моделей затухания.

Результаты ранжирования следующие:

- зависимость (13) – класс А, $w_1 = 0.200$;
- зависимость (14) – класс В, $w_2 = 0.200$;
- зависимость (15) – класс А, $w_3 = 0.213$;
- зависимость (16) – класс А, $w_4 = 0.221$;
- зависимость (17) – класс D, $w_5 = 0.116$.

В обобщенную зависимость затухания, по которой проводились оценки сейсмической опасности, зависимости (13)–(17) вошли с весом, полученным по результатам ранжирования.

Для оценки сейсмической опасности региона в инженерных показателях сейсмических воздействий, в качестве законов затухания использовались уравнения прогнозируемого движений грунта (GMPE), встроенные в программный комплекс CRISIS [53].

На основе геологических, геофизических и сейсмологических данных была проведена типизация земной коры [40]. На территории Центрального и Южного Узбекистана присутствуют в основном два типа коры [40]:

- неглубокая активная кора, которая распространена в восточной и центральной частях исследуемого региона;
- стабильная кора не кратонового типа, которая расположена на западе региона, в пределах Туранской платформы.

Для территорий, относящихся к активной неглубокой коре, с равным весом $w_i = 1/3$ использовались зависимости [32, 39, 41].

Для территорий, расположенных на Туранской платформе, вес каждой из зависимостей [32, 39, 41] составлял $w_i = 1/6$ (суммарный вес $w = 0.5$).

С таким же весом $w=0.5$ для этих территорий вошла зависимость [34], разработанная на основе мировых данных для платформенных территорий – стабильная неглубокая кора [65, 66].

Сочетание зависимостей [32, 39, 41] и [36] позволило обеспечить плавность перехода оценок опасности при продвижении от орогенной к платформенной части региона исследования.

РАСЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА

Расчеты сейсмической опасности проводились с использованием программного комплекса CRISIS [53]. Шаг сетки, по которой производился расчет, составлял $0.1^0 \times 0.1^0$.

Эпистемические неопределенности в выборе сейсмических источников учитывались с использованием логического дерева. Веса к моделям (w) были приняты следующими:

- расчетная модель площадных источников:
 - $w = 1/3$;
- расчетная модель сейсмогенных зон:
 - $w = 1/3$;

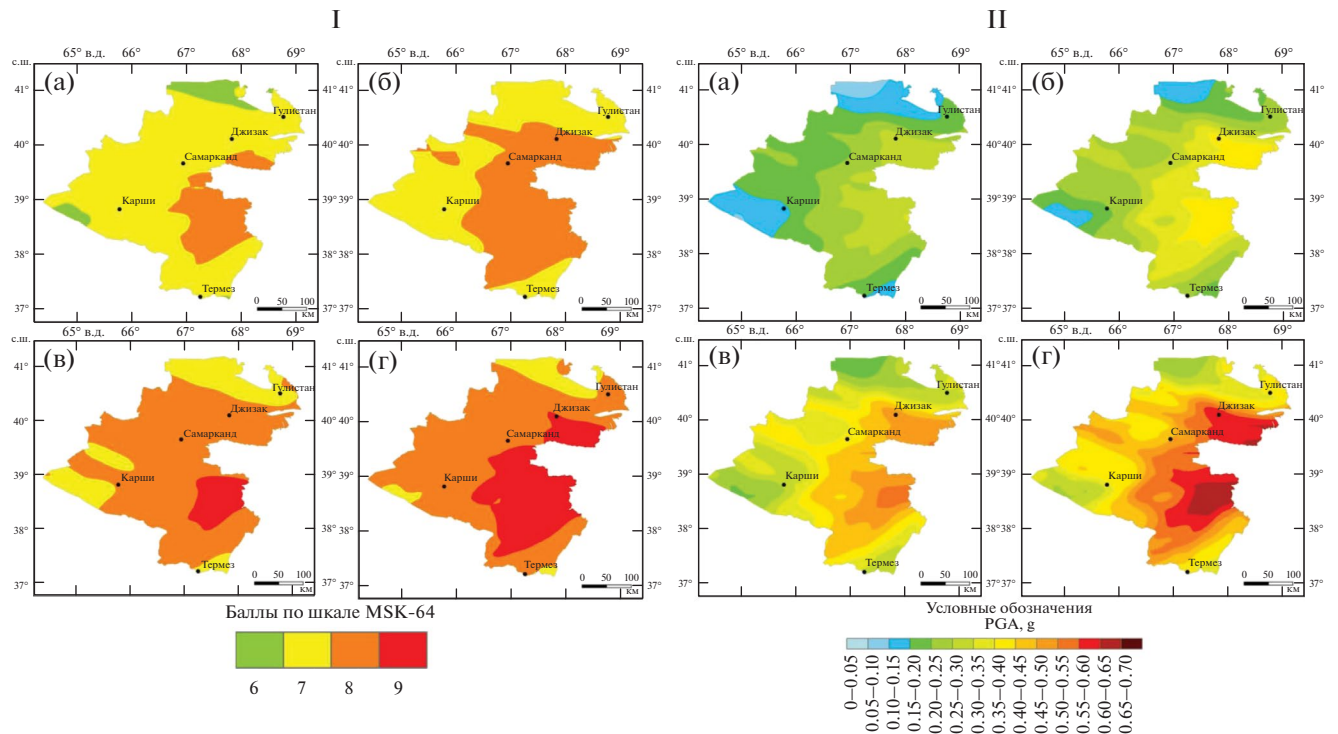


Рис. 8. Карты-схемы детального сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана в баллах макросейсмической шкалы MSK-64 для различных вероятностей не превышения уровня сейсмических воздействий в течение 50 лет

I – в баллах макросейсмической шкалы MSK-64;

II – в значениях максимальных ускорений колебаний грунта (PGA, g).

(a) – $P=0.90$; (б) – $P=0.95$; (в) – $P=0.98$; (г) – $P=0.99$

• расчетные модели активных разломов с различным классом достоверности проявления современной геодинамической активности:

- $w = 1/12$ (A, B);
- $w = 1/6$ (A–C);
- $w = 1/12$ (A–D).

Таким образом, суммарный вес всех пяти моделей сейсмических источников составлял $w_{\Sigma}=1$.

При этом общий вес моделей активных разломов земной коры с различной группой достоверности составил $w_{\text{разл.}} = 1/3$, т.е. являлся таким же, как и для моделей площадных источников и сейсмогенных зон. Центральной модели активных разломов с классом достоверности A, B и C был придан больший вес, как средней по степени консервативности, по сравнению с двумя другими моделями.

Нами составлены карты сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана в баллах макросейсмической шкалы и в значениях максимальных ускорений колебаний грунта (PGA, g) (рис. 8).

Построения сделаны для вероятностей $P = 0.90$, $P = 0.95$, $P = 0.98$ и $P = 0.99$

непревышения уровня сейсмических воздействий в течение 50 лет. Этим вероятностям отвечают периоды повторения сейсмических воздействий один раз в 500, 1000, 2500 и 5000 лет, соответственно.

Сейсмический эффект на дневной поверхности определяется не только глубинными тектоническими условиями (близость к активным разломам, величина их сейсмического потенциала, кинематический тип подвижек в очагах землетрясений), но и инженерно-геологическим строением верхней грунтовой толщи, которая в зависимости от своих физико-механических свойств может увеличивать или уменьшать амплитуду сейсмических колебаний.

Карты детального сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана, на которых сейсмическая опасность выражается в баллах макросейсмической шкалы, относятся к средним грунтовым условиям территории Узбекистана (см. рис. 8, I).

По действующим в республике строительным нормам – это грунты II категории по сейсмическим свойствам,

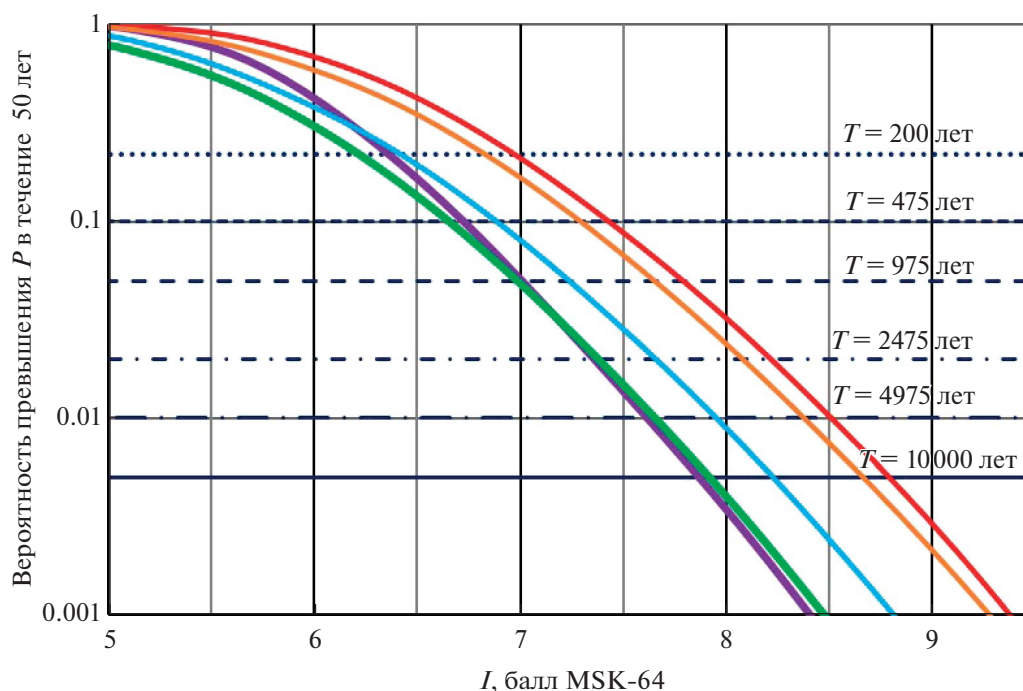


Рис. 9. Кривые сейсмической опасности в показателях макросейсмической интенсивности для городов Гулистан, Джизак, Самарканд, Карши, Термез в Центральном и Южном Узбекистане.

Обозначена (линии) сейсмическая опасность территорий городов и их окрестностей: Гулистан (фиолетовым); Джизак (красным); Самарканд (оранжевым); Карши (бирюзовым); Термез (зеленым)

Карты сейсмического районирования в значениях максимальных ускорений построены для различных типов грунтов, распространенных на исследуемой территории (см. рис. 8, II).

Дифференциация грунтовых условий в данном исследовании проводилась через параметр V_{S30} , характеризующий скорость прохождения поперечных сейсмических волн в верхней 30-метровой грунтовой толще.

Приведены кривые опасности в значениях макросейсмической интенсивности и в значениях максимальных ускорений для столиц областей, расположенных на исследуемой территории городов Гулистан, Джизак, Самарканд, Карши и Термез (рис. 9, рис. 10).

По оси абсцисс отложена величина сейсмического воздействия, а по оси ординат – вероятность его превышения в течение 50 лет. Горизонтальным линиям соответствуют различные периоды повторения сейсмических воздействий (см. рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования показали, что условия формирования современного структурного плана Центрального и Южного Узбекистана значимо от-

личаются между собой. В Центральном Узбекистане наиболее активными являются разломы северо-западного простирания и вероятным направлением стрессовых напряжений, сформировавших неотектонические структуры, является северо-восточное.

В пределах Южного Узбекистана в формировании современного структурного плана и напряженного состояния сейсмогенных участков земной коры более активно участвуют разломы северо-восточного и субширотного направления. Стрессовые напряжения здесь имеет северо-западное и близмеридиональное простирание.

Установленные различия в направлении стрессовых напряжений, сформировавших неотектонические структуры Центрального и Южного Узбекистана, подтверждаются результатами реконструкций современного напряженного состояния земной коры методами катакластического анализа разрывных смещений по механизмам очагов землетрясений [22]. По результатам проведенных реконструкций для исследуемого района установлено пространственное положение азимутов и углов погружения осей главных напряжений [56].

При общей для Центрального и Южного Узбекистана близ вертикальной направленности оси минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного

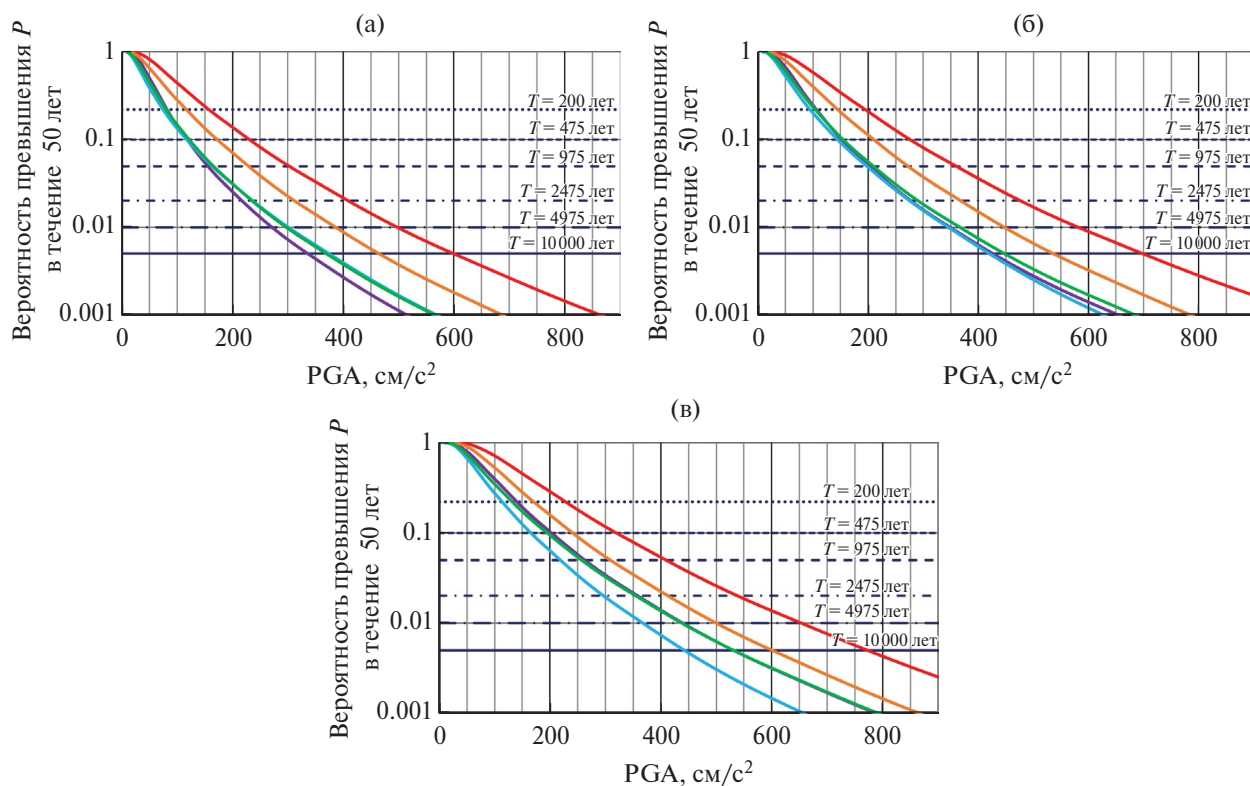


Рис. 10. Кривые сейсмической опасности городов Центрального и Южного Узбекистана в значениях величин максимальных ускорений колебаний грунта по сейсмическим свойствам.

Категории грунта: (а) – I; (б) – II; (в) – III.

Обозначена (линии) сейсмическая опасность территорий городов и их окрестностей: Гулистан (фиолетовым); Джизак (красным); Самарканд (оранжевым); Карши (бирюзовым); Термез (зеленым)

растяжения), азимут простирания оси максимального сжатия σ_3 в Центральном Узбекистане имеет близ меридиональное, а в Южном Узбекистане – близширотное направление.

В обоих случаях угол погружения оси максимального сжатия не превышает 10–20°. По классификации геодинамических типов напряженного состояния земной коры [22], такое пространственное положение осей главных напряжений соответствует тому, что исследуемая территория находится в режиме горизонтального сжатия.

Помимо разломов, ориентированных вдоль простирания основных структурных элементов Центрального и Южного Узбекистана в данном исследовании выделены разломы более низкого ранга, развивающиеся в поперечном направлении. До настоящего времени их роль в формировании современного структурного плана и проявлении современной сейсмичности изучаемой территории не оценивались. Приуроченность очаговых зон сильных землетрясений к местам пересечения зон

активных разломов различных направлений свидетельствует о необходимости их учета при оценке сейсмической опасности.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам.

1. Интенсивные, контрастные движения, сформировавшие современный структурный план региона Центрального и Южного Узбекистана, начались с этапа новейшей эпиплатформенной активизации. Ими обусловлено формирование морфоструктур, возникновение молодых и возобновление древних разломов, по которым происходили перемещения. Наиболее активными на территории Центрального Узбекистана являются разломы северо-западного простирания. Наиболее вероятным направлением стрессовых напряжений, сформировавших неотектонические структуры данной территории, является северо-восточное направление. На территории Южного Узбекистана

активные разломы в основном ориентированы на северо-восток и наиболее вероятным направлением стрессовых напряжений является северо-западное направление.

2. Для субширотных неотектонических структур Южно-Тянь-Шаньского постплатформенного орогенеза, стрессовые напряжения имеют субмеридиональное направление. Разломы, ориентированные в северо-восточном направлении, усложняют строение крупных региональных структур. Эти разломы в пределах Центрального Узбекистана имеют второстепенное значение при формировании современной деформационной структуры земной коры региона.

Построена схема активных разломов земной коры и уточнены границы сейсмогенерирующих зон территории Центрального и Южного Узбекистана.

3. На основе полученных сейсмотектонических и сейсмологических данных построено пять альтернативных расчетных моделей сейсмических источников для оценки сейсмической опасности территории Центрального и Южного Узбекистана:

- модель площадных источников;
- модель сейсмогенных зон;

— три модели активных разломов земной коры с различной степенью достоверности проявления современной геодинамической активности в новейший период.

4. Проведена сейсмологическая параметризация построенных моделей сейсмических источников, включающая определение сейсмического потенциала, параметров повторяемости землетрясений различных магнитуд, преобладающего кинематического типа подвижки в очагах для каждого источника.

5. Разработаны вероятностные карты детального сейсмического районирования территории Центрального и Южного Узбекистана, выражающие сейсмическую опасность в баллах макросейсмической шкалы и в физических параметрах сейсмических колебаний.

Благодарности. Авторы благодарны рецензенту А.И. Маневичу (ГЦ РАН, г. Москва, Россия) и анонимному рецензенту за полезные комментарии и редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках бюджетного финансирования фундаментальных и прикладных исследований Академии наук Республики Узбекистан, при поддержке Фонда сейсмологии, обеспечения сейсмостойко-

сти сооружений и сейсмической безопасности при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. — Отв. ред. К.Н. Абдуллабеков — Ташкент: Фан, 2012. 254 с.
2. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Кучкаров К.И., Мирзаев М.А. Количественные характеристики сейсмической опасности территории Узбекистана в максимальных значениях скоростей колебаний грунта и в их спектральных амплитудах // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1173–1188. Doi: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0389>
3. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Модели макросейсмического поля землетрясений Центральной Азии и их влияние на результирующие оценки сейсмической опасности // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 606–623. Doi: <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0494>
4. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Фадинова Р.П. Оценка сейсмической опасности территории Узбекистана. — В сб.: *Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане*. — Отв. ред. К.Н. Абдуллабеков — Ташкент: ГП “Институт ГИДРОИНГЕО”, 2002. С. 37–58.
5. Бабаев А.Г., Надыршин Р.И. Мезо-Кайнозойский этап. — В сб.: *Геология СССР*. — Т. XXIII — Кн. 2 — *Узбекская ССР*. — Под ред. А.В. Сидоренко — М.: Наука, 1972. С. 325–346.
6. Бабаев А.М., Мирзобоев К.М. Сейсмогенные зоны Таджикистана. — В сб.: *Сейсмотектоника некоторых районов юга СССР*. — Отв. ред. И.Е. Губин — М.: Наука, 1976. С. 105–118.
7. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. Doi: [10.5800/GT-2017-8-4-0314](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314)
8. Бутовская Е.М., Фленова М.Г., Атабаев Х.А. Региональные сейсмологические исследования. — В сб.: *Земная кора Узбекистана*. — Отв. ред. И.Х. Хамрабаев — Ташкент: Фан, 1974. С. 21–37.
9. Горбунова И.В. Построение карт активности с постоянной точностью. — В сб.: *Экспериментальная сейсмика*. — Под ред. Ю.В. Ризниченко — М.: АН СССР, 1964. С. 138–147.
10. Губин И.Е. Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. — Отв. ред. Е.Ф. Саваренский, Д.А. Туголесов — М.: АН СССР, 1960. 464 с.
11. Гумбель З. Статистика экстремальных значений. — Под ред. Д. М. Чибисова (перевод с английского) — М.: Мир, 1965. 451 с.
12. Давлятов Ш. Д. Тектоника нефтегазоносных районов Западного Узбекистана. — Под ред. А.М. Акрамходжаева — Ташкент: Фан, 1971. 176 с.

13. Зияудинов Ф.Ф., Садыков Ю.М. Количественная оценка сейсмической опасности Западного Узбекистана по геолого-геофизическим данным. — Отв. ред. Р.Н. Ибрагимов — Ташкент: Фан, 1987. 152 с.
14. Зуннунов Ф.Х. Литосфера Средней Азии по сейсмическим данным. — Под ред. Н.И. Павленковой — Ташкент: Фан, 1985. 106 с.
15. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования. — В сб.: *Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане*. — Отв. ред. К.Н. Абдуллабеков — Ташкент: ГП “Институт ГИДРОИНГЕО”, 2002. С. 59–74.
16. Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Аиуоров С.Х. Вероятностные оценки сейсмической опасности территории Узбекистана в показателях макросейсмической интенсивности, основанные на ранжировании законов затухания сейсмических воздействий с расстоянием // Проблемы сейсмологии. 2023. Т. 5. № 1. С. 5–17.
17. Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. Современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана по данным сборного каталога механизмов очагов землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 435–454. Doi: <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
18. Мокрушина М.Г., Вакарчук Р.Н., Татевосян Р.Э. О некоторых сильных землетрясениях Средней Азии во второй половине XIX в. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 2. С. 45–63. <https://static.ifz.ru/10.21455/VIS2020.2-3>
19. Национальный атлас Узбекистана. Охрана природных условий и ресурсов, экологии и окружающей среды Республики Узбекистан. — Под ред. А.А. Абдухитов — Ташкент: Кадастровое агентство при Государственном налоговом комитете Республики Узбекистан, 2020. Т. 1. 192 с.
20. Писаренко В.Ф. Статистическое оценивание максимально возможных землетрясений // Физика Земли. 1991. № 9. С. 38–47.
21. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений. — В сб.: *Методы детального изучения сейсмичности*. — Под ред. Ю.В. Ризниченко — М.: АН СССР, 1960. С. 75–114.
22. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. — Под ред. М.В. Грачева — М.: Академкнига, 2007. 406 с.
23. Резвой Д.П., Алексеев А. В. Развитие глубинных разломов в течение мезозоя–палеогена и неогена–антропогена. — В сб.: *Глубинные разломы Южного Тянь-Шаня*. — Под ред. Д.П. Резвого — Львов: ЛьвовскГУ, 1973. С. 78–90.
24. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. — Отв. ред. С.Л. Соловьев — М.: АН СССР, 1985. 407 с.
25. Таль-Вирский Б.Б. Геофизическая поля и тектоника Средней Азии. — Под ред. В.Н. Никитиной — М.: Недра, 1982. 271 с.
26. Фленова М.Г., Иванова Е.Г. Сейсмический режим Западного и Южного Узбекистана — В сб.: *Сейсмичность территории Узбекистана*. — Отв. ред. К.Н. Абдуллабеков. — Ташкент: Фан, 1990. С. 130–141.
27. Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. — В сб.: *Сейсмическое районирование СССР*. — Под ред. С.В. Медведева — М.: Наука, 1968. С. 95–111.
28. Шебалин Н.В. О предельной магнитуде и предельной балльности землетрясений // Физика Земли. 1971. № 6. С. 12–20.
29. Штейнберг В.В., Пономарева О.Н. О размерах очагов сильных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. С. 63–72.
30. Якубов Д. Х., Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Региональные разломы Срединного Южного Тянь-Шаня. — Под ред. Г.А. Мавлянова — Ташкент: Фан, 1976. 146 с.
31. Якубов М.С., Соколов М.В. Анализ эффективности сети сейсмических станций Узбекистана на основных этапах ее развития. — В сб.: *Сейсмичность территории Узбекистана*. — Отв. ред. К.Н. Абдуллабеков — Ташкент: Фан, 1990. С. 19–28.
32. Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions // Earthquake Spectra. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 1025–1055.
33. Anderson, J.G., Luco, J.E. Consequences of slip rate constants on earthquake occurrence relations // Bull. Seism. Soc. Am. 1983. Vol. 73. P. 471–496.
34. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Study of modern seismic zoning maps’ accuracy (case for Eastern Uzbekistan) // Geodes. Geodynam. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 416–424. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.04.015>
35. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Complex of general seismic zoning maps OSR-2017 of Uzbekistan // Geodes. Geodynam. 2020. Vol. 11. Is. 4. P. 273–294. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.03.004>
36. Atkinson G.M., Boore D.M. Earthquake ground-motion prediction equations for Eastern North America // Bull. Seism. Soc. Am. 2006. Vol. 96. No. 6. P. 2181–2205. Doi: <https://doi.org/10.1785/0120050245>
37. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrahmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity prediction equations for Central Asia // Geophys. J. Int. 2011. Vol. 187. P. 327–337. Doi: [10.1111/j.1365-246X.2011.05142.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05142.x).
38. Bungum H. Numerical modelling of fault activities // Comp. Geosci. 2007. Vol. 33. Is. 6. P. 808–820.
39. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 Ground Motion Model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 % damped linear acceleration response spectra // Earthquake Spectra. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 1087–1115.
40. Chen Y-S., Weatherill G., Pagani M., Cotton F. A transparent and data-driven global tectonic regionalization model for seismic hazard assessment // Geophys. J. Int. 2018. Vol. 213. Is. 2. P. 1263–1280. Doi: <https://doi.org/10.1093/gji/ggy005>
41. Chiou B. S., Youngs R. R. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of

- peak ground motion and response spectra // *Earthquake Spectra*. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 1117–1153.
42. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1968. Vol. 58. P. 1583–1606.
 43. Hanks T. C., Bakun W. H. M-logA observations for recent large earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2008. Vol. 98. No. 1. P. 490–494. Doi:10.1785/0120070174
 44. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Ashurov S.H. Comparison of seismic hazard assessments obtained within the probabilistic and probabilistic-deterministic approaches for the territory of Uzbekistan // *Seism. Instruments*. 2022. Vol. 58. No. S1. P.21–35. Doi: 10.3103/S0747923922070040
 45. Kanamori H., Anderson D.L. Amplitude of the earth's free oscillations and long-period characteristics of the earthquake source // *J Geophys Res.* 1975. Vol. 80. No. 8. P. 1075–1078. Doi: 10.1029/JB080i008p01075
 46. Knopoff L., Gardner J. Is the sequence of earthquakes in Southern California with aftershocks removed poissonian? // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1974. Vol. 64. No. 5. P.1363–1367.
 47. Kovesligethy R. Seismischer Starkegrad und Intensität der Beben. // *Gerlands Beiträge zur Geophysik*. 1907. Vol. 8. P. 22–29.
 48. Leonard M. Earthquake Fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2010. Vol. 100. Is. 5A. P. 1971–1988. Doi:10.1785/0120090189
 49. Leonard M. Self-consistent earthquake fault-scaling relations: update and extension to stable continental strike-slip faults // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2014. Vol. 104. Is. 6. P. 2953–2965.
 50. McGuire, R. K. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. — Ed. by M.S. Agabian, (EERI Publ., Earthquake Engineer. Res. Inst., Oakland, California, USA. 2004), 240 p.
 51. Mikhailova N.N., Mukambayev A. S., Aristova I. L., Kulakova G., Ullah S, Pilz M., Bindi B. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 // *Ann. Geophys.* 2015. Vol. 58. No. 1. Art. S0102. Doi:10.4401/ag-6681
 52. Nowroozi A. Empirical relations between magnitude and fault parameters for earthquake in Iran // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1985. Vol. 75. No. 5. P. 1327–1338.
 53. Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. CRISIS2007. — Program for Computing Seismic Hazard. — (Institute of Engineering UNAM, Mexico, 2007), URL: www.iingen.unam.mx (Accessed March 2016).
 54. Poggi V., Silacheva N., Ischuk A., Ibragimov R., Ismailov V., Abdrakhmatov K., Kobuliev Z., Karayev J., Parolai S., Bazzurro P. Development of an improved PSHA model for Central Asia. — In: *Proc. 3rd Europ. Conf. on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES)* Sept. 4-9 2022, Bucharest, Romania. P. 3900–3905.
 55. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Seism. Res. Lett.* 2007. Vol. 78. No. 6. P. 579–590.
 56. Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismically active areas // *Seism. Instruments*. 2020. Vol. 56. P. 679–700. Doi: <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.
 57. Scherbaum F., Cotton F., Smit P. On the use of response spectral-reference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: The case of rock motion // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2004. Vol. 94. No. 6. P. 341–348.
 58. Scherbaum F., Delavaud E., Riggelsen, C. Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2009. Vol. 99. P. 3234–3247.
 59. Shebalin N.V. Macro seismic data as information on source parameters of large earthquakes // *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1972. Vol. 6. No. 4. P. 316–323. Doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(72\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90016-7).
 60. Ullah Sh., Bindi D., Pilz M., Danciu L., Weatherill G., Zuccolo E., Ischuk A., Mikhailova N., Abdrakhmatov K., Parolai S. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia // *Ann. Geophys.* 2015. Vol.58. Spec. Is. 1. Art. S0103. Doi:10.4401/ag-6687.
 61. Ulomov V.I. Seismic hazard of Northern Eurasia // *Ann. Geophys.* 1999. Vol. 42. No. 6. P. 1023–1038. Doi: <https://doi.org/10.4401/ag-3785>
 62. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974–1002.
 63. Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1985. Vol. 75. P. 939–964.
 64. *Catalog of Earthquakes in Uzbekistan and Adjacent Territories*, <http://smrm.uz/jamlanma> (Accessed May 1, 2024).
 65. *GMPE*, <https://docs.gempa.de/sigma/current/base/sigma-gmpes.html> (Accessed May 1, 2024).
 66. *GMPE*, <http://www.gmpe.org.uk/> (Accessed May 1, 2024).
 67. *AFEAD*, http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html (Accessed May 5, 2022).

Seismotectonics of Central and Southern Uzbekistan and Assessment of Seismic Hazard of Its Territory

R. S. Ibragimov^{a, *}, T. L. Ibragimova^a, U. A. Nurmatov^a, Yu. M. Sadykov^a, M. A. Mirzaev^a,
S. Kh. Ashurov^a

^a*Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
bld. 3, st. Zulfiyakhanum, 100028 Tashkent, Uzbekistan*

**e-mail: ibrroma@yandex.ru*

The seismotectonic position of the territory of Central and Southern Uzbekistan is analyzed. It is shown that the territory is characterized by a layered-block structure. Four large blocks of the earth's crust are distinguished. Two blocks belong to the Turan microplate, the remaining blocks belong to the West Tian-Shan and Afghan–Tajik microplates. Positive and negative morphostructures of each geodynamic block are described. Active faults of the earth's crust in three different directions are distinguished. In the central part of Uzbekistan, the most active are faults of the north-west strike. These faults are characterized by a long history of development, complex internal structure, high values of the amplitudes of neotectonic movements. Fault troughs are confined to such faults. Newly emerged faults of the north-east direction complicated the structure of large regional structures. If within Central Uzbekistan these faults were of secondary importance in the formation of the modern deformation structure of the earth's crust in the study region, then in the territory of Southern Uzbekistan faults of this direction are the main ones and control modern seismicity. A probabilistic analysis of the seismic hazard of the territory of Central and Southern Uzbekistan is carried out. Three types of calculation models of seismic vibrations sources are considered: quasi-homogeneous seismological provinces, active faults of the earth's crust and seismogenic zones. Parameterization of seismic source models is carried out, including the determination of seismic potential, recurrence parameters of earthquakes of various magnitudes, the predominant kinematic type of slip in the foci of earthquakes of each source.

The calculation of seismic impacts is carried out using several attenuation dependencies developed for the Central Asian region. The weights for the attenuation dependencies are selected based on the ranking procedure according to the degree of applicability to the study area. An assessment of seismic hazard in engineering parameters of seismic vibrations was carried out. Taking into account the recurrence periods of seismic impacts, probabilistic maps of detailed seismic zoning of the territory of Central and Southern Uzbekistan were developed.

Keywords: active faults, seismotectonics, seismic hazard, macroseismic intensity, kinematics of movements, layered block structure, seismic zoning