

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ, СЕЙСМИЧНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Т.У. Артиков¹, Р.С. Ибрагимов¹, Т.Л. Ибрагимова¹, М.А. Мирзаев¹, Ю.Л. Ребецкий²

¹Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН Республики Узбекистан,
Ташкент, ул. Зулфияхоним, 3, Узбекистан

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

Алгоритмами метода катакlastического анализа разрывных смещений (МКА) с использованием сборного каталога механизмов очагов землетрясений исследовано современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана. Для большей части исследуемой территории ось максимального сжатия близгоризонтальна и ортогональна простиранию тектонических структур, угол погружения оси минимального сжатия сильно варьирует для различных участков территории. Площадное распределение коэффициента Лодэ—Надаи свидетельствует о преобладании для исследуемой территории напряженного состояния, близкого к чистому сдвигу. Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся территория Узбекистана характеризуется геодинамическим типом напряженного состояния, отвечающего горизонтальному сжатию. Установлены значимые различия в параметрах напряженного состояния для различных глубинных слоев земной коры.

С учетом представительных сроков регистрации сейсмических событий различного энергетического уровня определены параметры повторяемости землетрясений для всей территории в целом и крупных сейсмоактивных зон. Установлено, что эпицентры сильных землетрясений, зарегистрированные начиная с исторического периода времени, группируются в компактных областях с линейными размерами 50—80 км. Тектонофизическая интерпретация выделенных областей дается в рамках МКА, где отмечается, что сильные землетрясения реализуются в основном в областях пониженных значений эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. Это связано с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, что создает наиболее благоприятные условия для крупномасштабного разрушения. По результатам реконструкции природных напряжений МКА такие области на территории Узбекистана выделены в пределах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон, а также в районе Газли. Проведена оценка текущей сейсмологической обстановки в выделенных областях долгосрочного прогноза комплексом прогностических параметров сейсмического режима, и составлена карта областей ожидаемой сейсмической активизации. Анализ предшествующих прогнозных карт, разработанных в рамках излагаемого подхода, показал их высокую информативность.

Механизм очагов землетрясений, реконструкция поля напряжений, оси главных напряжений, геодинамический тип напряженного состояния, долгосрочный прогноз землетрясений, параметры сейсмического режима, сейсмическая активизация, сейсмическое затишье

STRESS STATE OF THE EARTH'S CRUST, SEISMICITY, AND PROSPECTS FOR LONG-TERM FORECAST OF STRONG EARTHQUAKES IN UZBEKISTAN

T.U. Artikov, R.S. Ibragimov, T.L. Ibragimova, M.A. Mirzaev, Yu.L. Rebetsky

The current stress state of the Earth's crust on the territory of Uzbekistan is studied using algorithms from the cataclastic analysis of displacements (CAD) with the application of a combined catalog of earthquake source mechanisms. The axis of maximum compression is nearly horizontal and orthogonal to the strike of tectonic structures for the larger part of the area under study, and the angle of penetration of the axis of minimum compression varies greatly for different parts of the territory. The areal distribution of the Lode—Nadai coefficient indicates the predominance of a stress state close to pure shift for the area under study. Without differentiation of the seismically active bed by depth, almost the entire territory of Uzbekistan is characterized by a geodynamic stress state corresponding to horizontal compression. There are significant differences in the stress state parameters for different deep beds of the Earth's crust.

With account for the representative recording periods of seismic events of different energy levels, the earthquake recurrence parameters for the entire territory as a whole and large seismically active zones are determined. It has been established that the epicenters of strong earthquakes recorded since the historical time are grouped in compact areas with linear dimensions of 50–80 km. The tectonophysical interpretation of the selected areas is given within the framework of the CAD, in which it is noted that strong earthquakes occur mainly in areas of lower effective confining pressure and maximum tangent stresses. This is due to the fact that the val-

ues of friction forces at faults in such areas are low, which creates the most favorable conditions for large-scale destruction. According to the results of the reconstruction of the natural stresses of the CAD, such areas on the territory of Uzbekistan are identified within faults and flexural-fault zones in South Fergana and North Fergana, as well as in the Gazli region. The current seismological situation in the selected areas of long-term forecast is estimated using a set of prognostic parameters of the seismic regime, and a map of the areas of expected seismic activity is compiled. The analysis of previous forecast maps developed within the framework of the presented approach shows high value in their information.

Earthquake source mechanism, stress field reconstruction, principal stress axes, geodynamic stress state, long-term earthquake prediction, seismic regime parameters, seismic activation, seismic quiescence

ВВЕДЕНИЕ

На современных картах сейсмического районирования выделяют зоны, в которых значения сейсмических воздействий с заданной вероятностью не будут превышены указанных в течение 50—100 лет. Вопрос о том, какие из сейсмоопасных областей могут проявить себя сейсмической активизацией в ближайшие годы, требует дополнительных исследований, основанных на выявлении особенностей напряженного состояния земной коры исследуемого региона, динамики протекания сейсмического процесса в очаговых зонах сильных землетрясений, направленности его протекания в сейсмоактивных зонах, выявлении взаимосвязи между периодами сейсмической активизации различных сейсмоактивных структур региона с учетом их характерных размеров. Существование аномальных изменений в параметрах сейсмического режима в период подготовки сильных землетрясений следует считать на сегодняшний день твердо установленным фактом, поскольку данные исследования опираются на значительную статистику наблюдений в различных сейсмоактивных регионах мира и имеют надежную метрологическую основу. К настоящему времени разработано множество алгоритмов долгосрочного прогноза сильных землетрясений, базирующихся на анализе временных флуктуаций параметров сейсмического режима перед сильными землетрясениями: КН (Калифорния—Невада), М8 (магнитуда 8), МSc (сценарий Мендосино), ФОП (фортран обобщенный портрет), КОЗ (карта ожидаемых землетрясений), RTL (произведение трех прогностических функций: эпицентральной — R ; временной — T ; энергетической — L) и др. [Кейлис-Борк и др., 1980; Аллен и др., 1984, 1986; Кособоков, Хохлов, 1993; Соболев, 1993; Завьялов и др., 1995; Завьялов, 2006; Соболев и др., 2009; Артиков и др., 2017; Artikov et al., 2018]. Вместе с тем каждый из них нуждается в адаптации к региональным особенностям сейсмичности той территории, для которой он применяется. Детальный анализ ряда из перечисленных алгоритмов содержится в [Завьялов, 2006].

В статье излагается подход к выявлению областей ожидаемой сейсмической активизации, апробация которого в режиме реального времени проводилась на протяжении последних нескольких лет для территории Узбекистана. Суть его в следующем. На первом этапе в пределах сейсмоактивных зон выделялись пространственные области, в которых отмечалась высокая сейсмическая активность на уровне сильных землетрясений за исторический и инструментальный период времени. Это области интенсивного дробления земной коры, и они определяют, пользуясь терминологией Ю.В. Ризниченко [1985], современный сейсмический «климат» исследуемой территории. Оказалось, что выделенные области достаточно устойчиво сохраняют свою конфигурацию начиная с исторического периода времени (последние 2—3 тысячи лет). Делается предположение, что и в ближайшие десятилетия эти области проявят себя высокой сейсмической активностью. Существование областей, в которых реализованы наиболее благоприятные условия для крупномасштабного разрушения, обосновывается в методе катаклизмического анализа разрывных смещений (МКА), разработанном для реконструкции современного напряженного состояния земной коры на основе сейсмологических и геологических индикаторов напряжений, и в рамках которого проводится тектонофизическое районирование активных разломов земной коры по степени их сейсмической опасности [Rebetsky, Kuzikov, 2016]. В данном исследовании такого районирования не проводилось. Вместе с тем по результатам проведения двух этапов реконструкции природных напряжений алгоритмами МКА для исследуемой территории удалось выявить достаточно протяженные участки в сейсмоактивном слое, расположенном ниже 10 км, в которых отмечаются пониженные значения эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства). Экспериментальные данные для различных сейсмоактивных регионов свидетельствуют, что значительная часть сильных землетрясений реализуется именно на участках с такими свойствами [Rebetsky, Tatevossian, 2013; Ребецкий и др., 2016; Ибрагимов и др., 2020].

Оценка текущей сейсмологической обстановки в выделенных областях долгосрочного прогноза проводилась комплексом прогностических параметров сейсмического режима. По числу проявившихся

аномальных признаков области долгосрочного прогноза ранжировались по вероятности возникновения в них сильных землетрясений в течение ближайших нескольких лет, и составлялась соответствующая прогнозная карта. Прогноз осуществлялся в режиме реального времени. Анализ предшествующих карт областей ожидаемой сейсмической активизации, разработанных в рамках излагаемого методологического подхода, показал, что значительная часть произошедших событий реализовалась в областях, в которых вероятность их возникновения на карте оценивалась как «высокая» и «очень высокая». Вместе с тем стабильно большая доля таких областей, которые выделяются на всех разработанных прогнозных картах, несколько снижает эффективность долгосрочного прогноза и требует привлечения дополнительных информативных прогностических признаков, свидетельствующих о близости момента крупномасштабного разрушения.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория Узбекистана (рис. 1) располагается в центральной части Западного Тянь-Шаня между Центрально-Казахстанским щитом и Туранской плитой Урало-Сибирской платформы на севере и западе, Таримским блоком на востоке и Индийской платформой на юге. Восточная часть исследуемого рай-

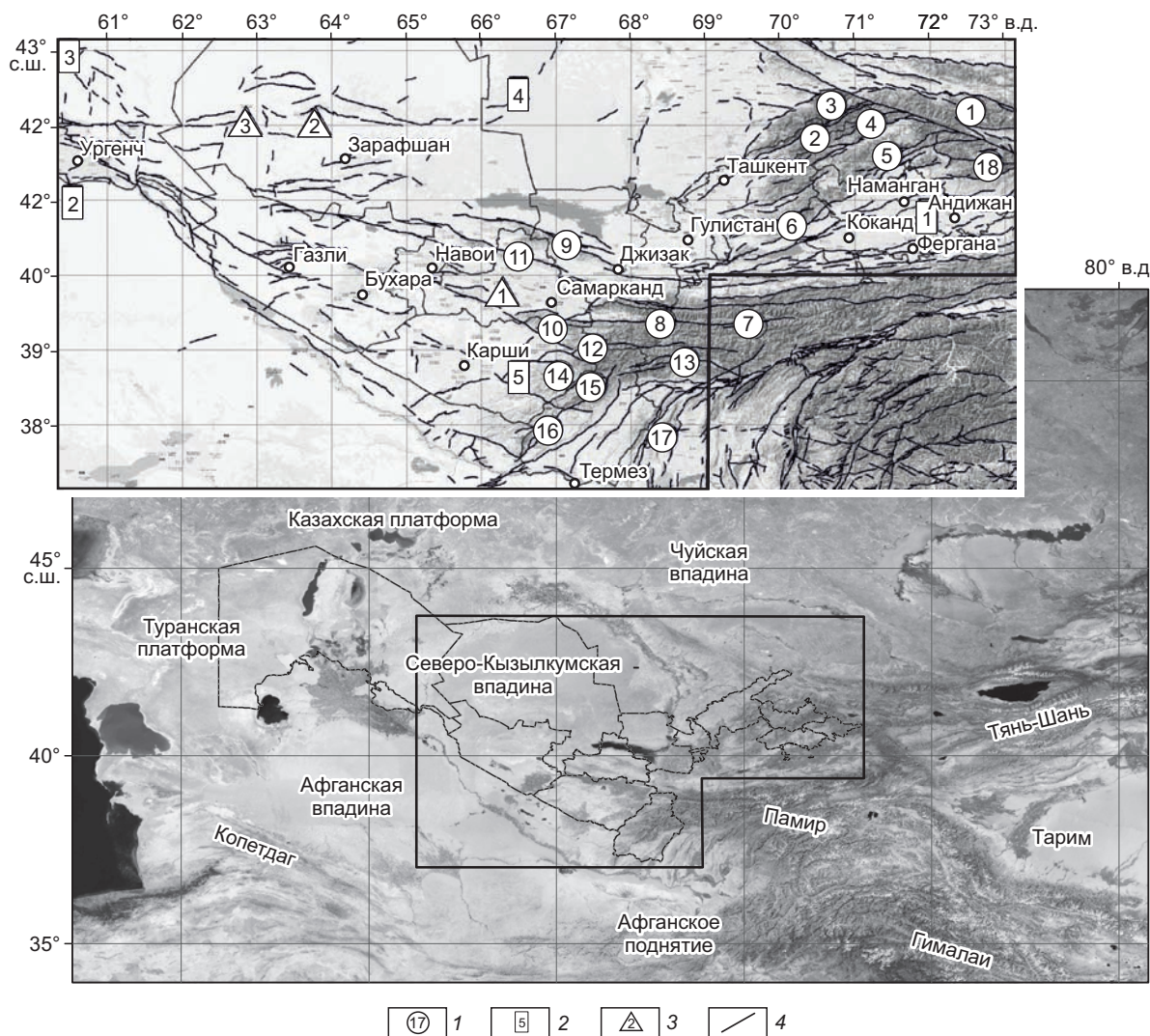


Рис. 1. Расположение исследуемого района в общей структуре территории Высокой Азии, его современный структурный план и активные разломы земной коры.

1 — хребты, цифры в кружках: 1 — Таласский; 2 — Угамский; 3 — Каржантау; 4 — Пскемский; 5 — Чаткальский; 6 — Кураминский; 7 — Туркестанский; 8 — Мальгузарский; 9 — Нурагинский; 10 — Зирабулак-Зиатдинский; 11 — Заравшанский; 12 — Габрынтау; 13 — Гиссарский; 14 — Байсунтау; 15 — Сурхантау; 16 — Кугитантау; 17 — Бабатаг; 18 — Ферганский; 2 — впадины, цифры в прямоугольниках: 1 — Ферганская; 2 — Амударьинская; 3 — Приаральская; 4 — Сырдарьинская; 5 — Кашкадарьинская; 3 — прогибы, цифры в треугольниках: 1 — Зарафшанский; 2 — Джамикумский; 3 — Мингбулакский; 4 — активные разломы земной коры.

она включает в себя горные системы Тянь-Шаня, Алая и Памира. К юго-западу от Узбекистана расположен Копетдагский горный массив Туркмено-Хорасанской горной системы [Уломов, 1974].

Геологические структуры Западного Тянь-Шаня (см. рис. 1) существенно различаются по рельефу, геологическому строению и истории геологического развития [Ибрагимов и др., 2002]. На востоке они представлены высокими горными складчатыми сооружениями, состоящими из палеозойских образований, межгорными и предгорными впадинами, покрытыми мезозойскими и кайнозойскими отложениями. На западе эти отложения с меньшей мощностью охватывают обширные равнины эпипалеозойской Туранской плиты, а палеозойские породы местами выступают в виде возвышенностей небольшого размера в пределах Кызылкумов. В пределах Туранской плиты выделяются Амударьинская, Сырдарьинская и Приаральская впадины. В эпиплатформенную орогеническую область входит система положительных и отрицательных структур, выраженных в рельефе в виде горных хребтов (Чаткало-Кураминских, Алай-Туркестанских, Заравшан-Гиссарских и др.), межгорных (Ферганская, Сурхандарьинская) и предгорных (Ташкентско-Голодностепская, Кашкадарьинская) впадин и разделяющих их зон разрывных нарушений [Ибрагимов и др., 2002]. Всюду в последующем изложении данной работы используется схема активных разломов земной коры, заимствованная из [Бачманов и др., 2017].

По геолого-геофизическим данным в пределах исследуемой территории мощность земной коры изменяется от 40 км на северо-западе (район Приаралья) до 55 км (Ферганская долина).

СЕЙСМИЧНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ

Проявления сейсмичности на территории Узбекистана неразрывно связаны с сейсмической активностью всего Центрально-Азиатского региона [Уломов, 1974; Artikov et al., 2015; Артиков и др., 2019]. Подавляющее большинство сильных землетрясений происходит в достаточно узких протяженных сейсмоактивных зонах, направление которых совпадает с простиранием крупных глубинных разломов, разграничивающих блоки земной коры. В пределах Центрально-Азиатского региона выделяется несколько высокопотенциальных сейсмоактивных зон, где достаточно часто происходят землетрясения с магнитудой $M \geq 7.0$ (рис. 2). Несколько крупных сейсмоактивных зон, способных генерировать сильные землетрясения, расположены непосредственно на территории Узбекистана. Они выделены на основе сейсмологических и сейсмотектонических данных [Ибрагимов и др., 2002; Artikov et al., 2015; Артиков и др., 2019; Атабеков и др., 2021]. Все эти сейсмоактивные зоны расположены восточнее 63° в. д. К западу от этого меридиана (район Приаралья) территория считается практически асейсмичной, хотя, по историческим данным, здесь также происходили сильные землетрясения, наиболее известным из которых является землетрясение с магнитудой $M = 6.1$ в районе г. Ургенч. Оно датируется 1208-м годом.

Изучение сейсмичности территории Узбекистана проводилось на основе каталога землетрясений, составленного в Институте сейсмологии АН РУз. Региональный каталог землетрясений территории Узбекистана включает в себя параметры 13 627 исторических и инструментальных событий. В качестве основной характеристики для классификации землетрясений по величине в региональном каталоге длительное время (до 2003 г.) использовался энергетический класс землетрясений K , определяемый по сумме амплитуд объемных P - и S -волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой [Раутиан, 1960; Rautian et al., 2007]. Энергетический класс связан с высвобожденной при землетрясениях сейсмической энергией E зависимостью $K = \lg E$ (Дж). В различные временные промежутки двух последних десятилетий для количественной характеристики величины землетрясений использовались следующие типы магнитуд: M_b , M_{PVA} , M_s , M_{LH} . Связь между энергетическим классом землетрясения K и перечисленными типами магнитуд, присутствующими в региональном каталоге, осуществлялась на основе зависимостей [Мукамбаев, Михайлова, 2014], полученных для землетрясений Центральной Азии. Везде в дальнейшем тексте в качестве магнитуды M рассматривается магнитуда M_{LH} .

Анализируя площадное распределение эпицентров землетрясений территории Узбекистана (см. врезку, рис. 2) можно отметить, что восточнее Западно-Тяньшаньского линеамента, являющегося границей между горными сооружениями Тянь-Шаня и равнинной территорией Туранской плиты, сейсмическая активность как на уровне слабых и умеренных сейсмических событий с магнитудой $M < 5.0$ (серые кружки на карте), так и на уровне сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ (темные кружки), очень высокая, а западней этого линеамента — низкая [Artikov et al., 2020]. Повышенной плотностью эпицентров сильных землетрясений в Западном Узбекистане характеризуются районы Газли и Бухары. Несколько сильных землетрясений отмечено в районе Центральных Кызылкумов. Слабые и умеренные землетрясения с магнитудой $M < 5.0$ происходят в основном в верхнем (до 10—15 км) сейсмоактивном слое, а землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$, как правило, реализуются в сейсмоактивном слое, расположенном на глубинах ниже 10—15 км (см. гистограмму на рис. 2). На этом же рисунке показан график повторяемости землетрясений (зависимость Гутенберга—Рихтера) при их полумагнитудной классификации по величине, построенный с учетом сроков представительной регистрации землетрясений различного энергетического уровня [Якубов, Соколов, 1990]. В таблице 1 приведены средние

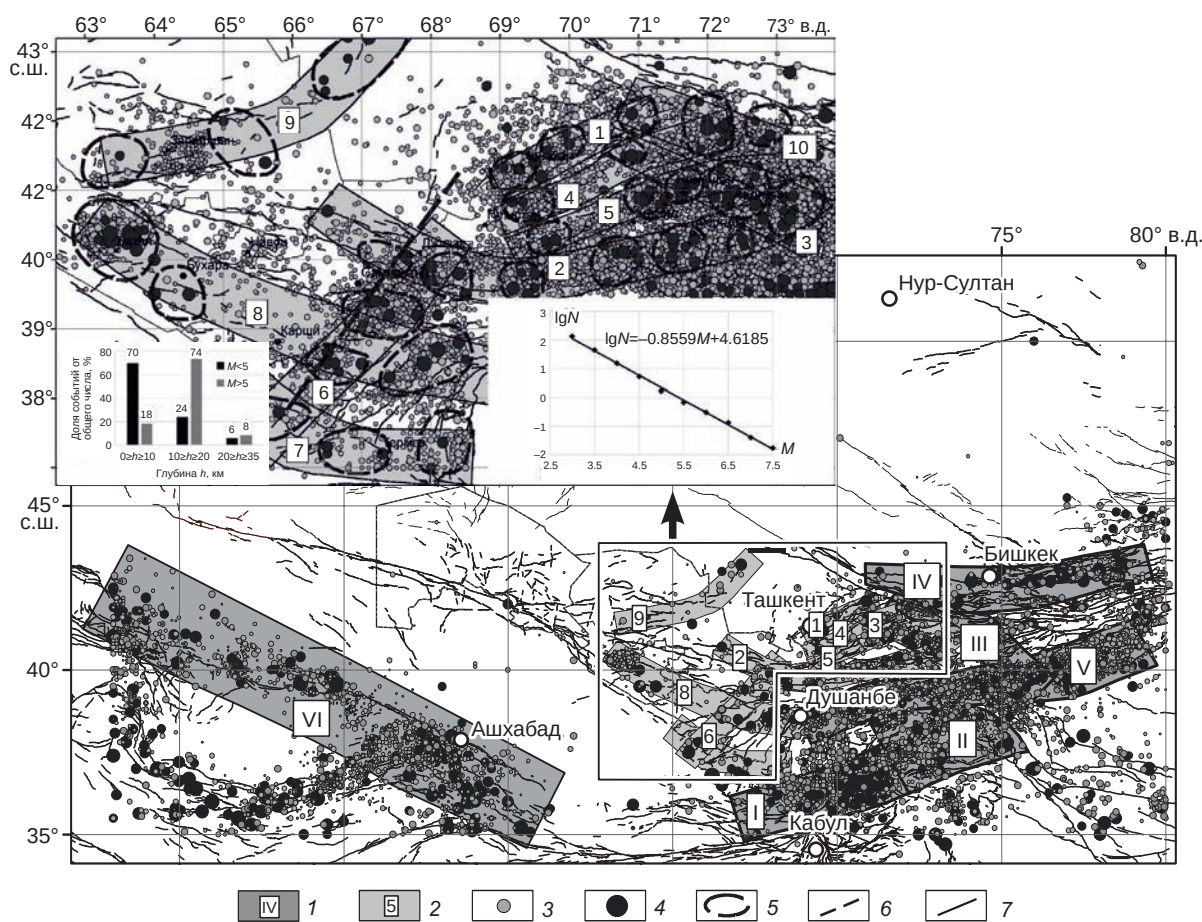


Рис. 2. Сейсмоактивные зоны и эпицентры землетрясений территории Центральной Азии и Узбекистана.

I — сейсмоактивные зоны, внешние по отношению к территории Узбекистана: I — Гиндукуш; II — Памир; III — Таласо-Ферганская; IV — Северо-Тяньшаньская; V — Южно-Тяньшаньская; VI — сейсмоактивный район Копетдаг. 2 — сейсмоактивные зоны, расположенные непосредственно на территории Узбекистана: 1 — Ташкентская; 2 — Южно-Ферганская; 3 — Восточно-Ферганская; 4 — Нурекатино-Ангренская; 5 — Северо-Ферганская; 6 — Южно-Узбекистанская; 7 — Амударьинская; 8 — Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны; 9 — Северо-Тамдынская зона. 3 — эпицентры землетрясений с магнитудой $M < 5$. 4 — эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 5$. 5 — области, в которых отмечалась высокая сейсмическая активность на уровне сильных (с $M \geq 5$) землетрясений начиная с исторического периода времени. 6 — Западно-Тяньшаньский линеамент. 7 — активные разломы земной коры.

В левом нижнем углу врезки — гистограммы распределения землетрясений с $M < 5$ и $M \geq 5$ по глубинам. В правом нижнем углу врезки — график повторяемости землетрясений на территории Узбекистана (зависимость Гутенберга—Рихтера).

для территории Узбекистана периоды повторения землетрясений с магнитудой большей или равной заданной в диапазоне от $M = 3.0$ до $M = 7.5$.

Зависимости Гутенберга—Рихтера для крупных сейсмоактивных зон территории Узбекистана приведены в табл. 2. В этой же таблице даны сведения о максимальной наблюдаемой магнитуде землетрясения, зарегистрированного в каждой зоне, дате его возникновения, времени последней активизации на уровне землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$, а также оценки вероятности сейсмической активизации в зоне на текущий момент времени в предположении, что сильные (с $M \geq 5.0$) землетрясения образуют пуассоновский поток событий. Как следует из табл. 2, по длительности сейсмической паузы между землетрясениями с магнитудой $M \geq 5.0$ наибольшей вероятностью очередной сейсмической активизации характеризуются Южно-Ферганская, Северо-Тамдынская сейсмоактивные зоны, а также Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тяньшаньской зоны.

Более детальную картину распределения областей с различной вероятностью возникновения сильного землетрясения (с $M \geq 5.0$) по длительности сейсмической паузы можно увидеть при делении сейсмоактивных зон на сегменты (рис. 3). Параметры повторяемости землетрясений в каждом сегменте сейсмоактивной зоны определялись по землетрясениям с магнитудами $M = 3.0$ — 5.0 . Глубина сейсми-

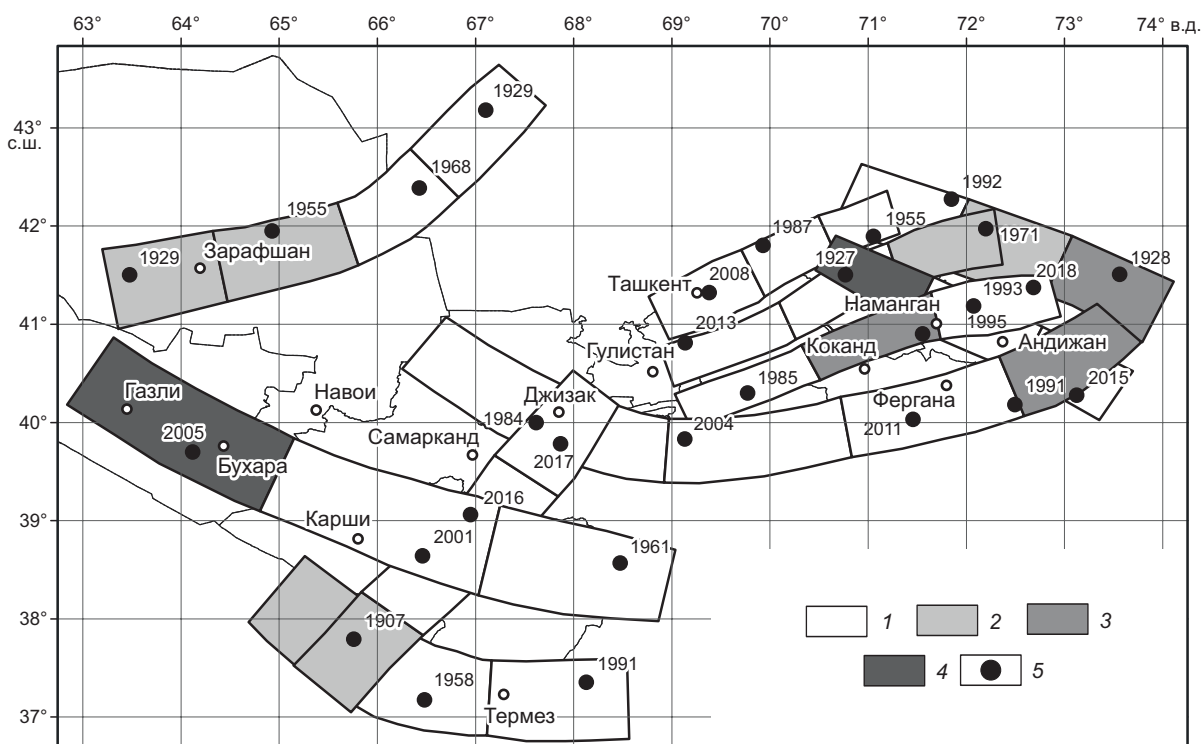


Рис. 3. Сегменты сейсмоактивных зон с различной длительностью сейсмической паузы (t) по землетрясениям с $M \geq 4.8$, выраженной в количестве периодов (T) повторения землетрясений этой магнитуды по зависимости Гутенберга—Рихтера.

1—4 — длительность сейсмической паузы: 1 — $t < T$; 2 — $T \leq t < 2T$; 3 — $2T \leq t < 3T$; 4 — $3T \leq t < 4T$. 5 — эпицентр последнего землетрясения с магнитудой $M \geq 4.8$ в сегменте сейсмоактивной зоны.

ческого затишья на приведенной карте характеризуется отношением интервала времени, в течение которого землетрясений с $M \geq 5.0$ в сегменте сейсмоактивной зоны не происходило, к среднему периоду повторяемости событий такого магнитудного уровня в этом сегменте, рассчитанному по зависимости Гутенберга—Рихтера. Данное отношение позволяет рассчитать вероятность возникновения очередного землетрясения с $M \geq 5.0$ на текущий момент времени. Наибольшей глубиной сейсмического затишья по длительности отсутствия сильных землетрясений характеризуются центральный и восточный сегменты Таласо-Ферганской сейсмоактивной зоны, где последние землетрясения с $M \geq 5.0$ происходили в 1971 г. и в 1928 г. На этих участках длительность сейсмической паузы по сейсмическим событиям составляет 2—3 средних периода повторения землетрясений такой силы. Велика вероятность возникновения сейсмической активизации по данному прогностическому признаку в северной части Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны, где последнее сильное землетрясение датируется 1927 г., а также в пределах западного участка Газли-Каратагского фрагмента Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны. Здесь последнее землетрясение с магнитудой $M = 5.1$ произошло в 2005 г. недалеко от г. Бухара, а период повторяемости землетрясений сильных землетрясений по зависимости Гутенберга—Рихтера не превышает 5—6 лет. Малый период повторяемости сильных землетрясений в данном сегменте связан с тем, что в него попадает очаговая область Газлийских землетрясений 1976 и 1984 гг., где длительное время происходил интенсивный афтершоковый процесс. Области, в которых активность на уровне слабых землетрясений достаточно высока, а разрядки в виде сильных землетрясений не происходит, представляют определенный интерес в плане долгосрочного прогноза сейсмической активизации. Вместе с

Таблица 1. Средняя частота возникновения землетрясений на территории Узбекистана с магнитудой, равной или превышающей различные значения

$M \geq 3.0$	$M \geq 3.5$	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$	$M \geq 7.0$	$M \geq 7.5$
5 дней	2 недели	1 месяц	3—4 месяца	9—10 месяцев	2 года	5—6 лет	14—15 лет	35—40 лет	100—110 лет

Таблица 2. Зависимости Гутенберга—Рихтера для крупных сейсмоактивных зон Узбекистана

Зона	Протяженность/ ширина, м	Параметр повторяемости землетрясений	$M_{\text{набл.}}^{\text{max}} /$ год	$T_{M>5}$, годы	$t_{\text{посл.}}$ с $M \geq 5$, год	P_{2021}
Ташкентская	240/50	$\lg N = -0.7392M + 2.6863$	6.7/1886	10.2	2008	0.691
Южно-Ферганская	700/50	$\lg N = -1.0208M + 4.433$	6.7/1897	4.7	2011	0.853
Восточно-Ферганская	300/50	$\lg N = -0.9981M + 4.1111$	6.2/1896	7.8	2015	0.483
Нурекатино-Ангренская	330/50	$\lg N = -0.834M + 3.1986$	7.5/1946	9.4	2013	0.527
Северо-Ферганская	360/50	$\lg N = -0.9537M + 4.145$	6.0/1927	4.2	2018	0.379
Южно-Узбекистанская	400/50	$\lg N = -0.7595M + 2.8635$	6.7/1897	8.6	2017	0.295
Амударьинская	350/50	$\lg N = -0.8197M + 2.604$	6.1/1907	31.2	1991	0.605
Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тяньшаньской зоны	550/50	$\lg N = -0.8936M + 3.8959$	7.4/1907	3.7	2005	0.982
Северо-Тамдынская	400/50	$\lg N = -0.5028M + 1.1651$	6.4/1929	22.3	1968	0.903
Таласо-Ферганская	300/50	$\lg N = -0.9346M + 3.6992$	7.5/1946	9.4	2016	0.346

Примечание. P — вероятность сейсмической активизации на 2021 г.

тем, учитывая, что сильные землетрясения происходят неравномерно во времени, делать прогноз, опираясь только на графики повторяемости землетрясений, безусловно, нельзя.

В результате анализа более 200 сейсмических событий с магнитудой $M \geq 4.8$, произошедших на исследуемой территории, были выявлены следующие статистические закономерности в проявлении последовательных сильных землетрясений, возникающих в пределах единой сейсмоактивной зоны [Artikov et al., 2018]. Для 65 % сейсмических событий временной интервал между двумя последовательными сильными землетрясениями не превосходит пяти лет и в равных долях (примерно по 10 %), временной интервал между двумя последовательными сейсмическими событиями составляет 6—10, 11—15 и 16—20 лет (рис. 4). Преобладание короткой (0—5 лет) сейсмической паузы между последовательными сейсмическими событиями свидетельствует, что землетрясения, возникающие в пределах сейсмоактивной зоны, происходят не равномерно во времени, а группируются в периоды сейсмической активизации. Это могут быть не только сильные афтершоки предыдущего землетрясения, но и самостоятельные толчки с магнитудой $M = 5.0$ и выше, происходящие последовательно в одном направлении на небольших расстояниях друг от друга, в результате чего мы наблюдаем так называемую миграцию землетрясений, а также одиночные события, возникающие на значительном удалении от произошедшего сильного землетрясения.

В пространственном положении очага последующего сильного землетрясения относительно местоположения предыдущего выявляется следующая статистическая закономерность. С увеличением промежутка времени между двумя последовательными сейсмическими событиями возрастает наиболее вероятное расстояние между ними (см. гистограмму на рис. 4). Если последующее сильное землетрясение происходит в первые пять лет после уже возникшего, то, вероятней всего, оно будет находиться на расстоянии до 70 км от него. Если следующее сильное землетрясение в сейсмоактивной зоне происходит во временном промежутке $T = 5—10$ лет после предшествующего, то с наибольшей вероятностью оно произойдет на расстояниях $R = 70—140$ км от него. И, наконец, если последующее сильное землетрясение в зоне возникает во временном промежутке $T = 10—15$ лет после предшествующего, то с наибольшей вероятностью оно произойдет на расстояниях $R = 140—210$ км от него.

Карта областей ожидаемой сейсмической активизации, построенная по эмпирическому распределению наиболее вероятных пространственно-временных интервалов реализации последующего сильного землетрясения относительно предыдущего, приведена на рис. 4. Наибольшей вероятностью ожидания сильного землетрясения по данному прогностическому признаку на территории Восточного Узбекистана характеризуется участок сочленения Южно-Ферганской и Восточно-Ферганской сейсмоактивных зон, а на территории Центрального Узбекистана — отдельные участки Южно-Узбекистанской, Южно-Ферганской сейсмоактивных зон и Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны. В этих областях происходили сильные землетрясения в период 2015—2018 гг.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Механизмы очагов и реконструкция современного напряженного состояния земной коры. Реконструкции природного напряженного состояния земной коры территории Узбекистана на основе фокальных механизмов очагов землетрясений проводились алгоритмами метода катакластического ана-



Рис. 4. Сегменты сейсмоактивных зон с различной вероятностью P возникновения сильного землетрясения по особенностям пространственно-временного распределения между двумя последовательными сейсмическими событиями с магнитудой $M \geq 4.8$, происходящими в пределах единой сейсмоактивной зоны.

1—5 — вероятность возникновения землетрясения: 1 — $P \geq 0.4$; 2 — $0.1 \leq P < 0.4$; 3 — $0.05 \leq P < 0.10$; 4 — $P < 0.05$. 5 — эпицентр последнего землетрясения с магнитудой $M \geq 4.8$ в сейсмоактивной зоне. Врезка — гистограмма распределения пространственно-временных интервалов между двумя последовательными сильными землетрясениями в пределах сейсмоактивной зоны.

лиза разрывных смещений, разработанными в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики ИФЗ РАН [Ребецкий, 2007а].

Каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана был сформирован на основе следующих данных:

- построений механизмов, опубликованных в сборниках «Землетрясения Средней Азии и Казахстана» [Землетрясения ..., 1981—1992];

- решений, полученных Е.М. Безродным [Безродный, Туйчиев, 1987] для ряда землетрясений с $M \geq 5.0$, произошедших на территории Узбекистана и прилегающих к нему территориях в период с 1946 по 1985 г.;

- выборки по территории Узбекистана из каталога механизмов очагов землетрясений Центральной Азии с энергетическим классом $K \geq 10$ ($M \geq 3.5$) за период с 1970 по 2005 г. (авторы каталога Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко), предоставленные заместителем директора по научной работе Института геофизического исследований МЭ РК Н.Н. Михайловой;

- выборки механизмов очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 3.0$ по территории, ограниченной координатами $37—43^\circ$ с. ш., $63—74^\circ$ в. д., за период с 1946 по 1992 г. из каталога Института физики Земли (ИФЗ) РАН. Для ряда землетрясений в данном каталоге приведено несколько решений, полученных разными авторами;

- выборки по территории Узбекистана из Гарвардского каталога СМТ механизмов очагов сильных (с $M_w \geq 5.0$) землетрясений [Eksrom, Nettles, 2014] за период с 1976 г. по настоящее время.

В результате унификации исходных данных, анализа различных решений для одних и тех же сейсмических событий и выбора среди них единственного наиболее вероятного был сформирован единый каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, включающий 1157 сейсмиче-

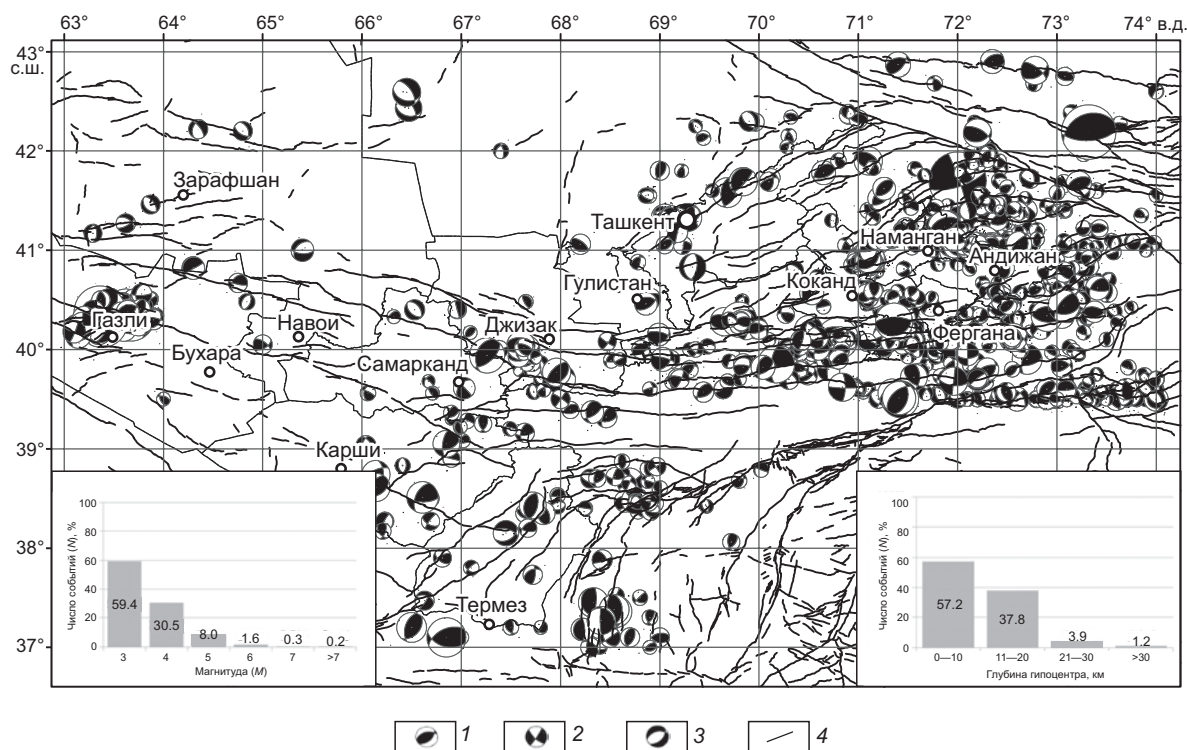


Рис. 5. Площадное распределение землетрясений с различным кинематическим типом подвижки в очаге по данным сборного каталога МОЗ территории Узбекистана.

1 — 3 — кинематические типы подвижки в очагах землетрясений: 1 — взброс; 2 — сдвиг; 3 — сброс. 4 — активные разломы земной коры. В левом нижнем углу — гистограмма распределения землетрясений сборного каталога МОЗ по магнитудам. В правом нижнем углу — гистограмма распределения землетрясений сборного каталога МОЗ по глубинам.

ских событий [Rebetsky et al., 2020]. Карта эпицентров землетрясений, вошедших в сводный каталог, с изображением механизмов очагов этих землетрясений показана на рис. 5. На этом же рисунке приведены гистограммы распределения землетрясений сборного каталога МОЗ территории Узбекистана по магнитуде и глубине.

Для получения генерализованной картины напряженного состояния исследуемого региона были проведены вычисления по сетке $0.2 \times 0.2^\circ$ с минимальным размером однородной выборки, состоящей из пяти определений механизмов очагов землетрясений в каждом домене. При этом радиус круговой области, в пределах которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для формирования однородных выборок в каждой расчетной точке, варьировался от 15 до 60 км. Такая вариация окна сбора данных для инверсии напряжений была связана с разной плотностью эпицентров и потребностью более равномерного представительства точек расчета для всей исследуемой территории. Размер этого окна фактически определял и разный масштаб усреднения напряжений, т. е. детальность поля напряжений. Проведенная в указанном диапазоне усреднения тектонофизическая инверсия сейсмологических данных позволила получить параметры напряженного состояния практически всей сейсмоактивной части территории Узбекистана.

На рисунке 6 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей главных напряжений в результате проведенной реконструкции. Угол погружения оси минимального сжатия σ_1 сильно варьирует для различных участков исследуемой территории, меняясь от вертикального погружения на территории Южного Узбекистана и на отдельных участках Беспапанского и Южно-Ферганского разломов до практически горизонтального погружения на территории Алайской долины за одноименным хребтом. Вариации угла погружения оси главного напряжения сжатия σ_3 в пределах исследуемой территории существенно меньше (см. рис. 6, а). Для большей части территории эта ось близгоризонтальна. В большинстве случаев простираение оси максимального сжатия практически перпендикулярно простираению структур. Эта особенность нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают. На территории Туранской платформы (Западный Узбекистан) и в пределах переходной зоны от орогена к платформе (Приташкентский район) преимущественным

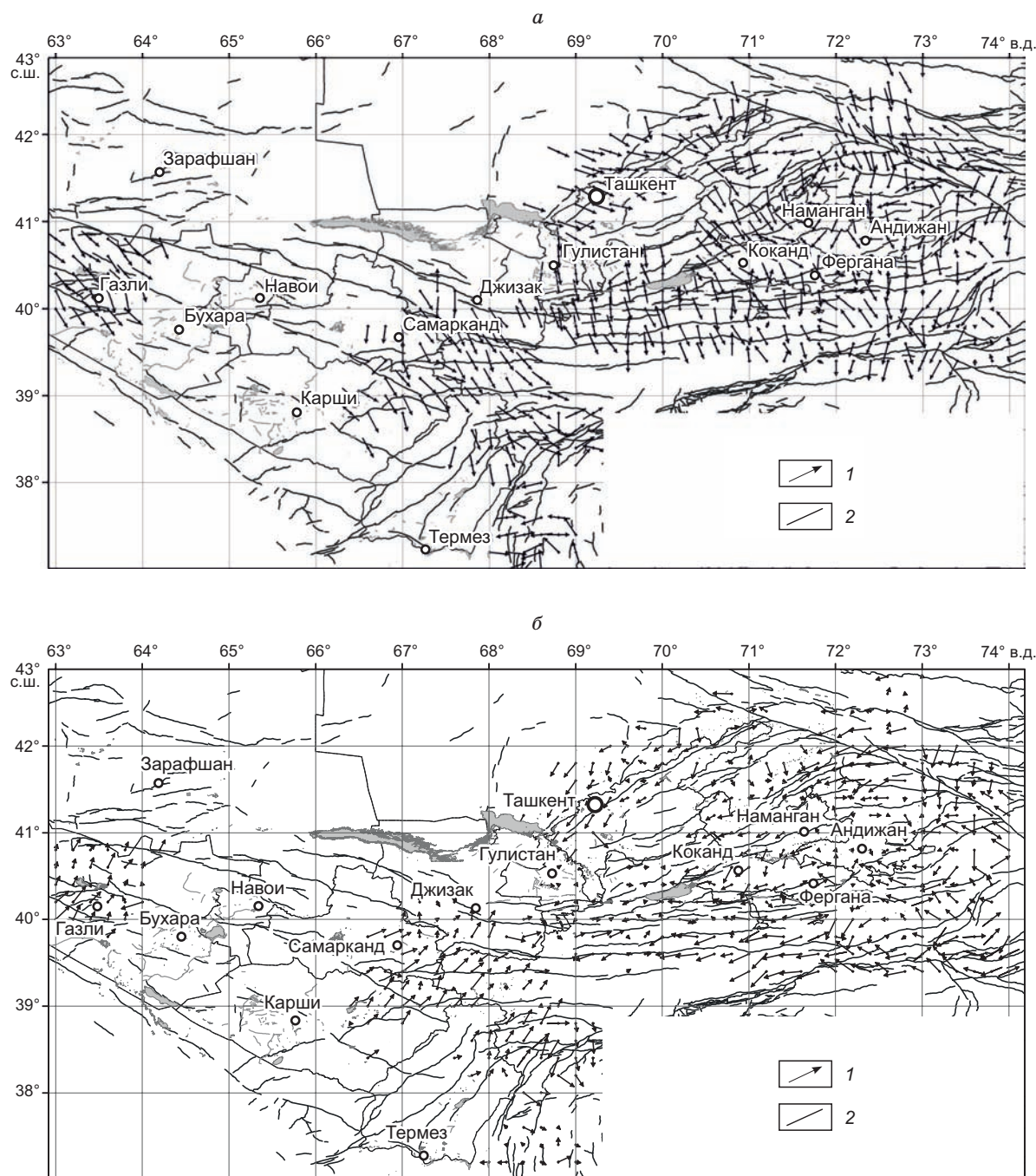


Рис. 6. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений при реконструкции напряжений МКА по всему диапазону магнитуд землетрясений, минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км:

a — максимального сжатия σ_3 ; *b* — минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения).

a: 1 — ось минимального главного напряжения (максимального сжатия), 2 — активные разломы земной коры; *b*: 1 — ось максимального главного напряжения (минимального сжатия); 2 — активные разломы земной коры.

направлением оси максимального сжатия σ_3 является юго-восточное, в орогенической части исследуемой территории (Восточный Узбекистан) — близмеридиональное.

Анализ распределения коэффициента Лоде—Надаи (рис. 7) свидетельствует что на данном уровне осреднения преобладающее число доменов характеризуется состоянием, близким к чистому сдвигу ($-0.2 < \mu_\sigma < +0.2$). Домены с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию ($\mu_\sigma \geq 0.6$) или одноосному растяжению ($\mu_\sigma \leq -0.6$), распределены по исследуемой территории достаточно мозаично, но

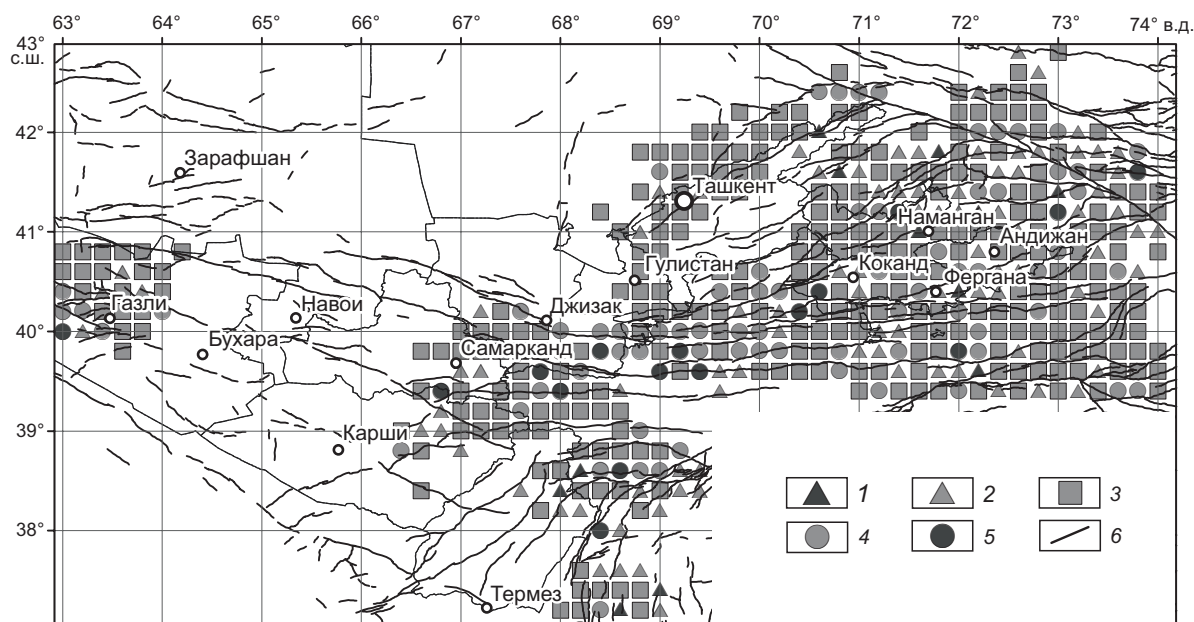


Рис. 7. Площадное распределение коэффициента Лодэ—Надаи при реконструкции напряжений МКА по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км.

1—5 — значения коэффициента Лодэ—Надаи μ : 1 — $-1.0 \leq \mu < -0.6$; 2 — $-0.6 \leq \mu < -0.2$; 3 — $-0.2 \leq \mu < +0.2$; 4 — $0.2 \leq \mu < 0.6$; 5 — $0.6 \leq \mu \leq 1.0$. 6 — активные разломы земной коры.

при этом наблюдаются и определенные закономерности. Так, значительная часть доменов характеризующихся состоянием, близким к одноосному растяжению, расположена в пределах Ферганской межгорной впадины и в юго-западной части Таласо-Ферганского разлома северо-западного простирания. Высокой концентрацией доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию, характеризуется центральная часть Южно-Ферганского разлома в той области, где направление его распространения меняется с северо-восточного (в орогенической части исследуемой территории) на северо-западное (в пределах Туранской платформы).

Преобладающим геодинамическим типом напряженного состояния всей исследуемой территории является режим горизонтального сжатия (рис. 8). Области, характеризующиеся режимом горизонтального сдвига, расположены в центральной части Таласо-Ферганской сейсмоактивной зоны и на территории Южного Узбекистана в северной части Бабатаг-Кейкитауской сейсмогенной зоны. Небольшие участки, характеризующиеся режимом горизонтального сдвига, расположены также в северо-восточной части сейсмоактивных структур Приташкентского района и на отдельных сегментах Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны за пределами восточной части территории Узбекистана. Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального растяжения, расположено за Туркестанским хребтом и в пределах Алайской долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близгоризонтальна и ориентирована в направлении простирания Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкрест структур и близвертикальна. Областям горизонтального сжатия, сдвига и растяжений свойственна кинематика разрывообразования типа взброс, сдвиг вдоль простирания и сброс соответственно.

Для получения более детальной картины распределения природных напряжений в различных глубинных слоях земной коры исследуемой территории, а также исследования влияния магнитудной иерархии рассматриваемых землетрясений на результаты проводимых инверсий был проведен ряд дополнительных реконструкций на более детальном уровне площади по сетке $0.1 \times 0.1^\circ$. Минимальный размер однородной выборки в каждом домене в этих вариантах расчета включал не менее шести определений механизмов, а радиус круговой области, в пределах которой проводилось осреднение параметров, не превышал 30 км. Эти ограничения уменьшили площадь, на которой реконструкции оказались возможными, но обеспечили высокую точность проводимых построений. По оценкам, приведенным в [Ребецкий и др., 2016], реконструкции с указанными требованиями позволяют выдерживать точность опре-

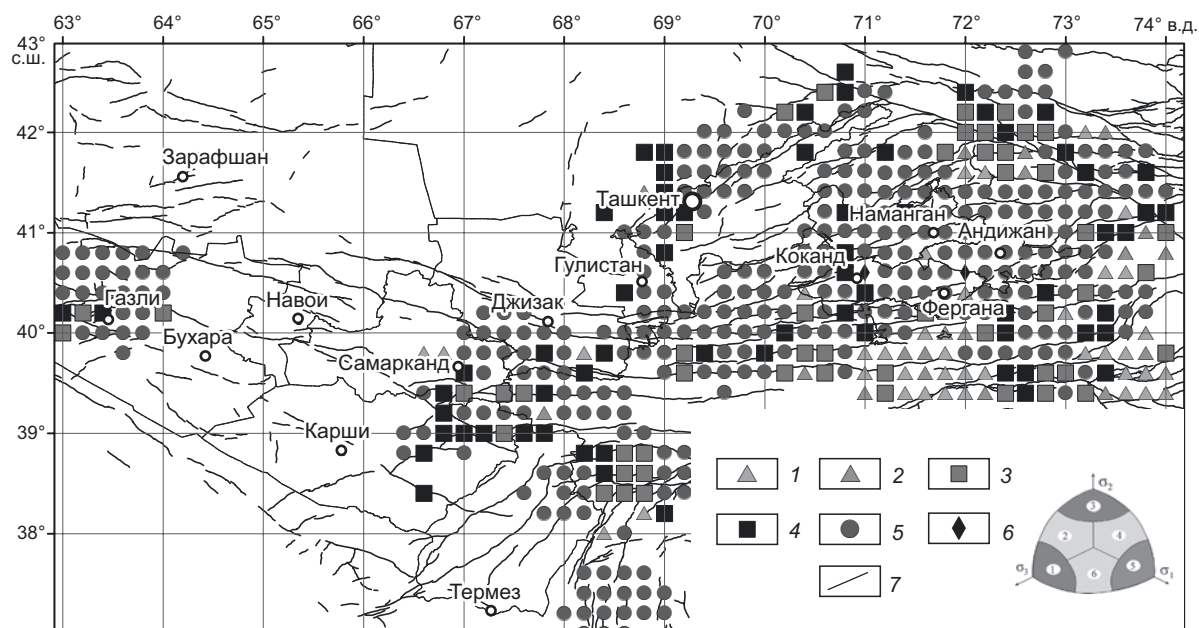


Рис. 8. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния при реконструкции напряжений МКА по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км.

1–6 — геодинамические типы напряженного состояния земной коры: 1 — горизонтальное растяжение, 2 — горизонтальное растяжение со сдвигом, 3 — горизонтальный сдвиг, 4 — горизонтальное сжатие со сдвигом, 5 — горизонтальное сжатие, 6 — сдвиг в вертикальной плоскости; 7 — разломы.

деления осей главных напряжений в пределах $10\text{--}15^\circ$, а значения коэффициента Лодэ—Надаи, характеризующего вид тензора напряжений, не хуже 0.2.

Анализ результатов реконструкций, проведенных на более высоком уровне детальности, показал, что для ряда областей исследуемой территории выявляются значимые различия в параметрах напряженного состояния для верхнего ($H = 0\text{--}10$ км) и более низкого ($H \geq 11$ км) сейсмоактивных слоев земной коры [Rebetsky et al., 2020; Ибрагимова и др., 2021], что в целом подтверждается и реконструкциями, проведенными при различных магнитудах рассматриваемых землетрясений (с $M \leq 4.5$ и с $M \geq 5.0$) [Rebetsky et al., 2020; Ибрагимова и др., 2021], учитывая, что магнитудная иерархия землетрясений во многом определяет глубинное положение их гипоцентров.

Области реализации сильных землетрясений. Анализ пространственного положения эпицентров сильных (с $M \geq 4.8$) землетрясений, произошедших на территории Узбекистана начиная с исторического периода времени (см. рис. 2), показал, что они располагаются не равномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в виде групп в областях с линейными размерами $50\text{--}80$ км. Эти скопления показаны на карте эпицентров эллипсами различных размеров. Сопоставляя карты эпицентров сильных землетрясений, построенные за различные временные интервалы (до 1900 г. и начиная с инструментального периода времени), можно отметить, что выделенные области с высокой концентрацией сильных землетрясений достаточно устойчиво сохраняют свою конфигурацию.

Сосредоточение сильных землетрясений в компактных областях имеет реальную физическую природу. Места остановки разрывов от произошедших землетрясений являются дополнительными концентраторами напряжений. Поэтому последующим подвижкам, по мере роста тектонических напряжений в пределах сейсмоактивной зоны, проще всего реализоваться именно в этих областях. Эти соображения, безусловно, перекликаются с концепцией «сейсмической брешии» [Федотов, 1968; Моги, 1988], но линейные размеры выделяемых нами областей существенно меньше, чем это предусмотрено в рамках упомянутой концепции. Так, с учетом длины очага тектонического землетрясения с $M \geq 7.0$ [Ребецкий, 20076], область, охватывающая три Газлийских землетрясения 1976 и 1984 г. с магнитудами $M = 7.0\text{--}7.3$, должна бы превысить 150 км. В реальности же она значительно компактнее и не превышает $70\text{--}80$ км.

Интерпретация деления разломных зон на сегменты, характеризующиеся различной потенциальной опасностью крупномасштабного разрушения, дается в рамках МКА [Ребецкий, 20076; Rebetsky,

Tatevossian, 2013; Ребецкий и др., 2016]. Она основана на исследовании относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства: $p^* = p - p_{\text{фл}}$, где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$). В рамках МКА предполагается, что в областях, характеризующихся высокой сейсмической активностью, массивы горных пород находятся в напряженном состоянии, близком к предельному. Из соотношений Кулона—Мора это определяет прямо пропорциональную связь между эффективными нормальными σ_n^* и касательными τ_n напряжениями на плоскости хрупкого разрыва [Ребецкий, 2007a] и, следовательно, между нормированными величинами эффективного давления p^*/τ_f и максимального касательного напряжения. Нормировка напряжений выполнялась на прочность сцепления массивов горных пород τ_f , которая предполагается маловариабильной в пределах исследуемой территории. В работах [Ребецкий, 2007b; Rebetsky, Tatevossian, 2013; Ребецкий и др., 2016; Rebetsky et al., 2020], на основе обобщения большого числа экспериментальных данных для различных сейсмоактивных регионов, отмечается, что наиболее сильные землетрясения ($M = 6.5\text{—}7.5$), как правило, происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. Это связано с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, что приводит к существенно меньшим потерям упругой энергии на разогрев разрыва. Это, несмотря на пониженный уровень касательных напряжений, высвобождает больше энергии на кинетику разрывообразования, т. е. создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения. Площадное распределение относительных величин эффективного давления p^*/τ_f для некоторых вариантов проведенных реконструкций показано на рис. 9.

Если на генерализованном уровне реконструкции напряжений МКА (по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км) распределение по площади повышенных, умеренных и пониженных значений параметра p^*/τ_f достаточно мозаичное (см. рис. 9, а), то по результатам детальной реконструкции (при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 30$ км) с привлечением механизмов очагов сильных ($M \geq 5.0$) землетрясений можно отметить, что области с различным значением относительных величин эффективного давления p^*/τ_f структурированы значительно лучше и чередуются между собой (см. рис. 9, б). Здесь следует отметить два момента. Во-первых, точность определения механизмов очагов сильных землетрясений, как правило, выше, чем для слабых сейсмических событий, ввиду большего числа станций, привлекаемых к построению их механизмов. Во-вторых, с учетом распределения гипоцентров землетрясений различных магнитуд по глубинам (см. гистограмму на рис. 2), инверсия по механизмам землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ отражает напряженное состояние нижнего сейсмоактивного слоя, в котором реализуются наиболее сильные землетрясения. Как это следует из рисунка 9, б, на территории Восточного Узбекистана пониженными значениями величин эффективного давления p^*/τ_f характеризуются протяженные участки в пределах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов, и одноименных флексурно-разрывных зон. В западной части территории Узбекистана пониженные значения p^*/τ_f отмечаются в Газлийской очаговой зоне.

Таким образом, чередование в пределах сейсмоактивных зон связанных площадных образований с повышенными и пониженными значениями величины p^*/τ_f достаточно хорошо согласуется с отмеченными ранее особенностями площадного группирования эпицентров сильных землетрясений в компактных областях (см. рис. 2), в которых, по всей видимости, реализованы оптимальные условия для крупномасштабного разрушения. В связи с малой изменчивостью в течение десятков и сотен лет направленности протекания сеймотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных зон, эти области в дальнейшем рассматриваются как наиболее вероятные для реализации последующих сильных землетрясений на ближайшие десятилетия.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ОБЛАСТЕЙ ОЖИДАЕМОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Карта областей ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы. Дальнейшее исследование текущей сейсмологической обстановки в пределах сейсмоактивных зон проводилось на основе анализа комплекса прогностических параметров сейсмического режима, характеризующих кинетику процесса трещинообразования очаговой области по мере приближения к моменту магистрального разрыва [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Artikov et al., 2018]. С этой целью были рассчитаны средние долговременные значения параметров сейсмического режима в каждой точке сейсмоактивной зоны и выявлены области, в которых на текущий момент времени (использовались сейсмологические данные до декабря 2019 г.) отмечаются значимые аномалии. При этом особое внимание отводилось тем 29 областям, расположенным в пределах сейсмоактивных зон, в которых за исторический период времени про-

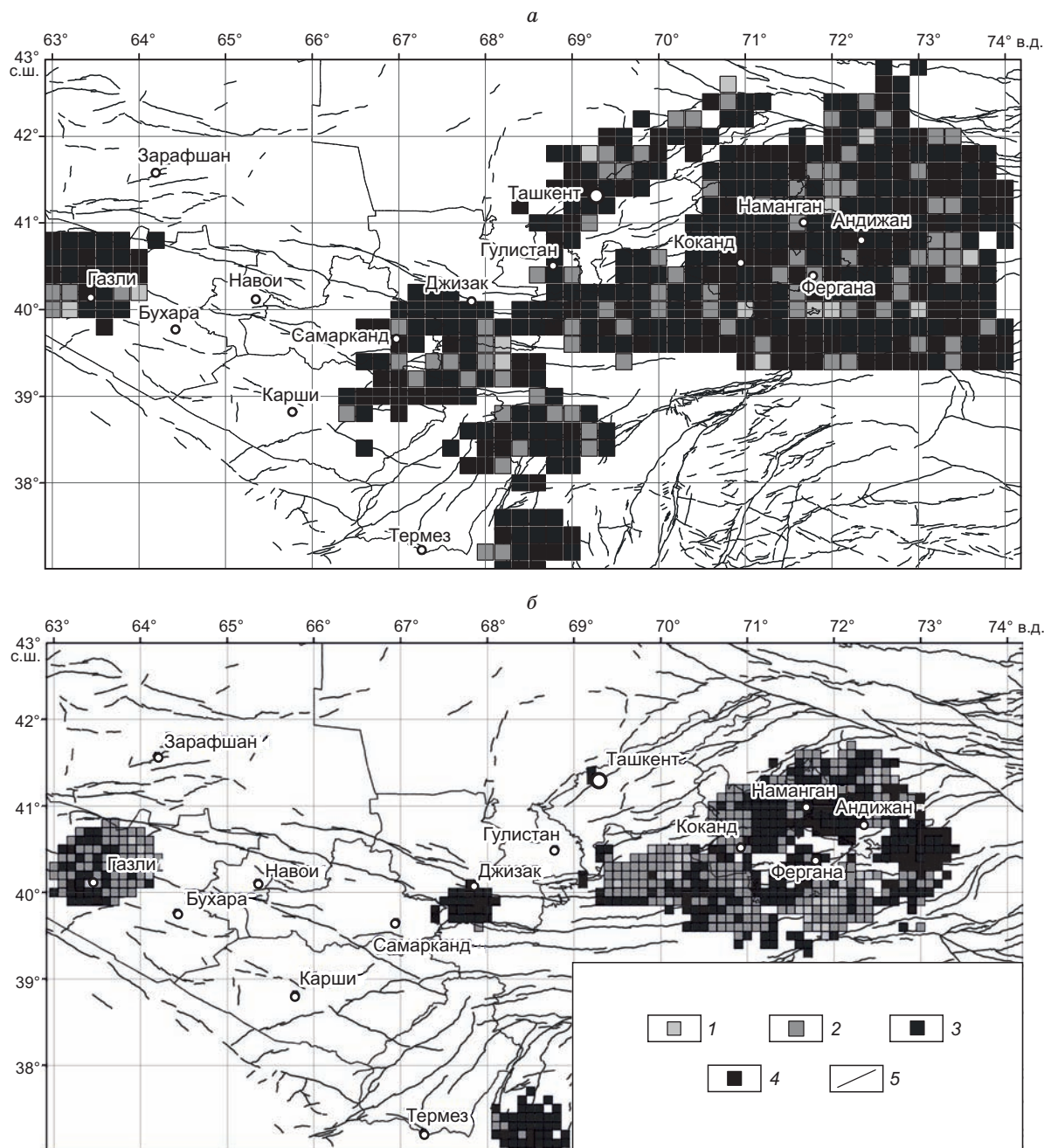


Рис. 9. Площадное распределение величины эффективного давления (p^*/τ_f), нормированной на прочность сцепления, при различных вариантах реконструкции:

a — по всему диапазону магнитуд землетрясений при минимальном размере однородной выборки $N \geq 5$ и максимальном радиусе осреднения $R \leq 60$ км; *б* — по землетрясениям с $M \geq 5$ при минимальном размере однородной выборки $N \geq 6$ и максимальном радиусе $R \leq 30$ км. 1—4 — значения нормированных величин эффективного давления p^*/τ_f : 1 — $0 \leq p^*/\tau_f < 3$; 2 — $3 \leq p^*/\tau_f < 6$; 3 — $6 \leq p^*/\tau_f < 10$; 4 — $p^*/\tau_f \geq 10$; активные разломы земной коры.

исходили сильные землетрясения. Рассматривались следующие параметры сейсмического режима, представляющие прогностическую ценность [Моги, 1988; Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Artikov et al., 2014]:

- общее число представительных землетрясений и количество землетрясений различного энергетического уровня, происходящих в каждой точке сейсмоактивной зоны в единицу времени на предмет выявления областей сейсмической активизации и сейсмического затишья [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Артиков и др., 2017; Artikov et al., 2018; и др.], а также нахождения областей, где на текущий момент времени наблюдаются эффекты так называемой «кольцевой активности» [Моги, 1988];

- временные изменения угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ в зависимости Гутенберга—Рихтера при энергетической классификации землетрясений по величине, который

называется сейсмической дробностью среды [Соболев, 1993; Завьялов, 2006; Artikov et al., 2018; и др.] или параметр b при магнитудной классификации);

- совместное поведение сейсмической активности и сейсмической дробности;
- параметры, характеризующие степень сгруппированности сейсмических событий во времени и в пространстве [Artikov et al., 2014, 2018];
- энергетические характеристики сейсмического режима, которые описываются функцией логарифма выделившейся сейсмической энергии, графиками Бенъоффа, площадью образующихся в процессе сейсмической деформации разрывов, пропорциональных выделенной энергии с показателем степени $2/3$ [Соболев, 1993; Завьялов, 2006].

Для различных прогностических параметров сейсмического режима размеры круговых областей, в которых они рассчитывались, а также пороговые значения, выход за которые интерпретировался как проявление аномалии, выбирались на базе ретроспективного анализа динамики сейсмического процесса в областях подготовки уже произошедших сильных землетрясений. С этой целью были проанализированы временные изменения параметров сейсмического режима в очаговых зонах более 40 землетрясений [Артиков и др., 2012]. Для примера на рисунках 10–12 показаны примеры проявления предвестников «сейсмическое затишье», «активизация сейсмичности по параметру N_{Σ} » и «аномалии сейсмической дробности» (параметр γ), наблюдавшиеся перед некоторыми сильными землетрясениями на территории Узбекистана. Говоря о сейсмических затишьях, следует отметить многообразие форм выделения данного предвестника [Нерсесов и др., 1976; Артиков и др., 2012]. Представленные на рис. 10 пространственно-временные графики развития сейсмического процесса в трех очаговых областях, расположенных в пределах Ташкентской сейсмоактивной зоны, наглядно показывают описанный в [Соболев, 1993; Завьялов, 2006] факт уменьшения или полного исчезновения за несколько лет до момента сильного землетрясения сейсмических событий, отличающихся от магнитуды основного толчка на 2.0–2.5 магнитуды (3–4 энергетических класса при энергетической классификации землетрясений по величине).

На основе анализа комплекса прогностических признаков была построена карта областей ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы (рис. 13). По числу проявившихся аномальных признаков были введены четыре градации для характеристики потенциальной опасности каждой очаговой зоны на текущий момент времени:

- низкая вероятность возникновения землетрясений в ближайшие годы: 0–3 проявившихся прогностических признака;
- невысокая вероятность возникновения землетрясений: 4–5 проявившихся прогностических признаков;
- высокая вероятность возникновения землетрясений: 6–7 проявившихся прогностических признаков;

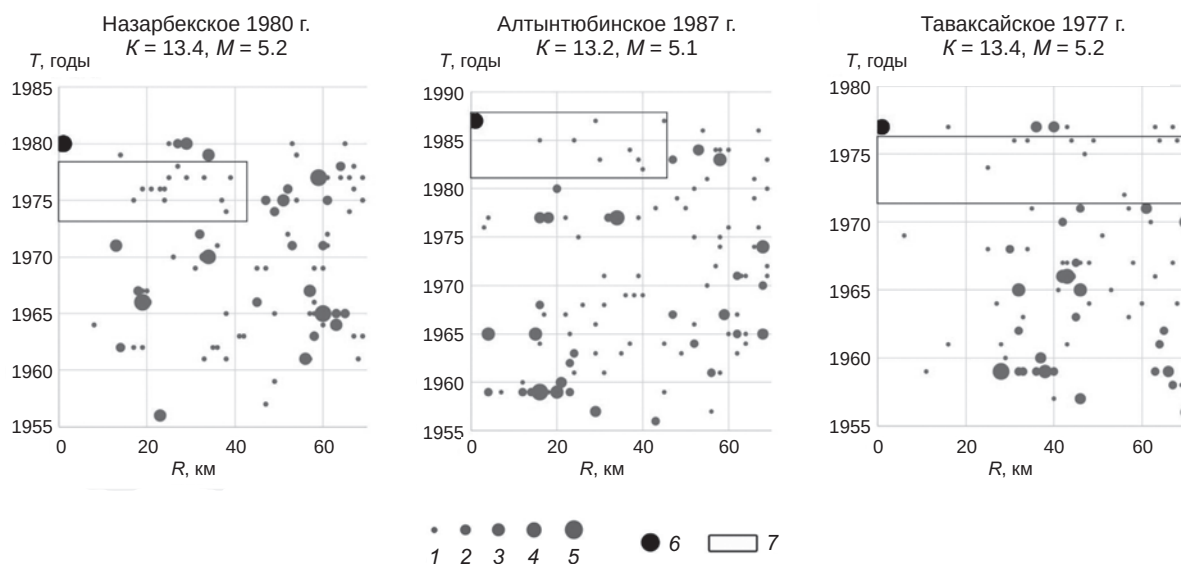


Рис. 10. Примеры проявления предвестника «сейсмическое затишье» перед некоторыми сильными землетрясениями, произошедшими в пределах Приташкентской сейсмоактивной зоны:

1–5 — землетрясения энергетических классов $K = 9–13$; 6 — основной толчок; 7 — пространственно-временная область сейсмического затишья.

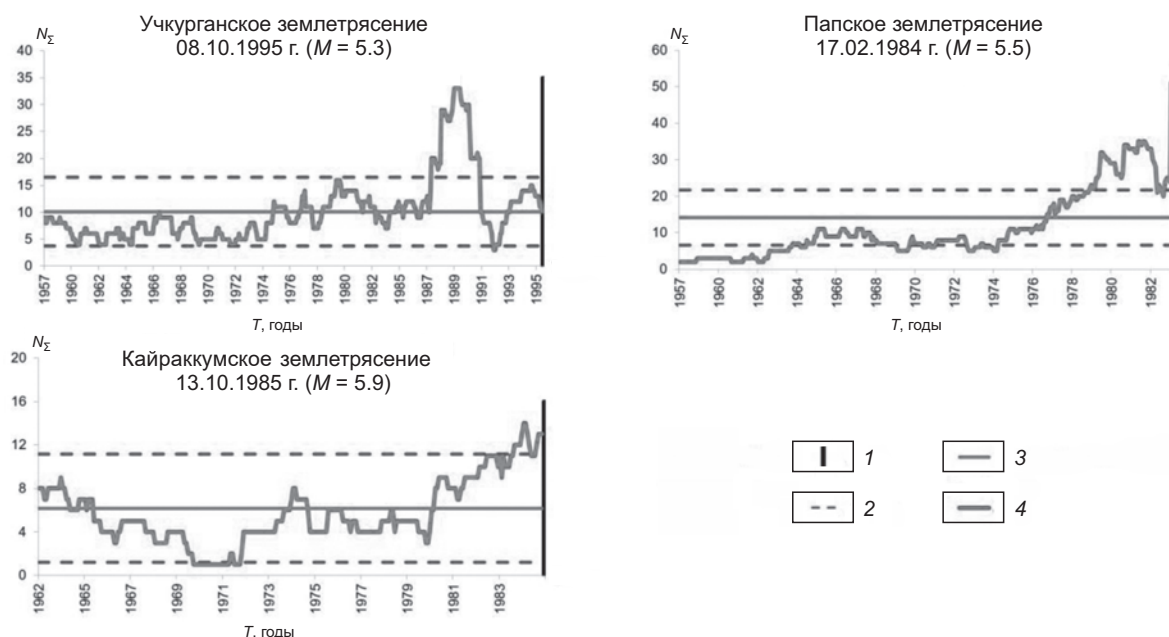


Рис. 11. Примеры проявления предвестника «активизация сейсмичности» по параметру N_z перед некоторыми землетрясениями на территории Узбекистана.

1 — момент основного толчка, 2 — доверительный интервал изменения фоновых значений параметра N_z , 3 — среднее долговременное значение, 4 — временные флуктуации параметра N_z .

— очень высокая вероятность возникновения землетрясений: 8—11 проявившихся прогностических признаков.

Как это видно из рис. 13, на текущий момент времени в пределах исследуемой территории выделено 5 областей с очень высокой вероятностью возникновения сильного землетрясения и 10 областей с высокой вероятностью возникновения сильного землетрясения. Десять из этих областей располагаются

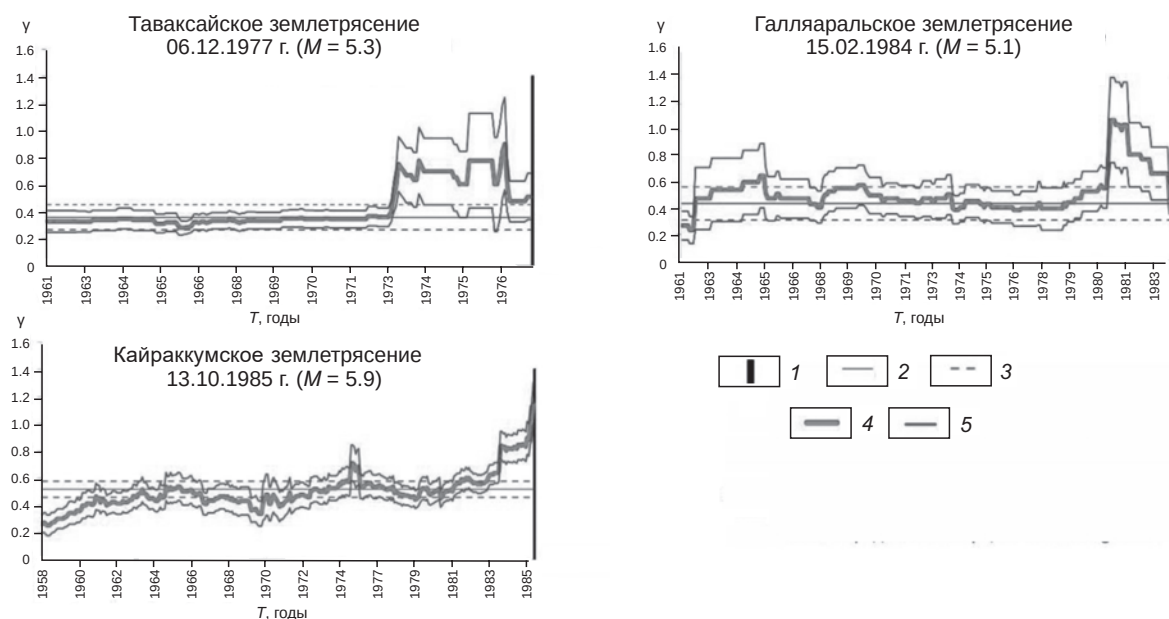


Рис. 12. Примеры проявления предвестника «аномалии сейсмической дробности» (параметр γ) перед некоторыми землетрясениями на территории Узбекистана.

1 — момент основного толчка, 2 — среднее долговременное значение параметра γ , 3 — доверительный интервал изменения фоновых значений параметра γ , 4 — временные флуктуации параметра γ , 5 — ошибка определения текущего значения параметра γ .

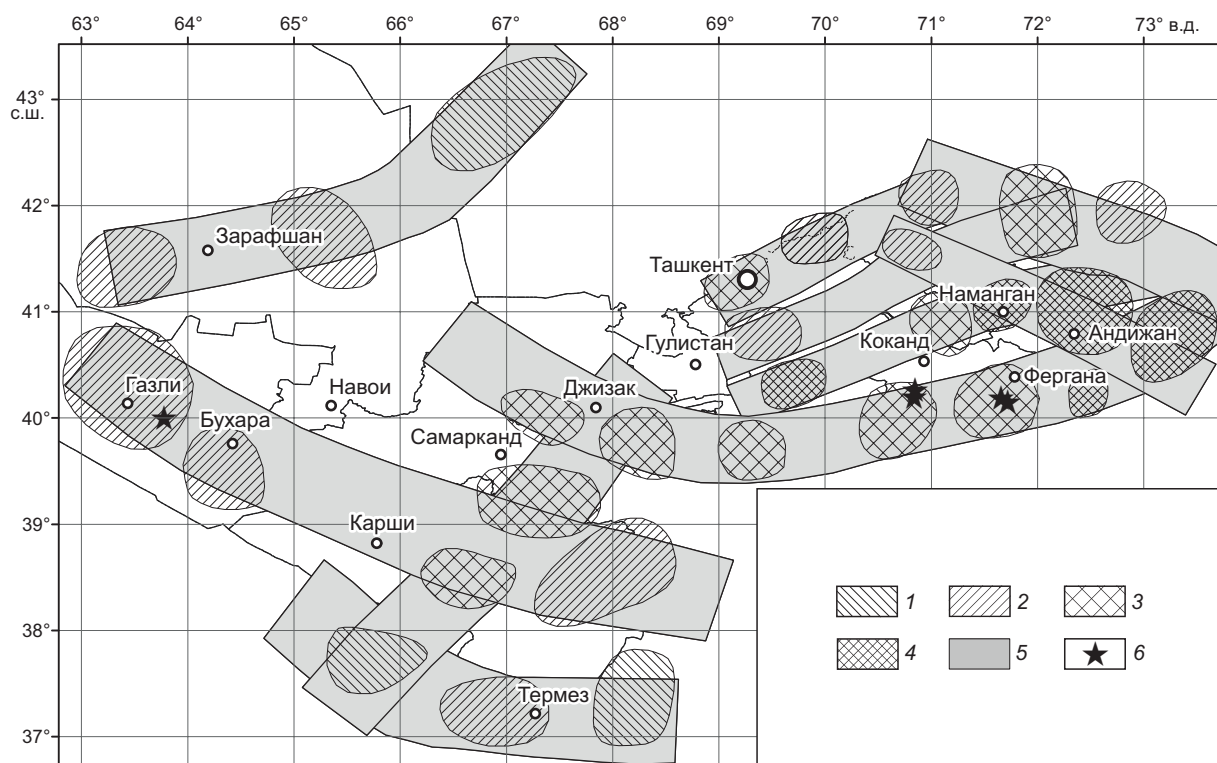


Рис. 13. Карта областей ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы по комплексу прогностических параметров сейсмического режима.

1–4 — области с различной вероятностью возникновения сильного землетрясения: 1 — низкая, 2 — невысокая; 3 — высокая, 4 — очень высокая; 5 — сейсмоактивные зоны; 6 — сильные землетрясения, произошедшие в 2020 и 2021 гг.

в Восточном Узбекистане и четыре в Центральном Узбекистане. Анализ параметров сейсмического режима показал, что практически все области концентрации сильных землетрясений, расположенные с исторических времен в пределах Южно-Ферганской и Северо-Ферганской сейсмоактивных зон, на сегодняшний момент характеризуются высокой и очень высокой вероятностью возникновения в них сильных землетрясений в ближайшие годы. Очень высокой вероятностью возникновения сильных землетрясений характеризуются также несколько областей, расположенных в южной части Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны. Звездочками на этой карте показаны землетрясения с магнитудой $M \geq 4.6$, произошедшие на территории Узбекистана и в сопредельных с ним областях в 2020 г., после передачи ее в МЧС РУз. Все они попали в области, где вероятность их возникновения оценивалась как «высокая».

Оценка эффективности предшествующих карт долгосрочного прогноза сильных землетрясений на территории Узбекистана. Представленная на рис. 13 карта долгосрочного прогноза сильных землетрясений является третьей по счету. Первая карта областей ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы была построена в рамках описанной выше методологии и внедрена в МЧС РУз для проведения необходимых антисейсмических мероприятий в конце 2015 г. [Artikov et al., 2018]. С учетом меняющейся геодинамической обстановки в регионе в начале 2018 г. была разработана и внедрена в МЧС Республики Узбекистан следующая по времени прогнозная [Артиков и др., 2020а, б]. Эта карта строилась по сейсмологическим данным, оканчивающихся декабрем 2017 г. Анализ ощутимых и сильных землетрясений, произошедших после передачи трех разработанных карт в МЧС, позволяет высказать следующее. В период с января 2016 по декабрь 2020 г. на территории Узбекистана и в сопредельных с ним районах произошло 16 землетрясений с магнитудой $M \geq 4.6$. Все они без исключения реализовались в областях, где отмечалась высокая сейсмическая активность на уровне сильных землетрясений начиная с исторического периода времени (см. рис. 2). При этом в областях, где вероятность их возникновения оценивалась как «очень высокая», произошло 6 землетрясений, в областях с «высокой» вероятностью также 6 и в областях с «невысокой» вероятностью 4 землетрясения. Три из четырех землетрясений, реализовавшихся в областях с «невысокой» вероятностью ожидания сильного землетрясения, произошли в Газлийской очаговой зоне, где в 1976 и 1984 гг. реализовались три сильнейших

платформенных землетрясения с магнитудой $M \geq 7.0$. По-видимому, для этой очаговой зоны, где сейсмические события с магнитудой $M \geq 4.6$ до сих пор происходят достаточно часто, уровень прогнозируемых землетрясений следует несколько повысить. Таким образом, большинство из реализовавшихся сильных землетрясений проявили себя значимыми аномалиями в параметрах сейсмического режима и произошли в областях, где вероятность их возникновения оценивалась как «высокая» и «очень высокая». Вместе с тем стабильно высокая доля таких областей, которые выделялись на всех трех прогнозных картах, несколько снижает эффективность долгосрочного прогноза и требует привлечения дополнительных информативных прогностических признаков, свидетельствующих о приближении момента крупномасштабного разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования сводятся к следующему.

Территория Узбекистана характеризуется сложным тектоническим строением и высоким уровнем сейсмической активности. Современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана исследовано алгоритмами метода катакластического анализа разрывных смещений с использованием каталога механизмов очагов землетрясений. Определены следующие его параметры: азимуты и углы погружения осей главных напряжений; значения коэффициента Лодэ—Надаи; геодинамический тип напряженного состояния земной коры; относительные (нормированные на прочность сцепления массивов горных пород) величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва. Угол погружения оси минимального сжатия σ_1 сильно варьирует для различных участков исследуемой территории, меняясь от вертикального погружения на территории Южного Узбекистана и на отдельных участках Беспапанского и Южно-Ферганского разломов до практически горизонтального погружения на территории Алайской долины за одноименным хребтом. Вариации угла погружения оси главного напряжения сжатия σ_3 существенно меньше. Для большей части территории эта ось близгоризонтальна. В большинстве случаев простирание оси максимального сжатия практически перпендикулярно простиранию структур. Анализ распределения коэффициента Лодэ—Надаи, рассчитанного для всего сейсмоактивного слоя в целом, показал, что преобладающим является напряженное состояние, близкое к чистому сдвигу ($-0.2 < \mu_o < +0.2$). Значительная часть доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию ($\mu_o \geq 0.6$), расположена в центральной части Южно-Ферганского разлома. Домены с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению ($\mu_o \leq -0.6$), наиболее часто встречаются в пределах Ферганской межгорной впадины и в юго-западной части Таласо-Ферганского разлома. Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся исследуемая территория характеризуется геодинамическим типом напряженного состояния, отвечающего горизонтальному сжатию. Домены, находящиеся в режиме горизонтального сдвига, расположены в центральной и юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома. Области, характеризующиеся режимом горизонтального растяжения, расположены за Алайским хребтом в пределах одноименной долины.

В пределах исследуемой территории выделяются значительные по размерам связанные области с различными значениями относительных величин эффективного давления p^*/τ_f . Сильные землетрясения, как правило, происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. На территории Восточного Узбекистана области пониженных значений эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений расположены в пределах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон. В западной части территории Узбекистана пониженными значениями величин эффективного давления p^*/τ_f характеризуется Газлийская очаговая зона.

На основе регионального каталога землетрясений, с учетом представительных сроков регистрации сейсмических событий различного энергетического уровня, определены параметры повторяемости землетрясений как для всей территории в целом, так и для основных сейсмоактивных зон. В предположении, что сильные землетрясения образуют пуассоновский поток событий, для основных сейсмоактивных зон территории Узбекистана и их сегментов оценена вероятность возникновения сильных землетрясений на текущий момент времени. Наибольшей глубиной сейсмического затихания по землетрясениям с $M \geq 4.8$ характеризуется центральный и восточный сегменты Таласо-Ферганской сейсмоактивной зоны, северо-восточный сегмент Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны, западный участок Газли-Кара-тагского фрагмента Южно-Тяньшаньской сейсмоактивной зоны.

Анализ пространственного положения эпицентров сильных ($M \geq 4.8$, $K \geq 12.6$) землетрясений, произошедших на территории Узбекистана начиная с исторического периода времени, показал, что они располагаются неравномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в виде компактных областей с линейными размерами 50—80 км. В связи с малой изменчивостью в течение десятков и сотен лет на-

правленности протекания сейсмотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных зон, эти области рассматриваются как наиболее вероятные для реализации последующих сильных землетрясений и в ближайшие десятилетия. Оценка текущей сейсмологической обстановки в выделенных областях долгосрочного прогноза проводилась путем анализа комплекса прогностических параметров сейсмического режима, прогностическая ценность которых была исследована ретроспективно при изучении процесса подготовки ряда сильных землетрясений региона. По числу проявившихся аномальных признаков области долгосрочного прогноза ранжированы по вероятности возникновения в них сильных землетрясений в течение ближайших нескольких лет. Составлена соответствующая прогнозная карта. Анализ предшествующих карт областей ожидаемой сейсмической активизации, разработанных в рамках излагаемого методологического подхода, где прогноз осуществлялся в режиме реального времени, показал, что значительная часть произошедших событий реализовалась в областях, в которых вероятность их возникновения на карте оценивалась как «высокая» и «очень высокая». Вместе с тем стабильно большая доля таких областей, которые выделяются на всех прогнозных картах, несколько снижает эффективность долгосрочного прогноза и требует привлечения дополнительных информативных прогностических признаков, свидетельствующих о приближении момента крупномасштабного разрушения.

Работа частично финансировалась в рамках госзадания ИФЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Ален К., Кейлис-Борок В.И., Кузнецов И.В., Ротвайн И.М., Хаттен К. Долгосрочный прогноз землетрясений и автономность сейсмических предвестников: Калифорния, $M \geq 6.4$, $M \geq 7$ // Достижения и проблемы современной геофизики. М., Наука, 1984, с. 152—165.

Ален К., Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Хаттен К. Комплекс долгосрочных сейсмологических предвестников: Калифорния и некоторые другие регионы // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М., Наука, 1986, вып. 19, с. 23—27.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. Ташкент, Изд-во Фан, 2012, 254 с.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Синоптический долгосрочный прогноз мест ожидаемой сейсмической активизации на территории Узбекистана // Геориск, 2017, № 2, с. 20—28.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Связь периодов сейсмической активизации в сейсмоактивных зонах Узбекистана с возникновением сильнейших землетрясений в Центральной Азии // Геориск, 2019, т. XIII, № 1, с. 58—70, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-58-70>.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Оценка эффективности долгосрочного прогноза сильных землетрясений на территории Узбекистана в режиме реального времени и новая карта областей ожидаемой сейсмической активизации // Проблемы сейсмологии, 2020а, т. 2, № 2, с. 3—17.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Опыт оценки текущей сейсмологической обстановки на территории Узбекистана по комплексу прогностических параметров сейсмического режима // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 2020б, т. 4, № 3, с. 265—279, <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.265>.

Атабеков И.У., Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Связь сильных землетрясений с активизацией глубинных разломов в Центральной Азии (Узбекистан): численное моделирование вариаций поля напряжений // Геотектоника, 2021, № 3, с. 1—18, doi: 10.31857/S0016853X21030036.

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.

Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. Ташкент, Изд-во Фан, 1987, 143 с.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М., Наука, 2006, 254 с.

Завьялов А.Д., Славина Л.Б., Васильев В.Ю., Мячкин В.В. Методика расчета карт ожидаемых землетрясений по комплексу прогностических признаков. М., Изд-во ИФЗ РАН, 1995, 40 с.

Землетрясения Средней Азии и Казахстана, 1979—1988 / Ред. С.Х. Негматуллаев. Душанбе, Изд-во Дониш, 1981—1992.

Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Ташкент, Изд-во Гидроингео, 2002, с. 59—74.

Ибрагимов Р.С., Ребецкий Ю.Л., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Реконструкция современного напряженного состояния земной коры территории Узбекистана по данным сборного каталога механизма очагов землетрясений // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докладов Пятой тектонофизической конференции ИФЗ РАН с международным участием, посвященной столетию М.В. Гзовского. М., 2020, с. 312—318.

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.

Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Ротвайн И.М. Долгосрочные сейсмологические предвестники сильных землетрясений в Калифорнии-Сьерра-Неваде, Новой Зеландии, Японии и Аляске // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. М., Наука, 1980, вып. 13, с. 3—11.

Кособоков В.Г., Хохлов А.В. Экспериментальный среднесрочный прогноз землетрясений в реальном времени: проверка алгоритма М8 // Математическое моделирование сеймотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений: ГНТП «Глобальные изменения природной среды и климата». Проблема 2.1. М., Изд-во МИТП РАН, 1993, вып. 1, с. 53—60.

Моги К. Предсказание землетрясений. М., Наука, 1988, 382 с.

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зондированию территории Республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК, 2014, вып. 4, с. 86—92.

Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях // Исследования по физике землетрясений. М., Наука, 1976, с. 149—169.

Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М., Изд-во АН СССР, 1960, № 176, с. 75—114.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М., ИКЦ «Академкнига», 2007а, 406 с.

Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние, отвечающее формированию крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // ДАН, 2007б, т. 416, № 5, с. 680—685.

Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (6), с. 1225—1250.

Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 496—520.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М., Наука, 1985, 408 с.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 314 с.

Соболев Г.А., Арора Б., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д., Пономарев А.В., Кумар Н., Чабак С.К., Байдия П.Р. Прогностические аномалии сейсмического режима. II. Западные Гималаи // Геофизические исследования, 2009, т. 10, № 2, с. 23—36.

Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент, Изд-во ФАН, 1974, 216 с.

Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М., Наука, 1968, с. 121—150.

Якубов М.С., Соколов М.В. Анализ эффективности сети сейсмических станций Узбекистана на основных этапах ее развития // Сейсмичность территории Узбекистана / Ред. К.Н. Абдуллабеков. Ташкент, Изд-во Фан, 1990, с. 19—28.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Artikov M.T. Compositional change of seismic event sequences in focal zones during preparation of strong earthquakes // Geodesy Geodyn., 2014, v. 5 (2), p. 1—8, <https://doi.org/10.3724/SP.J.1246.2014.02001>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Artikov M.T. Revealing of seismic activation interrelationships in various seismoactive zones // Geodesy Geodyn., 2015, v. 5 (6), p. 351—360, doi: 10.1016 / j.geog.2015.03.007.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Identification of expected seismic activity areas by forecasting complex seismic-mode parameters in Uzbekistan // Geodesy Geodyn., 2018, v. 9 (2), p. 121—130, doi: 10.1016 / j.geog.2017.11.005.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Complex of general seismic zoning maps OSR-2017 of Uzbekistan // Geodesy Geodyn., 2020, v. 11 (4), p. 273—294, doi: 10.1016/j.geog.2020.03.004.

- Eksrom G., Nettles M.** Global CMT web page, <http://www.globalcmt.org/> (accessed April 17, 2014).
- 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 // *Seismol. Res. Lett.*, 2007, v. 78 (6), 579—590.
- Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E.** Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 2013, v. 184 (4—5), p. 335—346.
- Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A.** Stress state of Uzbekistan's seismically active areas // *Seism. Instrum.* 2020, v. 56, p. 679—700, <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.

*Поступила в редакцию 28 июля 2021 г.,
принята в печать 8 ноября 2021 г.*