



THE PROBABILITY OF A STRONG ($M \geq 6.0$) EARTHQUAKE IN THE SOUTH FERGANA SEISMIC ACTIVITY ZONE IN THE COMING YEARS

R.S. Ibragimov ^{1✉}, T.L. Ibragimova ¹, M.A. Mirzaev ¹, Yu.L. Rebetsky ²

¹ Mavlyanov Institute of Seismology, Uzbekistan Academy of Sciences, 3 Zulfiyahonima St, Tashkent 100128, Uzbekistan

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. There were investigated seismic mode and stress state of the Earth's crust in the South Fergana seismic activity zone. In the central part of the zone, there was identified an area of a long-term seismic quiescence during which no earthquakes with energy class $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$) were recorded. Along the entire length of the seismic quiescence area, there occur an activation of earthquakes of lower energy classes, as well as anomalous fluctuations of the recurrence curve slope. To localize the place of seismic activation probability, the current stress of earth's crust in the South Fergana seismic activity zone was reconstructed according to focal earthquake mechanisms by the methods of cataclastic analysis of displacements. There were identified the areas with low values of effective confining pressure and maximum shear stresses where strong earthquakes usually occur. Taking into account the stressed state of the Earth's crust, on the basis of the prognostic parameters of the seismic regime within the South Fergana seismic activity zone there were identified two areas in which $M \geq 6.0$ earthquakes may occur in the coming years.

KEYWORDS: seismic quiescence; seismic activation; seismic gap; earthquake forecast; recurrence curve; stress state; stress reconstruction

FUNDING: The study was carried out as art of a state assignments of the Mavlyanov Institute of Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan and the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Roman S. Ibragimov, ibrroma@yandex.ru

Received: March 22, 2022

Revised: July 4, 2022

Accepted: July 13, 2022

FOR CITATION: Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2023. The Probability of a Strong ($M \geq 6.0$) Earthquake in the South Fergana Seismic Activity Zone in the Coming Years. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0688. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0688

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНОГО (МАГНИТУДА $M \geq 6.0$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЮЖНО-ФЕРГАНСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЕ В БЛИЖАЙШИЕ ГОДЫ

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

¹ Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 100128, Ташкент, ул. Зулфияхонум, 3, Узбекистан

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследован сейсмический режим и напряженное состояние земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны. В центральной части зоны выявлен участок, на котором наблюдается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$). По всей протяженности области сейсмического затишья отмечается активизация по землетрясениям низких энергетических классов, а также аномальные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений. Для локализации места возможной сейсмической активизации проведена реконструкция современного напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны методами катакластического анализа разрывных смещений с привлечением механизмов очагов землетрясений. Определены участки с низкими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений, в которых, как правило, реализуются сильные землетрясения. С учетом особенностей напряженного состояния земной коры по совокупности прогностических параметров сейсмического режима в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны выделены две области, в которых в ближайшие годы могут произойти землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическое затишье; сейсмическая активизация; сейсмическая брешь; прогноз землетрясений; график повторяемости; напряженное состояние; реконструкция напряжений

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках госзаданий Института сейсмологии АН РУз и ИФЗ РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

На основе сейсмологических и сеймотектонических данных на территории Узбекистана выделено десять крупных сейсмоактивных зон [Artikov et al., 2015, 2018; Ibragimov et al., 2002], направление которых совпадает с простираем активными разломами земной коры (рис. 1): Ташкентская (1), Южно-Ферганская (2), Восточно-Ферганская (3), Нурекатино-Ангренская (4), Северо-Ферганская (5), Южно-Узбекистанская (6), Амударьинская (7), Южно-Тянь-Шаньская (Газли-Каратагский фрагмент) (8), Северо-Тамдынская (9) и Таласо-Ферганская (10). В пределах этих зон произошло подавляющее большинство сильных землетрясений за исторический и инструментальный период наблюдений. Формализованный подход к выявлению областей ожидаемой сейсмической активизации, расположенных в пределах этих сейсмоактивных зон, используется на территории Узбекистана с 2015 г. Он базируется на закономерностях в изменении параметров сейсмического режима в очаговых областях сильных землетрясений в период их подготовки [Mogi, 1985; Sobolev, 1993; Zavyalov, 2006; Artikov et al., 2018] и на особенностях проявления совокупности сильных землетрясений в пределах сейсмоактивных зон [Artikov et al., 2018, 2020, 2021, 2022]. За истекший период времени карты долгосрочного прогноза землетрясений обновлялись с учетом меняющейся геодинамической обстановки в регионе каждые 1.5–2.0 года и в целом показали свою достаточно высокую эффективность [Artikov et al., 2020, 2021, 2022]. Данное исследование посвящено изучению текущей сейсмологической обстановки

в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне, которая характеризуется наибольшей по сравнению с остальными сейсмоактивными зонами сейсмической активностью, в том числе и на уровне сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясений. На одном из участков данной зоны в настоящее время отмечаются ярко выраженные аномалии в различных параметрах сейсмического режима, которые могут свидетельствовать о подготовке сильного землетрясения. Наряду с временными флуктуациями параметров сейсмического режима, позволяющими судить о стадии процесса, через которую проходит сейсмоактивный объем, в статье рассматриваются особенности современного напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны. Параметры напряженного состояния определялись методом катакластического анализа разрывных смещений [Rebetsky, 2007] с привлечением механизмов очагов землетрясений. Эти данные могут быть полезны для уточнения места будущего разрыва. В результате проведенных реконструкций [Rebetsky et al., 2020; Ibragimova et al., 2021; Artikov et al., 2021] удалось установить, что в пределах того участка, где в настоящее время отмечаются интенсивные аномалии в параметрах сейсмического режима, существуют области с пониженными значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. В работах [Rebetsky, 2007; Rebetsky, Tatevossian, 2013; Rebetsky et al., 2016, 2020] отмечается, что именно на таких участках реализованы наиболее благоприятные условия для крупномасштабного разрушения.

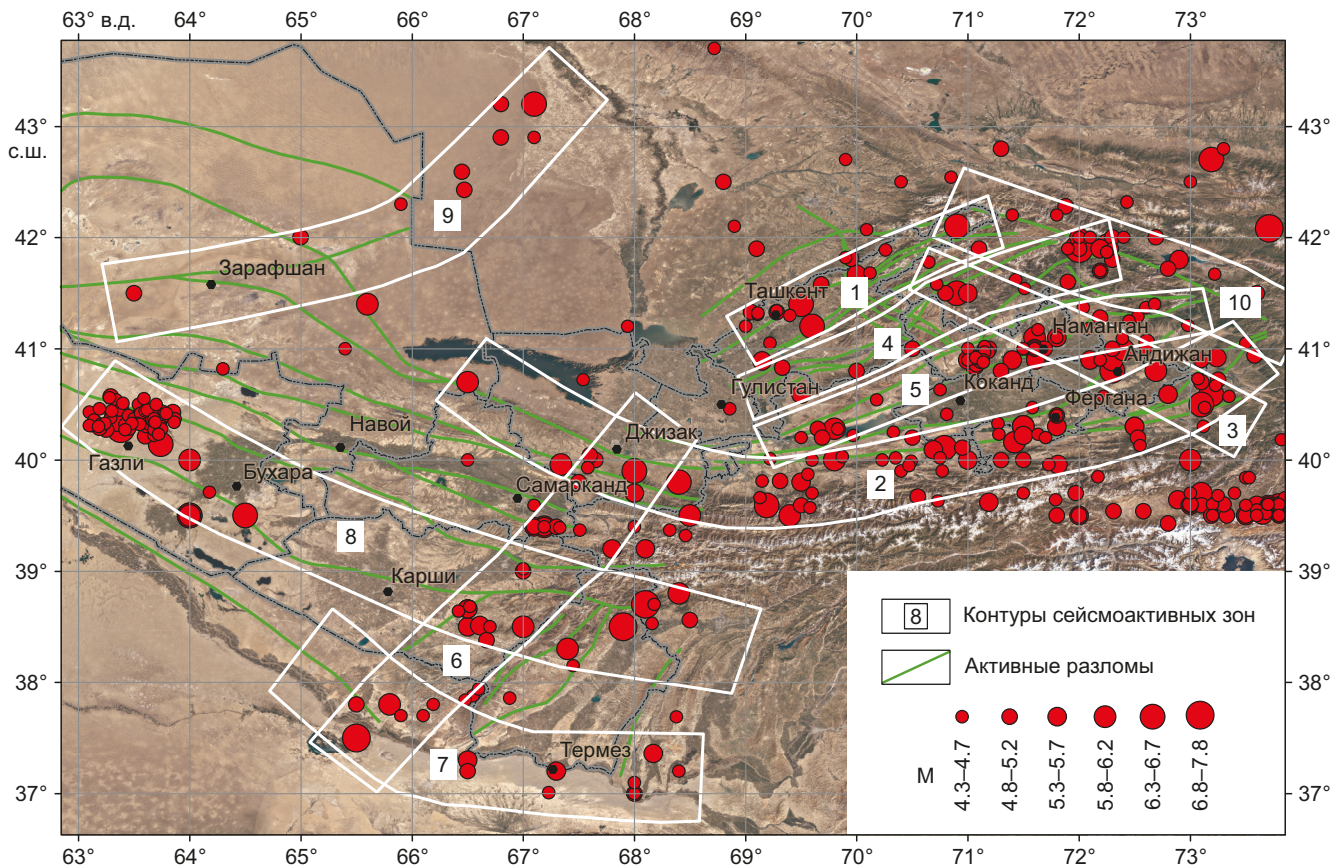


Рис. 1. Сейсмоактивные зоны Узбекистана и эпицентры ощутимых и сильных землетрясений за исторический и инструментальный период времени.

Fig. 1. Seismic activity zones of the Uzbekistan territory and epicenters of strong and perceptible earthquakes over the historical and instrumental observation periods.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

Южно-Ферганская сейсмоактивная зона (рис. 2) имеет длину около 700 км и ширину 40–50 км. Она простирается в субширотном направлении вдоль Алайского и Туркестанского хребтов на востоке и Нуратинского хребта – на западе. В центральной и восточной части Южно-Ферганская сейсмоактивная зона охватывает область динамического влияния системы Южно-Ферганских, Куршабских и Талдысуйских разломов субширотного простирания. В западной части сейсмичность Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны обусловлена современной геодинамической активностью Бесаянских и Северо-Нуратинских разломов северо-западного простирания. Считается, что в современной тектонической структуре Западного Тянь-Шаня системы перечисленных разломов являются гранью между погружающейся Ферганской впадиной и воздымающейся Алай-Туркестанской мегантиклиналью [Ibragimov et al., 2002].

В пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны произошло множество землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$. К наиболее сильным землетрясениям западной части данной зоны относятся следующие сейсмические

события: историческое землетрясение 1892 г. с магнитудой $M=6.1$ в районе пос. Нурата и два Ура-Тюбинских землетрясения с магнитудой $M=6.6$ и $M=6.7$, произошедшие в 1897 г. с интервалом в два часа на расстоянии около 50 км друг от друга. Сильнейшие землетрясения центральной части данной зоны – историческое Костакюзское землетрясение 1888 г. с магнитудой $M=6.2$, а также три землетрясения, произошедшие за последние 50 лет: Исфара-Баткенское 1977 г. с магнитудой $M=6.4$, Чимионское 1982 г. с магнитудой $M=5.8$ и Канское 2011 г. с магнитудой $M=6.1$. Наиболее сильными землетрясениями восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны считаются два Куршабских землетрясения 1924 г. с магнитудой $M=6.4$ и $M=6.5$, возникшие в области сочленения Южно-Ферганской зоны с восточным окончанием Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны. Макросейсмический эффект в ближней зоне для каждого из этих землетрясений составлял не менее 7–8 баллов по шкале MSK-64.

В качестве информационной основы для изучения сейсмического режима Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны использовался региональный каталог Института сейсмологии АН РУз, включающий в себя параметры исторических и инструментальных сейсмических событий. 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 [Rautian, 1960; Rautian et al., 2007]. Энергетический класс связан с высвобожденной при землетрясениях сейсмической энергией E зависимостью $K=lgE$ (Дж). В различные временные промежутки двух последних десятилетий для количественной

характеристики величины землетрясений использовались следующие типы магнитуд: M_b , $MPVA$, M_s , MLH . Связь между энергетическим классом землетрясения K и перечисленными типами магнитуд, присутствующими в региональном каталоге, осуществлялась на основе зависимостей [Mukambaev, Mikhailova, 2014], полученных для землетрясений Центральной Азии. В дальнейшем изложении, наряду с энергетическим классом землетрясения K , будет использоваться магнитуда M_b ,

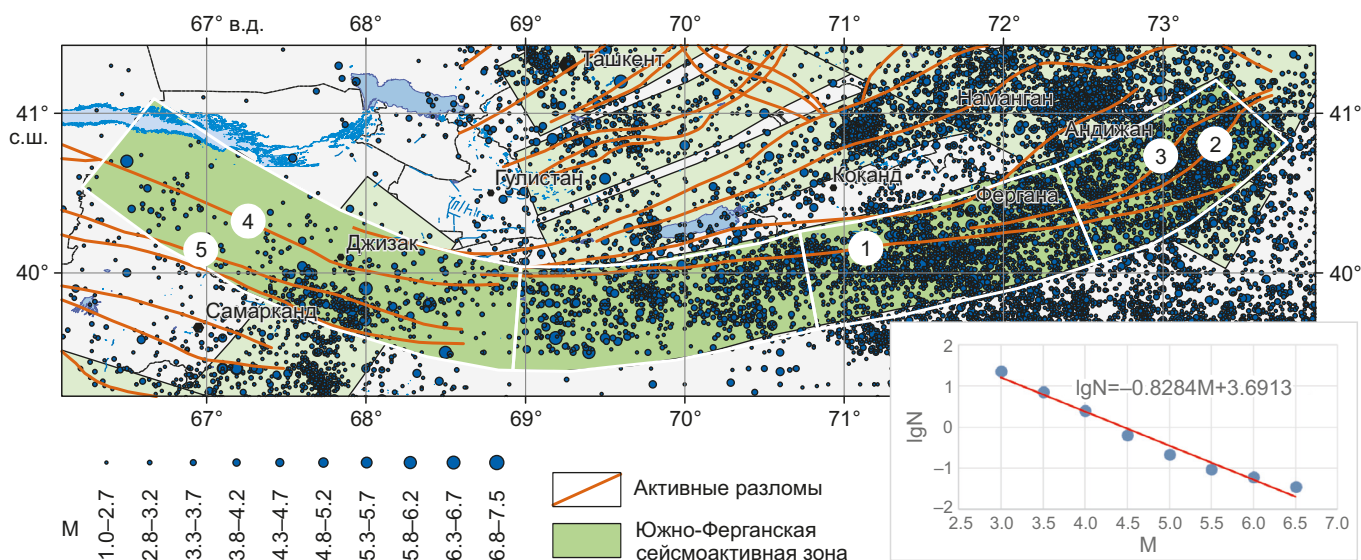


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений и активные разломы земной коры. Цифры в кружках – номера разломов, входящих в Южно-Ферганскую сейсмоактивную зону: 1 – Южно-Ферганский, 2 – Куршабский, 3 – Талдысуйский, 4 – Бесapanский, 5 – Северо-Нуратинский. Врезка в нижнем правом углу – график повторяемости землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Fig. 2. Map of earthquake epicenters and active faults in the Earth’s crust. The numbers in the circles are the numbers of the faults in the South Fergana seismic activity zone: 1 – South Fergana, 2 – Kurshab, 3 – Taldysai, 4 – Besapan, 5 – North-Nurata. The inset in the lower right corner shows the earthquake recurrence curve for the South Fergana seismic activity zone.

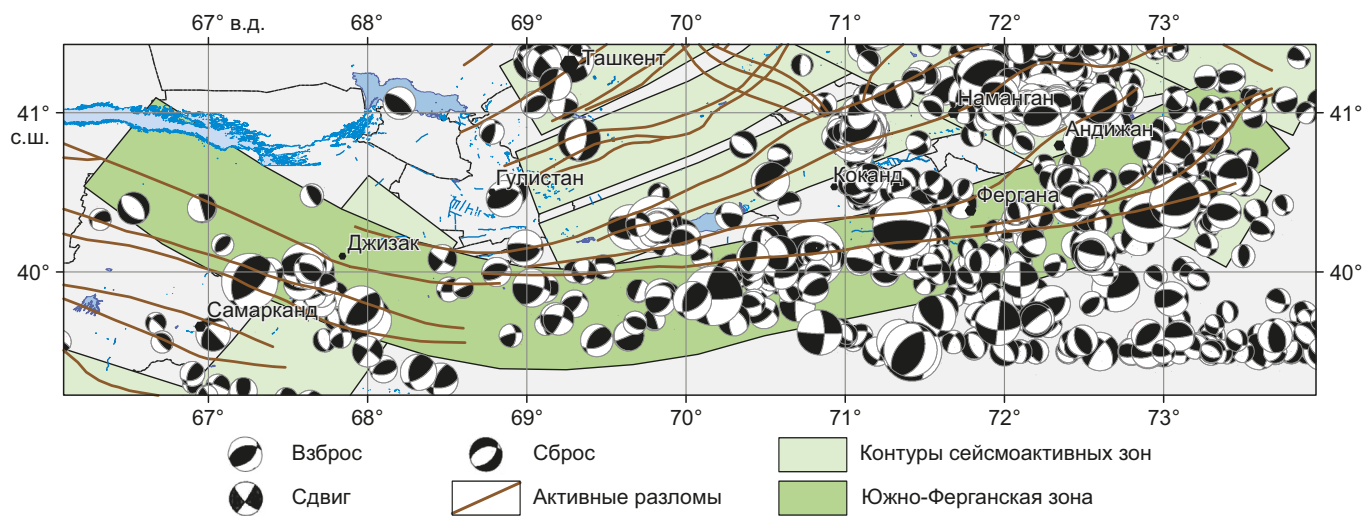


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, для которых имелись определения механизма очага.

Fig. 3. A map of earthquake epicenters in the South Fergana seismic activity zone, for which the focal mechanism solutions were available.

определяемая по объемным волнам, которая в настоящее время рассчитывается для каждого сейсмического события, происходящего на территории Узбекистана и сопредельных с ним районов.

Реконструкция напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны проводилась по алгоритмам метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений, разработанным в ИФЗ РАН с привлечением программного комплекса STRESSseism [Rebetsky, 2007]. Исходным материалом для проведения реконструкции являлась выборка параметров механизмов очагов землетрясений исследуемой территории, сформированная из сводного каталога механизмов очагов землетрясений Узбекистана [Ibragimova et al., 2021; Rebetsky et al., 2020]. Карта эпицентров землетрясений выборки с указанием механизма очага показана на рис. 3. Как это следует из рисунка, западная, центральная и восточная части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны представлены примерно равным количеством землетрясений, для которых имелись определения механизма очага, и преобладающим кинематическим типом подвижки в очагах землетрясений исследуемой зоны являются взбросы.

В результате реконструкций природных напряжений, проводимых алгоритмами МКА, в каждой точке исследуемой области определяется пространственное положение осей главных напряжений, геодинамический тип напряженного состояния земной коры, а также коэффициент Лодэ – Надаи, характеризующий вид тензора напряжений. Весьма полезным результатом инверсий, осуществляемых алгоритмами МКА, является определение относительных (нормированных на прочность сцепления горных пород) величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Сейсмичность и сейсмический режим Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны

График повторяемости землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, построенный по землетрясениям с магнитудой от $M=3.0$ до $M=6.5$ при их

полумagnitude классификации по величине, показан на врезке к рис. 2. При построении зависимости Гутенберга – Рихтера $lgN=a-bM$ учитывались сроки представительной регистрации землетрясений каждого magnitude уровня [Yakubov, Sokolov, 1990]. Поскольку сейсмические события распределены в пределах сейсмоактивной зоны неравномерно, Южно-Ферганская сейсмоактивная зона была разбита на четыре сегмента, нумерация которых начинается с запада. Коэффициенты a и b в зависимости Гутенберга – Рихтера были также рассчитаны отдельно для каждого из этих сегментов. Сейсмическая активность (параметр a в зависимости Гутенберга – Рихтера) в самом западном сегменте зоны (сегмент 1) существенно ниже, чем в трех других сегментах. Вместе с тем достаточно низкое значение углового коэффициента графика повторяемости (параметр b в зависимости Гутенберга – Рихтера) в этом сегменте зоны свидетельствует о том, что наиболее сильные (с магнитудой $M \geq 5.5$) землетрясения здесь повторяются не реже, чем в остальных сегментах, расположенных восточнее. В табл. 1 приведены средние для всей Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны и ее различных сегментов периоды повторения землетрясений с магнитудой, большей или равной заданной в диапазоне от $M=3.0$ до $M=6.5$.

Средний период повторения сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясений во всей сейсмоактивной зоне составляет 2.5–3.0 года, а землетрясения с максимальной наблюдавшейся магнитудой ($M \geq 6.5$) повторяются в среднем один раз в 45–50 лет. Для различных сегментов сейсмоактивной зоны периоды повторения землетрясений различной магнитуды могут отличаться между собой в несколько раз.

Исходя из даты последнего землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$, в каждом сегменте и средних периодов повторения сейсмических событий такой величины, определенных по графику повторяемости (зависимость Гутенберга – Рихтера), была рассчитана вероятность возникновения сильного (магнитуда $M \geq 5.0$) землетрясения на текущий момент в предположении, что такие события образуют Пуассоновский поток. На рис. 4 приведено районирование исследуемой зоны по описанному выше принципу.

Таблица 1. Средняя частота возникновения землетрясений различной магнитуды в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне и в различных ее сегментах

Table 1. Average frequency of occurrence of different-magnitude earthquakes in the South Fergana seismic activity zone and in some of its segments

Район	$M \geq 3.0$	$M \geq 3.5$	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$	$M \geq 6.5$
Вся зона	2–3 недели	1.5–2.0 мес.	5–6 мес.	1 год	2.5–3.0 года	7–8 лет	18–20 лет	45–50 лет
Сегмент 1 (запад)	9–10 мес.	1.5–2.0 года	3.5–4.0 года	8–9 лет	18–19 лет	40–45 лет	90–100 лет	200–250 лет
Сегмент 2	2–3 мес.	7–8 мес.	1.5–2.0 года	5.0–5.5 лет	14–15 лет	40–45 лет	110–120 лет	300–350 лет
Сегмент 3	2.0–2.5 мес.	5–6 мес.	1.0–1.5 года	3–3.5 лет	8–10 лет	20–25 лет	60–70 лет	160–180 лет
Сегмент 4 (восток)	2.0–2.5 мес.	5–6 мес.	1.0–1.5 года	3.0–3.5 лет	8–9 лет	20–25 лет	55–65 лет	150–170 лет

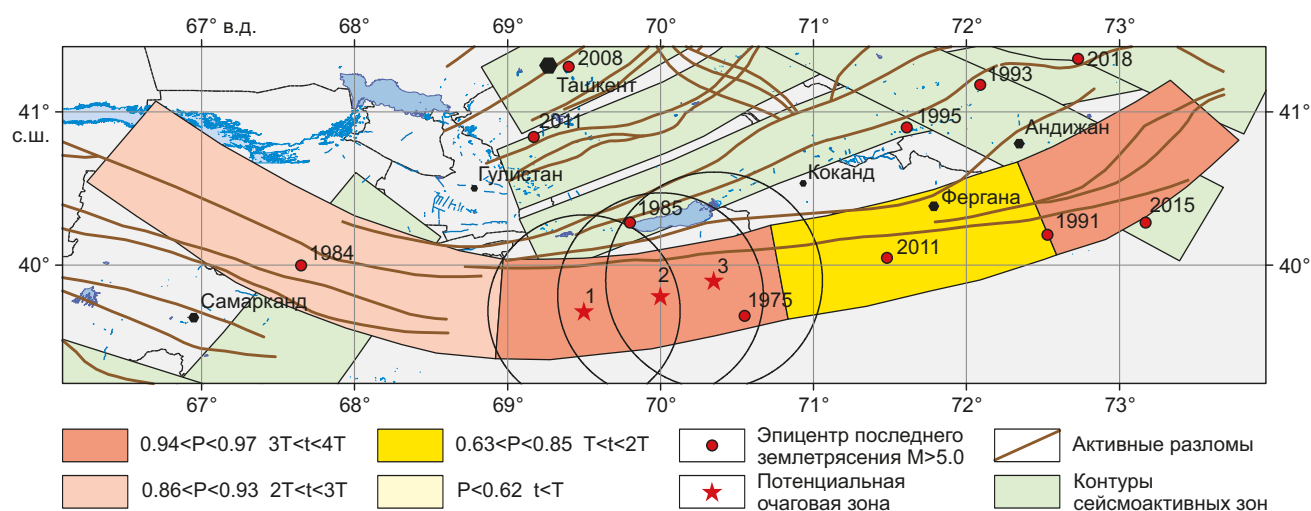


Рис. 4. Области с различной вероятностью возникновения сильного землетрясения по длительности сейсмической паузы в землетрясениях с магнитудой $M \geq 5.0$.

Кругами с центрами в точках, помеченных звездочками, показаны области, для которых рассчитывались временные флуктуации различных параметров сейсмического режима.

Fig. 4. The areas with different probability of occurrence of a strong earthquake according to the duration of the quiescence period for earthquakes with magnitude $M \geq 5.0$.

Circles with centers in the points marked with asterisks show the areas for which temporal fluctuations of various parameters of a seismic mode were calculated.

Период повторяемости землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в первом (самом западном) сегменте Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны составляет $T_{M \geq 5.0} = 18-19$ лет. Последнее сильное землетрясение в данном сегменте произошло в 1984 г. (Галляларальское землетрясение, $M=5.1$). Промежуток времени t , в течение которого не происходило сильных землетрясений (с 1985 по 2021 г.), более чем в два раза превышает средний период повторяемости землетрясений такого уровня, поэтому вероятность его возникновения на текущий момент составляет $P_{M \geq 5.0} = 0.859$. Последнее сильное землетрясение во втором сегменте Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны произошло в 1975 г. и имело магнитуду $M=5.0$. С учетом средней частоты повторения землетрясений такой силы (один раз в 14–15 лет), его вероятность на сегодня составляет $P_{M \geq 5.0} = 0.96$. Третий сегмент Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны характеризуется относительно невысокой вероятностью ($P=0.67$) возникновения сильного землетрясения в ближайшие годы, поскольку последнее сильное землетрясение в этом сегменте было относительно недавно (Канское землетрясение, $M=6.2$, 2011 г.). Наконец, в самом восточном, четвертом, сегменте зоны длительность сейсмической паузы очень большая. Последнее сильное землетрясение произошло здесь в 1991 г. При среднем периоде повторяемости таких землетрясений $T=8-9$ лет вероятность его возникновения на текущий момент времени составляет $P_{M \geq 5.0} = 0.968$.

На рис. 5 показан пространственно-временной график развития сейсмического процесса в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. По оси абсцисс отложено расстояние от эпицентра землетрясения до самой

крайней точки оси сейсмоактивной зоны, расположенной на западе, по оси ординат – время возникновения землетрясения. Красными кружками с заливкой показаны землетрясения с $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

Обращает на себя внимание сформировавшаяся к настоящему времени область сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$) в центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны (между отметками в 200 и 400 км по оси зоны), которая может свидетельствовать о подготовке на данном участке зоны сильного (с магнитудой $M \geq 5.0$) землетрясения. Эта область отмечена на рис. 5 зеленой линией. В исследованиях [Sobolev, 1993; Zavyalov, 2006; Artikov et al., 2012] отмечается высокая информативность данного прогностического признака, когда за несколько лет до момента сильного землетрясения уменьшается число или полностью исчезают сейсмические события, магнитуда которых отличается от магнитуды ожидаемого основного толчка на 2.0–2.5 (3–4 энергетических класса при энергетической классификации землетрясений по величине). Впервые несколько убедительных примеров проявления поклассового сейсмического затишья в Южно-Тянь-Шаньской и Южно-Ферганской сейсмоактивных зонах, предшествовавших возникновению сильнейших землетрясений в их пределах (Алайское землетрясение 1976 г. с $K=16.5$, Исфара-Баткентское землетрясение 1977 г. с $K=15.5$), приведены в работе Р.С. Михайловой [Mikhailova, 1980].

Для уточнения сейсмологической обстановки в области, где в настоящее время наблюдается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$), были проанализированы

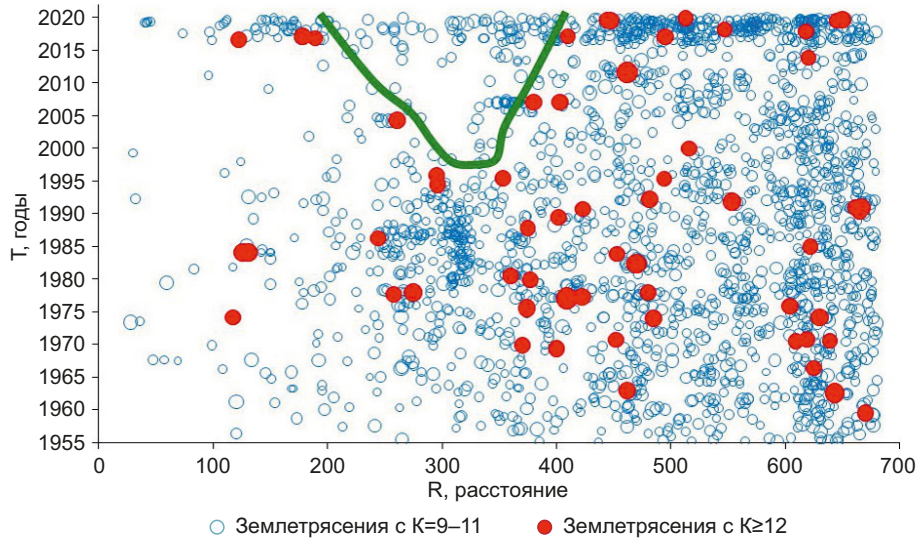


Рис. 5. Пространственно-временной график развития сейсмического процесса в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. Линией зеленого цвета показана область сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

Fig. 5. Spatiotemporal curve of seismic process development in the South Fergana seismic activity zone. The green line shows the area of quiescence for earthquakes with $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

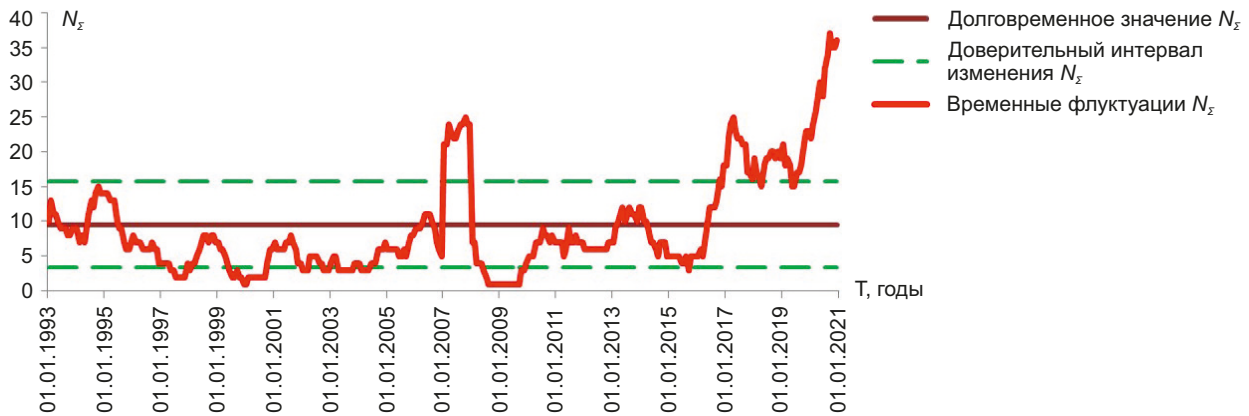


Рис. 6. Временные флуктуации параметра N_z в точке № 2, расположенной в области сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

Fig. 6. Temporal fluctuations of parameter N_z in point 2, located in the area of seismic quiescence for earthquakes with $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

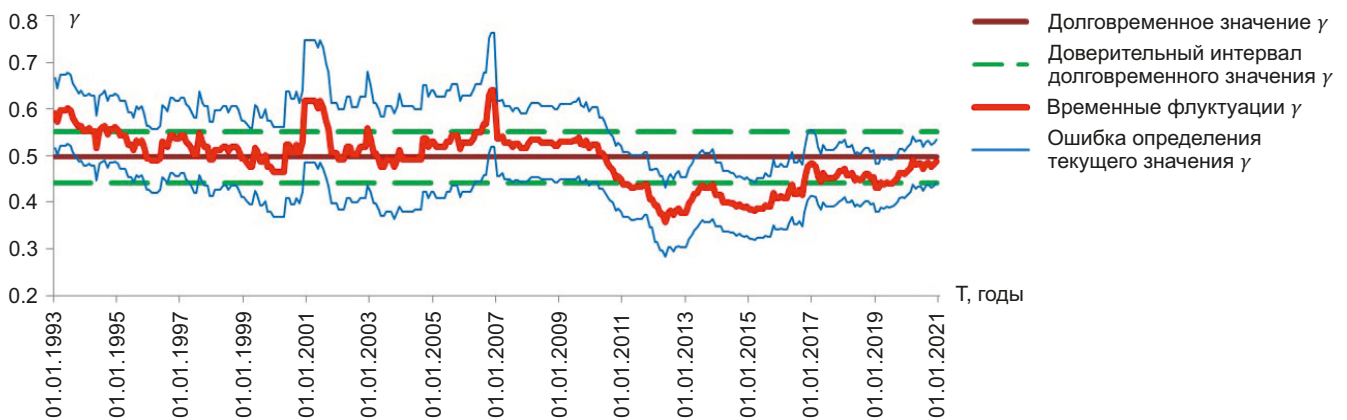


Рис. 7. Временные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ) в точке № 2, расположенной в области сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

Fig. 7. Temporal fluctuations of the earthquake recurrence curve slope (parameter γ) in point 2, located in the area of seismic quiescence for earthquakes with $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$).

временные флуктуации суммарного числа представительных землетрясений N_{Σ} и временные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ). Расчет этих параметров проводился для нескольких точек, расположенных в выделенной «области запрета» на землетрясения с $K \geq 12$. Местоположение точек, для которых рассчитывались временные флуктуации параметров сейсмического режима, показано красными звездочками на рис. 4. Радиус кругов, в пределах которых проводилось осреднение параметров, варьировался от 30 до 70 км. Временное окно при расчете параметра N_{Σ} составляло один год, а для параметра γ , для обеспечения устойчивых статистических оценок, – 5 лет. В каждой из трех рассмотренных точек, независимо от выбираемого радиуса осреднения, на текущий момент наблюдается единообразное поведение параметров N_{Σ} и γ . Для примера на рис. 6, 7 приведены временные флуктуации параметров N_{Σ} и γ в 70-километровой окрестности точки № 2.

По параметру N_{Σ} , на фоне отсутствия землетрясений с $K \geq 12$, отмечается значимое возрастание числа более слабых толчков с энергетическим классом $K=9-11$, которое началось с 2017 г. При этом отмечается дисбаланс между средним долговременным соотношением числа землетрясений различного энергетического уровня, проявляющийся в уменьшении значения угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ). Согласно существующим моделям, описывающим процесс подготовки тектонического землетрясения, уменьшение параметра γ является весьма информативным прогностическим признаком, и обычно его связывают с укрупнением мелких трещин при формировании магистрального разрыва [Sobolev, 1993; Zavyalov, 2006; Sobolev, Ponomarev, 2003].

С учетом единообразного характера временных изменений параметров сейсмического режима в каждой из трех рассматриваемых точек (независимо от радиуса осреднения параметров N_{Σ} и γ) сузить область ожидания сильного землетрясения, основываясь только на вариациях этих параметрах, достаточно сложно. Полезную информацию о возможной локализации потенциального очага разрушения могут нести особенности современного напряженного состояния земной коры исследуемой территории, устанавливаемые на основе анализа механизмов очагов землетрясений.

3.2. Напряженное состояние земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны

Реконструкция напряженного состояния земной коры территории Узбекистана, включая территорию исследований, проводилась по алгоритмам МКА. Расчет параметров напряженного состояния осуществлялся по сетке $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ при минимальном размере однородной выборки, состоящей из пяти определений механизмов очагов землетрясений в радиусе осреднения [Rebetsky et al., 2020]. При этом сам радиус круговой области для формирования однородных выборок в каждой расчетной точке варьировался от 15 до

60 км. С целью детализации получаемых результатов проводились дополнительные реконструкции по сетке $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ по землетрясениям различного магнитудного уровня, произошедших в различных глубинных слоях земной коры [Ibragimova et al., 2021; Rebetsky et al., 2020]. Минимальный размер однородных выборок для таких реконструкций включал не менее шести событий, попадающих в радиус усреднения, а сам радиус варьировался от 10 до 30 км. Согласно результатам этих исследований, в центральной и восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны азимут оси минимального главного напряжения (максимального сжатия) σ_3 имеет в основном меридиональное, а в западной части зоны – юго-восточное направление (рис. 8). В большинстве случаев азимут оси максимального сжатия σ_3 ортогонален азимуту простирания активных разломов земной коры. Угол погружения оси σ_3 меняется в небольших пределах – от 10 до 20° от горизонта. Азимут оси максимального главного напряжения σ_1 имеет преимущественно близширотное направление, а угол погружения от горизонта оси главного максимального напряжения σ_1 варьируется для различных участков исследуемой зоны от 60 до 90°.

Соотношения между осями главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 в механике горных пород обычно выражают через коэффициент Лодэ – Надаи μ_o , который в зависимости от своего значения характеризует напряженное состояние как чистый сдвиг ($\mu_o=0$), одноосное сжатие ($\mu_o=1$), одноосное растяжение ($\mu_o=-1$).

В пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны число доменов с напряженным состоянием, близким к чистому сдвигу ($-0.2 < \mu_o < 0.2$), к одноосному сжатию ($\mu_o \geq 0.6$) и к одноосному растяжению ($\mu_o \leq -0.6$), приблизительно одинаковое (рис. 8). При этом большая часть доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию, расположена в западной части зоны, а с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению и чистому сдвигу, – в восточной части Южно-Ферганской зоны.

В рамках алгоритма МКА было проведено районирование Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны по геодинамическим типам напряженного состояния земной коры. Преобладающим геодинамическим типом напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны является режим горизонтального сжатия (более 85 % исследуемой территории). Такой тип напряженного состояния земной коры определяет возникновение взбросов (ось максимального сжатия σ_3 близгоризонтальна, а ось минимального сжатия σ_1 близвертикальна). Области с геодинамическим типом горизонтального растяжения расположены в основном в юго-восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, и южнее этой зоны – в пределах Алайского хребта и одноименной долины. Этот тип напряженного состояния земной коры определяет возникновение сбросов (ось растяжения σ_1 близгоризонтальна, а ось максимального сжатия σ_3

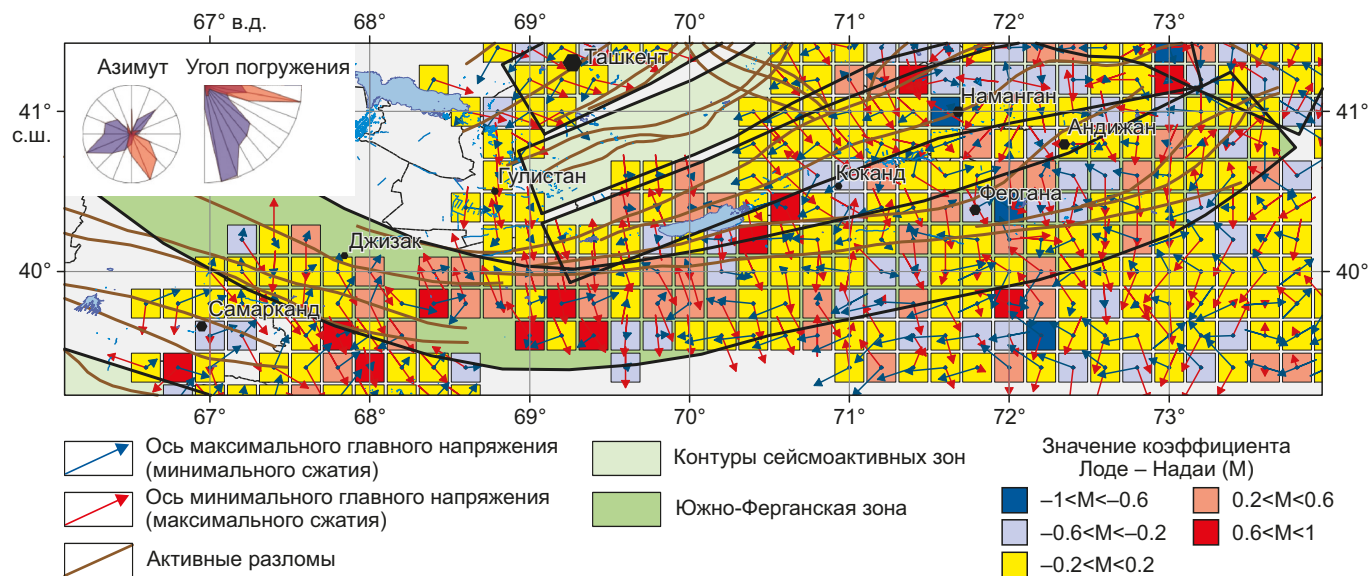


Рис. 8. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений минимального (σ_1) и максимального (σ_3) сжатия и площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне.

Fig. 8. Projections on the horizontal plane of the principal stress axes of minimum (σ_1) and maximum (σ_3) compression and the areal distribution of the Lode-Nadai coefficient in the South Fergana seismic activity zone.

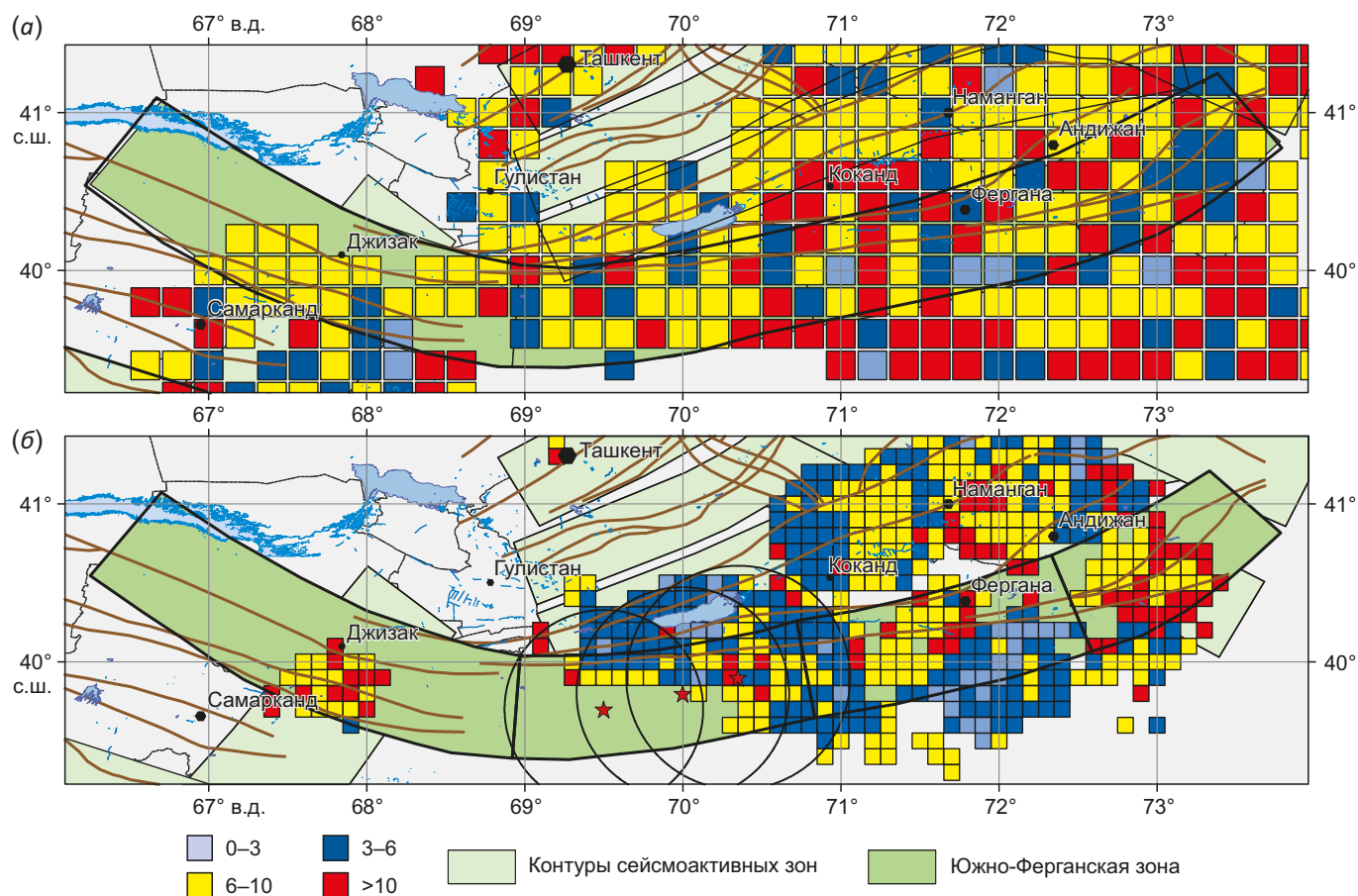


Рис. 9. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления горных пород величины эффективного всестороннего давления (p^*/τ) в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне при различных вариантах проведенной реконструкции: (а) – для всего сейсмоактивного слоя в целом, (б) – для глубин $H \geq 11$ км.

Fig. 9. Areal distribution of the effective confining pressure values (p^*/τ), normalized to cohesive strength of the rocks in the South Fergana seismic activity zone for different variants of the reconstruction: (а) – for seismic activity layer as a whole, (б) – for depths $H \geq 11$ km.

близвертикальна). Наконец, единичные области горизонтального сдвига (обе оси главных напряжений σ_1 и σ_3 близгоризонтальны) присутствуют в центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны [Ibragimova et al., 2021; Rebetsky et al., 2020].

На рис. 9 показано площадное распределение нормированной на прочность сцепления горных пород τ_f величины эффективного всестороннего давления p^* (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства $p^* = p - p_{фл}$, где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$) при различных вариантах реконструкции напряжений в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. Если в результате реконструкции, проведенной по всей совокупности землетрясений, области больших и малых значений величины p^*/τ_f расположены достаточно мозаично (рис. 9, а), то по результатам инверсии по механизмам очагов с магнитудой $M > 4.5$, которая фактически отражает напряженное состояние сейсмоактивного слоя, расположенного ниже глубины $H = 10$ км, где сосредоточена основная масса землетрясений такого уровня, области повышенных и пониженных значений величины p^*/τ_f достаточно хорошо структурированы (рис. 9, б).

Как правило, наиболее сильные (с магнитудой $M \geq 6.0$) землетрясения происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений [Rebetsky, 2007; Rebetsky, Tatevossian, 2013; Rebetsky et al., 2016, 2020]. Это связывают с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, а это создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения.

Как следует из рис. 9, б, в каждую из трех круговых областей, в которых наблюдались аномалии в параметрах сейсмического режима, попадают значительные по площадным размерам участки с пониженными значениями величины p^*/τ_f , в которых напряженно-деформированное состояние земной коры является

благоприятным для возникновения сильных землетрясений.

Дополнительную информацию о местоположении области, где в ближайшие годы возможна сейсмическая активизация, несет анализ пространственного положения очагов сильных землетрясений в сейсмоактивной зоне. Авторами настоящего исследования было показано, что эпицентры сильных землетрясений, произошедших на территории Узбекистана за исторический и инструментальный период времени, не располагаются равномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в компактных областях с линейными размерами около 50–80 км [Artikov et al., 2018, 2020, 2021]. В связи с малой изменчивостью в течение десятков и сотен лет направленности протекания сеймотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных зон, именно эти области с высокой степенью вероятности проявят себя сейсмической активностью на уровне сильных землетрясений и в ближайшие десятилетия. Для исследуемого района области с высокой концентрацией сильных землетрясений показаны на рис. 10.

На участок, в котором были выявлены аномалии в параметрах сейсмического режима (длительная сейсмическая пауза в возникновении землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$, отсутствие землетрясений с $M \geq 4.5$, активизация по слабым землетрясениям, аномалии угла наклона графика повторяемости), приходится три такие области с номерами: 3, 4 и 10. Последняя из этих областей находится в области сочленения Южно-Ферганской и Северо-Ферганской сейсмоактивных зон. С учетом размера территории, охваченной аномальными процессами, интенсивности и длительности проявления аномальных флуктуаций есть все основания считать, что в пределах одной из названных областей в ближайшие несколько лет произойдет сильное ($M \geq 6.0$) землетрясение.

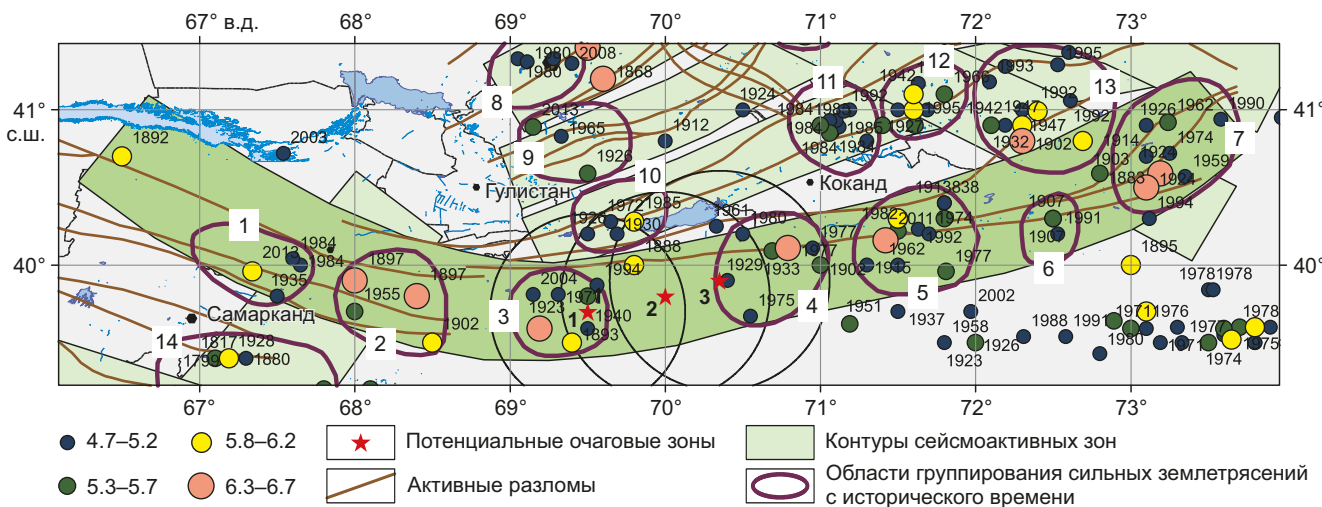


Рис. 10. Области реализации сильных землетрясений за исторический и инструментальный период времени.
 Fig. 10. Areas of occurrence of strong earthquakes over the historical and instrumental observation periods.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования сводятся к следующему.

1. Южно-Ферганская сейсмоактивная зона характеризуется высоким уровнем сейсмической активности. За исторический период времени и за инструментальный промежуток наблюдений в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны неоднократно происходили землетрясения с магнитудой $M \geq 6.5$ и интенсивностью сотрясений в эпицентре $I_0 \geq 8$ баллов по шкале MSK-64. Сейсмическая активность в пределах сейсмоактивной зоны распределена неравномерно. На уровне слабых и умеренных землетрясений восточная часть Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны является более активной, чем западная. На уровне наиболее сильных землетрясений (магнитуда $M=6.0-6.5$), возможных в ее пределах, активность по всей протяженности зоны примерно одинаковая. Средний период повторяемости землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне составляет 2.5–3.0 года. В пределах различных сегментов Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны период повторения землетрясений такой силы варьируется от 8–9 до 18–20 лет.

2. В настоящее время в двух сегментах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны отмечается длительная сейсмическая пауза в возникновении землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$. В каждом из этих сегментов время отсутствия землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$ более чем в три раза превосходит период повторяемости таких землетрясений, рассчитанный по зависимости Гуттенберга – Рихтера.

3. Анализ пространственно-временных графиков развития сейсмичности в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны позволил выявить в ее центральной части участки, на которых отмечается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4.5$). Для данного участка проведен детальный анализ временных изменений параметров сейсмического режима. Установлено, что по всей протяженности области сейсмического затишья по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ отмечается сейсмическая активизация по землетрясениям низких энергетических классов, а также аномальные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений. Подобные аномальные изменения предшествовали ряду сильных землетрясений, произошедших в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, что свидетельствует об их прогностической значимости.

4. Для локализации места возможной сейсмической активизации проведена реконструкция современного напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны методами катакластического анализа разрывных смещений с привлечением механизмов очагов землетрясений. В каждой точке исследуемой зоны установлено пространственное положение осей главных напряжений, геодинамический тип напряженного состояния земной коры, коэффициент

Лоды – Надаи, определяющий вид тензора напряжений, а также относительные величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

5. С учетом того, что сильные (с магнитудой $M \geq 6.0$) землетрясения обычно происходят в областях с низкими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений (поскольку в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, а это создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения), в пределах выделенной области сейсмического затишья определены участки пониженных значений параметра p^*/τ_f .

6. С учетом установленных ранее особенностей пространственной локализации сильных землетрясений, произошедших за исторический и инструментальный период времени, в компактных областях в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны выделены два участка, где в ближайшие годы возможно сильное, с магнитудой $M \geq 6.0$, землетрясение.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made a significant contribution to this article, read and approved the final manuscript.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2018. Identification of Expected Seismic Activity Areas by Forecasting Complex Seismic-Mode Parameters in Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics* 9 (2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.11.005>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2020. Experience of Assessing the Current Seismological Situation on the Uzbekistan Territory by the Complex of Forecast Parameters of the Seismic Mode. *Journal of Civil Protection* 4 (3), 265–279 (in Russian) [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. 2020. Т. 4. №3. С. 265–279]. <http://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.265>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Artikov M.T., 2015. Revealing of Seismic Activation Interrelationships in Various Seismoactive Zones. *Geodesy and Geodynamics* 6 (5), 351–360. <http://doi.org/10.1016/j.geog.2015.03.007>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2021. Methods and Results of Long-Term Strong Earthquakes Forecast in the Uzbekistan Territory. In: Problems of Geodynamics and Genecology of Intracontinental Orogens. Proceedings of the VIII International Symposium (28 June – 2 July, 2021, Bishkek). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 929, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/929/1/012028>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2022. Stress State of the Earth's Crust, Seismicity, and Prospects for Long-Term Forecast of Strong Earthquakes in Uzbekistan. *Russian Geology and Geophysics* 63 (12), 1442–1458. <https://doi.org/10.2113/RG20214408>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ziyaudinov F.F., 2012. Seismic Hazard of the Uzbekistan Territory. Fan, Tashkent, 254 p. (in Russian) [Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. Ташкент: Фан, 2012. 254 с.].

Ibragimov R.N., Nurmatov U.O., Ibragimov O.R., 2002. Seismotectonic Method for Assessing Seismic Hazard and Issues of Seismic Zoning. In: *Seismic Zoning and Earthquake Forecasting in Uzbekistan*. Hydroingeo, Tashkent, p. 59–74 (in Russian) [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: Гидроингео, 2002. С. 59–74].

Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2021. The Current Stress of Earth's Crust in the Territory of Uzbekistan According to Focal Earthquake Mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 435–454 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>.

Mikhailova R.S., 1980. Dynamics of the Development of Seismic Quiescence Regions and Forecast of Strong Earthquakes. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth* 10, 12–22 (in Russian) [Михайлова Р.С. Динамика развития областей сейсмических затиший и прогноз сильных землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. 1980. № 10. С. 12–22].

Mogi K., 1985. *Earthquake Prediction*. Academic Press, Tokyo, 382 p.

Mukambaev A.S., Mikhailova N.N., 2014. Solution of the Problem of Inhomogeneity of Magnitudes in Seismic Sounding Studies of the Republic of Kazakhstan Territory. *Bulletin of NNC RK* 4, 86–92 (in Russian) [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].

Rautian T.G., 1960. Energy of Earthquakes. In: *Methods of Detailed Study of Seismicity*. Vol. 176. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, p. 75–114 (in Russian) [Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. № 176. С. 75–114].

Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D., 2007. Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales. *Seismological Research Letters* 78 (6), 579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>.

Rebetsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Natural Mountain Ranges. *Akademkniga*, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., 2020. Stress State of Uzbekistan's Seismically Active Areas. *Seismic Instruments* 56, 679–700. <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Sychev V.N., Kuzikov S.I., Marinin A.V., 2016. The Stress State of the Northern Tien Shan Crust Based on the KNET Seismic Network Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 387–408. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.003>.

Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E., 2013. Rupture Propagation in Strong Earthquake Sources and Tectonic Stress Field. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 184 (4–5), 335–346. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.4-5.335>.

Sobolev G.A., 1993. *Fundamentals of Earthquake Forecasting*. Nauka, Moscow, 314 p. (in Russian) [Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.].

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. *Physics of Earthquakes and Precursors*. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].

Yakubov M.S., Sokolov M.V., 1990. Analysis of the Effectiveness of the Network of Seismic Stations in Uzbekistan at the Main Stages of Its Development. In: K.N. Abdullabekov (Ed.), *Seismicity of the territory of Uzbekistan*. Fan, Tashkent, p. 19–28 (in Russian) [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: Фан, 1990. С. 19–28].

Zavyalov A.D., 2006. *Medium-Term Earthquake Forecast: Basics, Methodology, Implementation*. Nauka, Moscow, 254 p. (in Russian) [Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.].