

УДК 550.348. (575.3)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ТАДЖИКИСТАНА и ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ в 2021 году

Т.Р. Улубиева¹, Р.С. Михайлова², Л.И. Рислинг¹

¹Геофизическая служба Национальной академии наук Таджикистана,
г. Душанбе, Таджикистан, tanya_55_08@mail.ru
²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, rm-gs@mail.ru

Аннотация. В 2021 г. сейсмический мониторинг субрегиона «Таджикистан» территории Таджикистана с прилегающими районами нескольких государств – Узбекистана, Кыргызстана, Афганистана, Пакистана, Индии, Китая – осуществлялся сетью из семи цифровых сейсмических станций Геофизической службы НАН Республики Таджикистан. Всего зарегистрировано 8606 землетрясений в диапазоне $K_p=8.6–14.4$, из них 1424 – мелкофокусные толчки с $h=1–60$ км, разбросанные по всей территории зон I–III и 7482 – землетрясения промежуточных (70–301 км) глубин Памиро-Гиндукуша в зоне IV. Ощутимыми были 79 землетрясений, одно из которых, Таджикабадское 10 июля 2021 г. с $K_p=14.1$, $M_{WGCMT}=5.8$, $I_0=7–8$ баллов, было обследовано и описано в отдельной статье с построением карты изосейст. Сводный каталог механизмов очагов землетрясений содержит 23 события, для которых найдено 41 решение. Наиболее сильным землетрясением с очагом в земной коре явилось названное выше Таджикабадское землетрясение. В Афганской части промежуточных землетрясений реализовалась близширотная полоса из семи очагов с $K_p \geq 12.6$ с максимальным событием 16 января с $K_p=14.0$, а также группа из трех очагов на востоке Мургабской подзоны, максимальный среди которых, 12 февраля с $K_p=14.4$, $M_{WGCMT}=5.9$, оказался и максимальным среди всех событий каталога землетрясений Таджикистана в этом году. Суммарная энергия, выделившаяся в очагах всех землетрясений субрегиона, составила $\Sigma E=8.085 \cdot 10^{14}$ Дж, в том числе $\Sigma E=3.032 \cdot 10^{14}$ Дж при мелких событиях ($h < 70$ км) и $\Sigma E=5.053 \cdot 10^{14}$ Дж – при промежуточных ($h=70–301$ км).

Ключевые слова: цифровые станции, коровые землетрясения, промежуточные землетрясения, механизм очага, интенсивность сотрясений, Памиро-Гиндукуш.

Для цитирования: Улубиева Т.Р., Михайлова Р.С., Рислинг Л.И. Сейсмичность Таджикистана и прилегающих территорий в 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 102–117. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.09> EDN: JBEVLW

Введение. Регистрация землетрясений в 2021 г. на территории Таджикистана с прилегающими районами нескольких государств (Узбекистана, Кыргызстана, Китая, Афганистана, Пакистана и Индии) производилась единой сетью Геофизической службы Национальной академии наук Таджикистана (ГС НАНТ) [Приложение 1], состоящей из семи цифровых сейсмических станций (рис. 1 а). Создание годового каталога землетрясений с $K_p=8.6–14.4$, включающего, кроме основных параметров землетрясений, разрозненные макросейсмические данные, осуществлено в ГС НАНТ [Приложение 2].

Макросейсмическое обследование Таджикабадского землетрясения 10 июля 2021 г. с $M_{SISC}=5.9$, $I_0=7–8$ баллов выполнено другим академическим учреждением республики – Институтом геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии (ИГССС НАНТ) и представлено в отдельной статье [1]. Основной толчок и его последующие афтершоки [Приложение 3] были зарегистрированы, помимо сети ГС НАНТ, локальной сетью из 11 широкополосных цифровых станций ОАО «Рогунская ГЭС» и сейсмическими станциями «Семиганч» и «Джерино» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана (ИГССС НАНТ), расположение которых представлено на рис. 1 б из [1].

Границы исследуемой территории в пределах координат $\varphi=36–40^\circ\text{N}$, $\lambda=67–75^\circ\text{E}$ и $\varphi=40–41^\circ\text{N}$, $\lambda=69–71^\circ\text{E}$, и схема деления на четыре сейсмоактивные зоны Таджикистана (рис. 2) не изменились по сравнению с используемой в прошлогоднем обзоре [2], хотя по-прежнему обработка землетрясений проводилась и вне указанных границ.

Методика обработки цифровых записей землетрясений несколько изменилась с мая 2018 г. [4], когда произошел переход на программы ApolloServer для сбора и временного хранения сейсмических данных и Apollo Project для автоматической обработки, анализа и архивации сейсмических данных. Теперь каждый эпицентр анализируется и включается в каталог с учетом погрешности δt_0 с точностью до 0.01 с, погрешности δ локации эпицентров с точностью до 0.01 км, географических координат φ и λ с точностью до 0.0001°. Глубина очага в основном каталоге [Приложение 2] приводится с точностью до 1 км в двух вариантах – h по данным ГС НАНТ и h_{pp} по фазе pP по данным ISC. В каталоге механизмов очагов [Приложение 4] добавлен вариант глубины $h_{\text{мех}}$, используемой в решении механизма очага (по данным ISC).

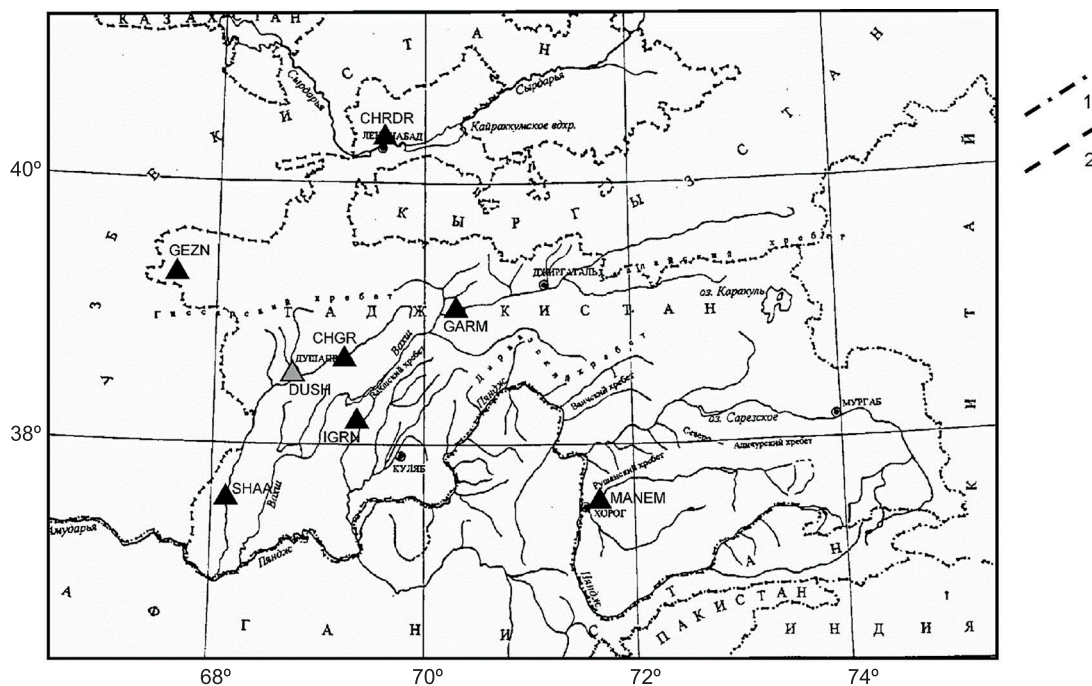


Рис. 1 а. Сеть цифровых широкополосных сейсмических станций ГС НАНТ на территории Таджикистана в 2021 г.

1, 2 – государственная граница Таджикистана, внешняя и внутри содружества СНГ соответственно. Черный треугольник – станция ГС НАНТ; серый треугольник – центр обработки в столице республики, г. Душанбе.

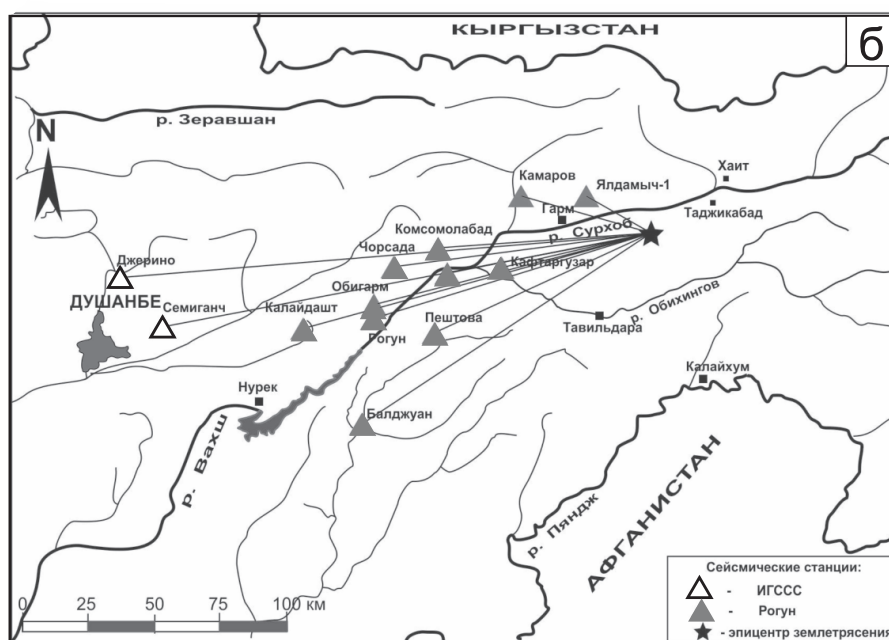


Рис. 1 б. Сейсмические станции ИГССС НАНТ и локальной сети ОАО «Рогунская ГЭС», участвовавшие в определении эпицентров Таджикибадского землетрясения 10 июля 2021 г. и его афтершоков по данным из [1]

Классификация землетрясений проводилась традиционно в энергетических классах K_p по номограмме Т. Г. Раутиан [5] с использованием эпицентральных расстояний Δ (км) для землетрясений в земной коре с $h=1-60$ км и гипоцентральных расстояний r (км) – для землетрясений промежуточных глубин с $h=70-301$ км [6]. Выделенная в субрегионе в 2021 г. сейсмическая энергия ΣE (Дж) рассчитывалась суммированием энергий отдельных землетрясений, $E=10^{K_p}$.

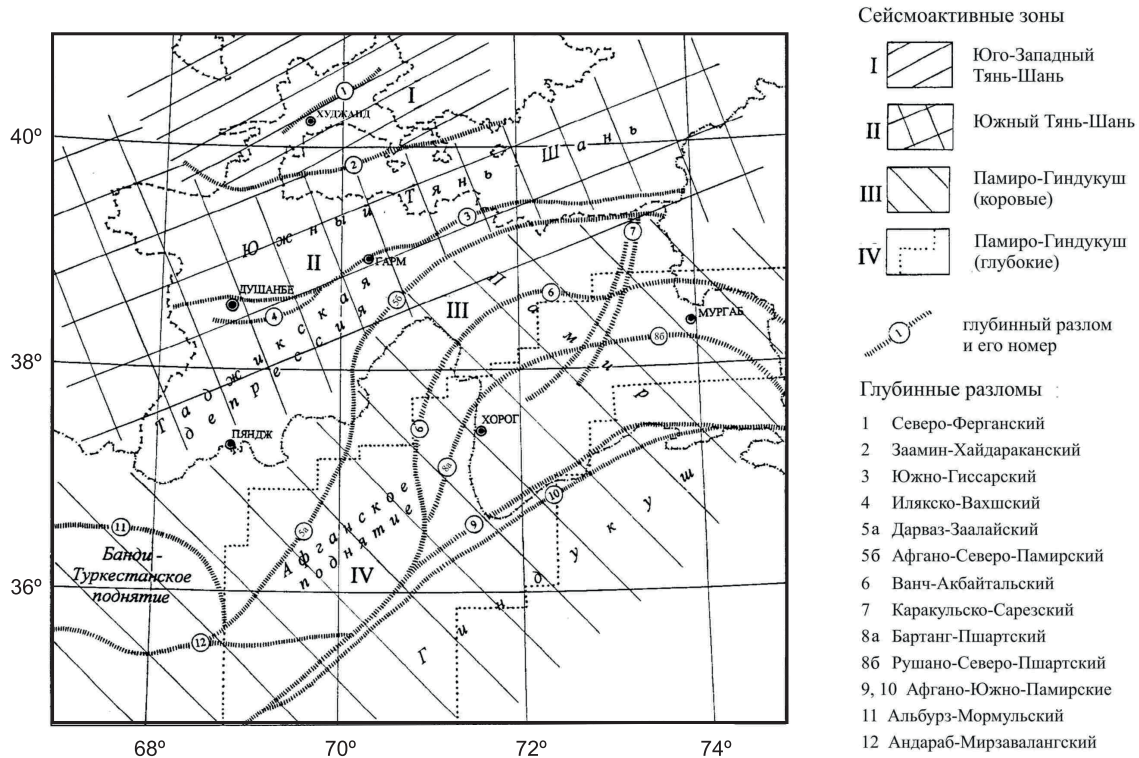


Рис. 2. Сейсмоактивные зоны I–IV и глубинные разломы Таджикистана по [3]

Номограмма Т. Г. Раутиан [5] рассчитана для определения энергетических классов землетрясений с $K_p \leq 14$ ($MS \leq 5.6$), поэтому для событий большей энергии используется либо экстраполяция (обычно в диапазоне $15 > K_p > 14$), либо пересчет по формуле Т. Г. Раутиан из [7]:

$$\lg E = K^* - 8 + 1.1M, \tag{1}$$

где под M подразумевается магнитуда по поверхностным волнам. Обычно в качестве M используются MS_{MOS} или MS_{ISC} .

С 2019 г. представленный в каталогах энергетический класс, полученный в результате экстраполяции, уточняется с помощью формулы (1) из [7].

В каталоге землетрясений Таджикистана за 2021 г. [Приложение 2] таких землетрясений два – 12 февраля в 17^h01^m с $K_p=14.4$ и промежуточной глубиной очага $h=130$ км (№ 3) и 10 июля в 02^h14^m с $K_p=14.1$ и очагом в земной коре $h=13$ км (№ 8) (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1. Параметры землетрясений № 3, 8 с $K_p \geq 14$ ($M > 5.6$) в [Приложение 2]

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	φ° , N	λ° , E	h , км	K_p	MS [8]	Ms [9]	Mw [10]
3	12.02	17:01:34.00	38.2000	73.4000	130	14.4	5.2	–	5.9
8	10.07	02:14:40.29	38.9408	70.6028	13	14.1	5.8	5.9	5.8

Класс K^* для первого землетрясения за 12 февраля с промежуточной глубиной $h=130$ км при пересчете из MS по формуле (1) будет сильно занижен без учета поправки за глубину. Международный сейсмологический центр ISC [9] не дает для него магнитуду Ms по поверхностным волнам, тогда как в Геофизической службе России [8] MS определяется независимо от глубины по стандартной калибровочной кривой [11] и публикуется без поправки за глубину – $MS_{MOS}=5.2$, что, конечно, необходимо исправить. С этой целью используем известную из [12] формулу для MS землетрясений Северной Евразии с логлинейной поправкой за глубину при $h > 90$ км:

$$MS^p = MS + 0.556 \lg h - 0.5, \tag{2}$$

согласно которой при $h=130$ км и $MS=5.2$ получим $MS^p=5.9$. Находим расчетный энергетический класс по формуле (1): $K^*=14.49$, что близко к классу $K_p=14.4$ в каталоге [Приложение 2].

По аналогии с предыдущим обзором за 2020 г. [2], проконтролируем полученные значения магнитуды и класса, используя подход в оценке расчетной магнитуды MS^p через моментную магнитуду $Mw_{GCMT}=5.9$ [10] по формуле (3) из [13]:

$$MS^p=(\ln(Mw-2.863)+0.222)/0.233, \quad (3)$$

согласно которой расчетная магнитуда MS^p оказалась равной 5.7. Средняя по двум методам магнитуда $MS^p_{cp}=5.8$, а энергетический класс $K^*=14.4$. Таким образом, энергетический класс $K_p=14.4$ в каталоге [Приложение 2] в коррекции не нуждается.

Второе землетрясение в табл. 1 – мелкое ($h=13$ км), с $K_p=14.1$ в каталоге, а также магнитудами по поверхностным волнам $MS_{MOS}=5.8$, $MS_{ISC}=5.9$ и моментной $Mw=5.8$, превышающими 5.6. Если по аналогии с предыдущим событием применить формулу (3) к $Mw=5.8$, получим $MS^p=5.6$. Осредняя ее с максимальной из магнитуд по поверхностным волнам, $MS_{ISC}=5.9$, получим $MS^p_{cp}=5.75$, а класс по формуле (1) с осреднением до десятых – $K^*=14.3$. При оценке суммарной выделенной в субрегионе сейсмической энергии будем использовать для Таджикибадского землетрясения 10 июля значение $\lg E=K^*=14.3$, а в каталоге [Приложение 2] класс оставим прежним. Значение суммарной энергии землетрясений каталога при $K^*=14.3$ составляет $\Sigma E=8.085 \cdot 10^{14}$ Дж, в отличие от $\Sigma E=7.348 \cdot 10^{14}$ Дж при $K_p=14.1$, т.е. с разницей в $0.737 \cdot 10^{14}$ Дж.

Каталог землетрясений за 2021 г. составлен в ГС НАНТ в результате сводной обработки землетрясений Таджикистана и прилегающих к нему районов Узбекистана, Кыргызстана, Китая, Афганистана, Пакистана и Индии [Приложение 2]. Как и ранее, в него из Сейсмологического бюллетеня ФИЦ ЕГС РАН [8], бюллетеней ISC [9] и данных GCMT [10] *ред.* включены значения магнитуд по поверхностным (MS, Ms), объемным ($MPSP, m_b$) волнам и моментная магнитуда (Mw) вместе с сейсмическим моментом M_0 . Кроме того, добавлено значительное число макросейсмических данных из результатов макросейсмического обследования Таджикибадского землетрясения 10 июля 2021 г., проведенного сотрудниками ИГССС НАНТ [1], каталогов Азии [14], Копетдага (Туркменистан) [15], а также из сейсмологического бюллетеня ГС РАН [8], каталога USGS [16] и сведений с сайта Европейско-Среднеазиатского сейсмологического центра [17]. В итоге сведения об ощутимости были собраны в *ред.* для 79 землетрясений. Все макросейсмические данные расписаны по конкретным населенным пунктам в специальном приложении [Приложение 5]. Общее число сотрясенных в 2021 г. населенных пунктов составило 156 [Приложение 6]. В каталоге механизмов очагов землетрясений Таджикистана [Приложение 4] региональных решений нет, все они заимствованы из других источников.

Итоговый каталог Таджикистана за 2021 г. [Приложение 2] содержит 8906 землетрясений с $K_p=8.6-14.4$, из них 7482 – Памиро-Гиндукушские землетрясения промежуточных глубин $h=70-301$ км и 1424 – мелкофокусные толчки с $h=1-60$ км, разбросанные на всей территории. Минимальная глубина гипоцентра $h_{min}=1$ км присвоена 88 землетрясениям с $K_p=8.6-11.6$, а максимальная – $h_{max}=301$ км – землетрясению 17 ноября с $K_p=8.7$, локализованному в пределах Афганской подзоны промежуточных очагов. Суммарная энергия всех землетрясений, выделившаяся в их очагах, равна $\Sigma E=8.085 \cdot 10^{14}$ Дж, из них у мелких $\Sigma E=3.032 \cdot 10^{14}$ Дж, у промежуточных – $\Sigma E=5.053 \cdot 10^{14}$ Дж. Наиболее сильные события с $K_p \geq 12.6$ за 2021 г., суммарное число которых составило $N_{\Sigma}=19$, пронумерованы в каталоге [Приложение 2] и на сводной карте эпицентров (рис. 3), из них восемь мелких и одиннадцать промежуточных.

По сравнению с данными за 2020 г., произошло увеличение числа землетрясений в зонах III и IV (899 и 7482 вместо 689 и 6621).

Максимальный энергетический класс для землетрясений в земной коре составил $K^*=14.3$, магнитуда $MS_{ISC}=5.9$. Это – упомянутое выше Таджикибадское землетрясение, зарегистрированное 10 июля 2021 г. в 02^h14^m с $h_n=13$ км, $h_{pp}=15$ км. Расчетная интенсивность сотрясений в эпицентре равна $I_0=7-8$ баллов, максимальная наблюдаемая составила 7 баллов, зафиксированная в кишлаках Бустон-2 и Кули Калон, плюс еще 46 пунктов с I_i от 6–7 до 2–3 баллов [Приложение 5].

Максимальный энергетический класс для землетрясений промежуточных глубин – $K^*=K_p=14.4$. Землетрясение такой величины зарегистрировано 12 февраля в 17^h01^m в Мургабской подзоне на глубине с $h=130$ км. Оно ощущалось в Таджикистане с интенсивностью 4 балла в Мургабе, Зарринруде; 3 балла в Хороге; 2–3 балла в Худжанде, Бустоне-1, Гафурове; 2 балла в Пенджикенте. Из населенных пунктов Кыргызстана, Узбекистана, Индии, Пакистана поступили сообщения об ощутимости этого землетрясения с интенсивностью от 2 до 4 баллов.

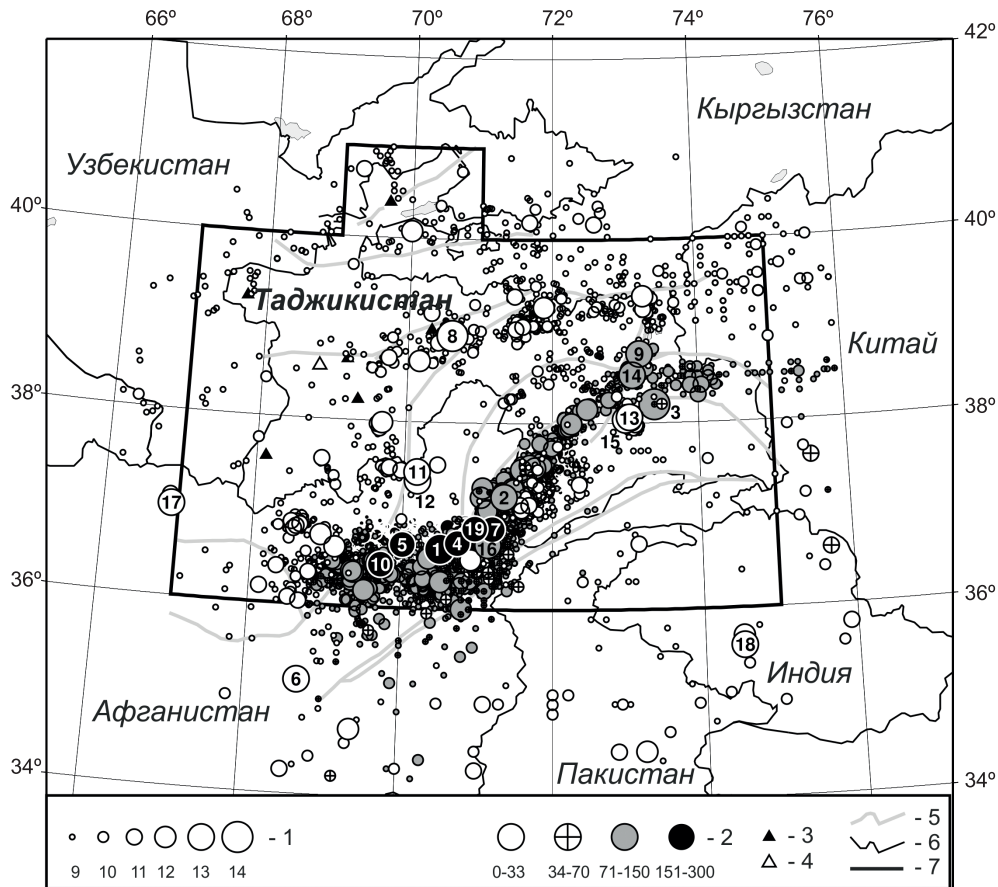


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Таджикистана и прилегающих территорий за 2021 г.

1 – энергетический класс K_p ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – цифровая сейсмическая станция; 4 – центр обработки в Душанбе; 5 – глубинный разлом I-го порядка; 6 – государственная граница; 7 – граница зоны ответственности Таджикистана; пронумерованы 19 землетрясений с $K_p \geq 12.6$, нумерация соответствует таковой в каталоге [Приложение 2].

Распределение всех землетрясений по энергетическим классам в каждой из четырех сейсмоактивных зон на рис. 2 приведено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение числа землетрясений за 2021 г. (в скобках за 2020 г.) по энергетическим классам K_p

№ зоны	Название зоны	K_p						N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$
		9	10	11	12	13	14		
I	Юго-Западный Тянь-Шань	57 (58)	4 (3)	2 (3)	–	– (4)	–	63 (68)	$3.154 \cdot 10^{11}$ $(4.283 \cdot 10^{13})$
II	Южный Тянь-Шань	391 (388)	57 (43)	14 (21)	3 (5)	– (4)	(1) –	462 (461)	$2.040 \cdot 10^{14}$ $(6.458 \cdot 10^{13})$
III	Памиро-Гиндукуш (коровые)	755 (573)	89 (77)	33 (26)	11 (10)	7 (3)	–	899 (689)	$9.889 \cdot 10^{13}$ $(7.170 \cdot 10^{13})$
IV	Памиро-Гиндукуш (глубокие)	6732 (5814)	592 (653)	113 (98)	34 (42)	9 (13)	2 (1)	7482 (6621)	$5.053 \cdot 10^{14}$ $(3.756 \cdot 10^{14})$
Всего	I–IV	7935 (6833)	742 (778)	162 (148)	48 (57)	16 (24)	3 (1)	8906 (7839)	$8.085 \cdot 10^{14}$ $(5.547 \cdot 10^{14})$

Рассмотрим детально сейсмичность в каждой из зон I–IV.

На территории зоны Юго-Западного Тянь-Шаня (I), в южной ее части, проявилось влияние Заамин-Хайдараканского разлома (№ 2 на рис. 2). К нему приурочена цепочка из трех значимых для этой зоны землетрясений (рис. 3), мигрирующих в западном направлении и зарегистрированных последовательно: 10 июля в 16^h05^m с $K_p=11.0$, $h=6$ км, $\varphi=40.17^\circ$, $\lambda=72.59^\circ$; 29 сентября в 12^h41^m с $K_p=10.7$, $h=12$ км, $\varphi=40.18^\circ$, $\lambda=71.67^\circ$; 18 декабря в 05^h42^m с $K_p=11.6$, $h=13$ км, $\varphi=40.08^\circ$,

$\lambda=69.99^\circ$. Два последних из них были ощутимы: толчок за 29 сентября – в Узбекистане ($I_i=3-4$ балла в Фергане, Куваесе; 3 балла – в Маргилане); за 18 декабря – в Таджикистане (3 балла в Худжанде), Узбекистане (2 балла в Ташкенте) и Кыргызстане (2 балла в Кызыл-Кия).

На севере зоны, на границе с Узбекистаном (рис. 3), 5 марта в 21^h52^m возник толчок с $K_p=11.2$, $h=13$ км, $\varphi=40.74^\circ$, $\lambda=69.27^\circ$ [Приложение 2], который, по данным CSEM [17], вызвал сотрясения в Узбекистане (4 балла в Олмалике, Пахте, Ангиоле, Бектемире, 3 балла – в Ташкенте, Салоре) и в Таджикистане (2 балла в Худжанде).

Для трех толчков вдоль Заамин-Хайдараканского разлома в [18] имеются решения механизмов их очагов, приведенные в табл. 3. Общим для них свойством является существенное превалирование близгоризонтальных напряжений сжатия ($PL_p=4^\circ, 2^\circ$ и 1°) над напряжениями растяжения ($PL_T=56^\circ, 73^\circ$ и 33°).

Таблица 3. Параметры механизма очагов землетрясений зоны I из [18]

Дата, дд.мм	t_0 , ч.мин:с	h , км	M_s	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
10.07	16:05:10.20	6	3.0	11.0	56	51	35	239	4	146	205	51	44	84	57	132	ИС НАН КР
29.09	12:41:26.76	12	3.2	10.7	73	253	16	64	2	156	263	45	114	50	49	68	ИС НАН КР
18.12	05:43:45.13	13	3.5	11.6	33	241	56	60	1	151	21	68	25	281	67	156	ИС НАН КР

Согласно значениям $SLIP$, в очаге первого толчка за 10 июля по плоскости $NP1$ юг–юго-западного простирания ($STK_1=205^\circ$) или по плоскости $NP2$ близширотного простирания ($STK_2=84^\circ$) реализовался взбросо-сдвиг с небольшим преобладанием сдвиговой компоненты; 29 сентября произошел чистый взброс с компонентами сдвига по плоскости близширотного ($STK_1=263^\circ$) или восток–северо-восточного ($STK_1=50^\circ$) простирания, тогда как в очаге третьего толчка, 18 декабря, реализовался сдвиг по плоскости север–северо-восточного ($NP1$ с $STK_1=21^\circ$) или юг–юго-западного ($NP2$ с $STK_2=281^\circ$) простирания. Падения нодальных плоскостей всех трех рассмотренных землетрясений довольно крутые ($DP=45-68^\circ$). Как видим, в зоне влияния Заамин-Хайдараканского разлома превалировали сдвиговые и взбросовые подвижки.

Южный Тянь-Шань (II). Как следует из рассмотрения карты эпицентров на рис. 3, основная сейсмическая активность зоны II сосредоточена между Южно-Гиссарским (Гиссаро-Кокшаальским) и Дарваз-Заалайским разломами (№ 3 и № 5 а на рис. 2). Повышенная сейсмичность этого района обусловлена, главным образом, воздействием Индо-Евразийской конвергенции, вследствие которой происходит сжатие земной коры между Памиром и Тянь-Шанем, что и приводит к частым землетрясениям. Это проявилось возникновением в этом районе ряда ощутимых землетрясений, с главным из них и максимальным на всей территории Таджикистана – Таджикибадским землетрясением 2021 г. (№ 8 на рис. 3), зарегистрированным 10 июля в 02^h14^m с $K_p=14.1$ ($K^*=14.3$) в зоне прохождения центральной части Илякско-Вахшского разлома (№ 4 на рис. 2). Глубина гипоцентра – 13 км.

В этой же очаговой области до 18 августа зарегистрировано шесть повторных ощутимых толчков с $K_p=9-11$: три с $K_p=11$, два с $K_p=10$ и один с $K_p=9$ [Приложение 5]. Их очаги находились на глубине $h=6-14$ км. Весь список афтершоков Таджикибадского землетрясения за период с 10 июля по 31 декабря – уникальный по объему и содержит 2578 толчков с $K_p=5.5-11.3$ [Приложение 3]. Он составлен группой обработки землетрясений ИГССС НАНТ Душанбино-Вахшского района совместно с ГС НАНТ. Все 86 наиболее сильных его афтершоков с $K_p \geq 8.6$, входящие в [Приложение 2], отмечены в нем меткой «афт» и ID главного толчка. Карта их эпицентров и описание тектоники очаговой области даны в [1].

Рассмотрим параметры механизма очага Таджикибадского землетрясения, полученные в трех агентствах (табл. 4, рис. 4).

Общей характеристикой разных решений в табл. 4 являются сходные оценки напряженного состояния – близгоризонтальные напряжения сжатия ($PL_p=4^\circ, 6^\circ$ и 12°) и близвертикальные напряжения растяжения – $PL_T=69^\circ, 70^\circ$ и 62° . Согласно всем решениям, в очаге реализовался взброс или надвиг с компонентами сдвига по плоскости северо-восточного или субширотного простирания, совпадающего с ориентацией Яфучского разлома, к которому приурочен очаг [1]. Учитывая, что плоскость указанного разлома падает на юго-восток [1], в качестве действующей следует выбрать плоскость $NP1$ с аналогичным падением.

Таблица 4. Параметры механизма очага Таджикибадского землетрясения 10 июля 2021 г. с $K_p=14.1$ ($K^*=14.3$) по данным трех агентств согласно [Приложение 4]

Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	h , км	M_{SISC}	K^*	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
10.07	02:14:40.29	13	5.9	14.3	69	32	20	224	4	133	61	52	116	202	45	61	GFZ
					70	94	12	219	6	312	59	31	113	213	62	77	GCMT
					62	40	26	228	12	152	83	61	120	213	40	48	NEIC

Примечание. Знаком (*) отмечено рассчитанное выше из M_{SISC} значение энергетического класса этого землетрясения.

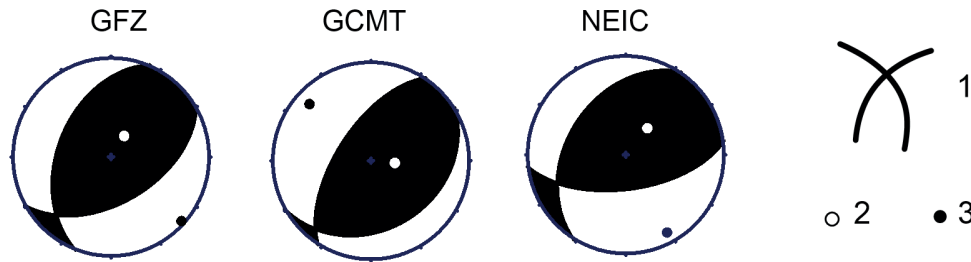


Рис. 4. Диаграммы механизма очага Таджикибадского землетрясения 10 июля 2021 г. с $K_p=14.1$ ($K^*=14.3$) по данным табл. 4, зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

В восточном окончании Гиссаро-Кокшаальского разлома (№ 3 на рис. 2), в 29 км к северо-востоку от Джиргатая, 8 февраля в 03^h33^m отмечен один ощутимый толчок с $K_p=10.6$ и глубиной очага 13 км. В центральной части Гиссаро-Кокшаальского разлома 6 марта в 23^h53^m зарегистрирован единичный импульс с $K_p=11.3$ на глубине 12 км в долине р. Сорбог, в нескольких километрах от ее впадения в р. Сурхоб. Эпицентр расположен в 18 км севернее Гарма. В зоне восточной ветви Илякско-Вахшского глубинного разлома, в районе Рогунской ГЭС, зафиксированы два толчка: 24 ноября в 02^h34^m с $K_p=10.6$ и 4 декабря в 21^h38^m с $K_p=10.2$. Первый возник в непосредственной близости от Рогунской ГЭС (2 км) и Обигарма (4 км) на глубине 15 км, второй – в 26 км к юго-западу от Рогуна. Они ощущались в Рогуне с интенсивностью до 3 баллов [Приложение 5]. Вблизи столицы республики г. Душанбе реализовались лишь слабые землетрясения не выше 9-го класса.

Южнее близширотной полосы эпицентров повышенной плотности вдоль Гиссаро-Кокшаальского и Илякско-Вахшского разломов I-го порядка (№ 3 и № 4 на рис. 2) расположено поле рассеянной сейсмичности Таджикской депрессии на уровне не выше $K_p=9$ (рис. 3), на фоне которого вблизи г. Куляб (12 км) выделяется участок роевой сейсмичности с главным толчком с $K_p=12.0$ за 10 февраля в 22^h31^m, вызвавшим в Кулябе колебания с $I_i=2-3$ балла, в Душанбе – 2 балла [Приложение 5]. К юго-западу от роя заметно еще одно значимое землетрясение, зарегистрированное 6 июля в 09^h40^m с $K_p=10.6$ на глубине $h=10$ км (рис. 3). Оно предвлялось толчком 3 марта в 15^h48^m с $K_p=10.4$, $h=11$ км, который можно расценивать как форшок, и сопровождалось афтершоками, самый крупный из которых зафиксирован 17 августа в 11^h42^m с $K_p=9.6$ [Приложение 2].

В Памиро-Гиндукушской зоне коровых землетрясений (III) максимальный энергетический класс $K_p=13$. Таких землетрясений здесь произошло семь (рис. 3): три из них (№ 6, 17, 18) – вне государственных границ Таджикистана, два (№ 11, 12) – на южной границе с Афганистаном и еще два (№ 13, 15) – на севере Памира.

Вне Таджикистана рассмотрим землетрясения № 6, № 17 и № 18. Согласно рис. 2, 3, землетрясение № 6 за 24 июня в 23^h04^m расположено между разломами Андараб-Мирзавалангским (№ 12) и Афгано-Южно-Памирским (№ 9); событие № 17 за 5 октября в 08^h00^m – севернее Альбурз-Мормульского разлома (№ 11); событие № 18 за 27 декабря в 13^h31^m – на севере Индии. Землетрясение № 6 ощущалось в шести населенных пунктах Афганистана с интенсивностью I_i от V до III баллов по шкале EMS-98 [19] на расстоянии Δ от 86 до 302 км и с $I_i=III$ балла в г. Равалпинди (438 км) в Пакистане. Землетрясение № 17 вызвало наиболее интенсивные колебания с I_i от VI до II баллов в пяти пунктах Афганистана, от III–IV до II баллов в шести пунктах Узбекистана и в четырех Туркменистана, а также 2 балла по шкале MSK-64 [20] в столице Таджикистана. Зем-

летрясение № 18 ощущалось в двух пунктах Пакистана с $I_i=IV$ балла ($\Delta=40, 79$ км) и пяти пунктах Индии от III до II баллов с Δ от 156 до 323 км [Приложение 5].

В Таджикистане парные по локации землетрясения (№ 11, 12) зарегистрированы на юге Кулябской впадины 15 августа в 10^h41^m с $K_p=12.8$ и 2 сентября в 04^h50^m с $K_p=12.9$ на глубинах 18 и 17 км соответственно. Очаги этих событий связаны с зоной южного окончания Афгано-Северо-Памирского разлома (№ 5 б на рис. 2). Первое из них ощущалось в Хороге (122 км) с $I_i=3-4$ балла и $I_i=2$ балла в Душанбе (173 км), второе – $I_i=2$ балла в Душанбе (181 км). Рассмотрим параметры механизма очагов этой пары землетрясений (табл. 5, рис. 5) по данным GCMT [11] в [Приложение 4].

Таблица 5. Параметры механизма очагов землетрясений 15 августа и 2 сентября на юге Кулябской впадины

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
11	15.08	10:41:10.58	18	12.8	48	201	35	60	20	315	2	40	26	252	74	127	GCMT
12	02.09	04:50:06.6	17	12.9	29	50	55	267	18	150	98	83	145	193	56	9	GCMT

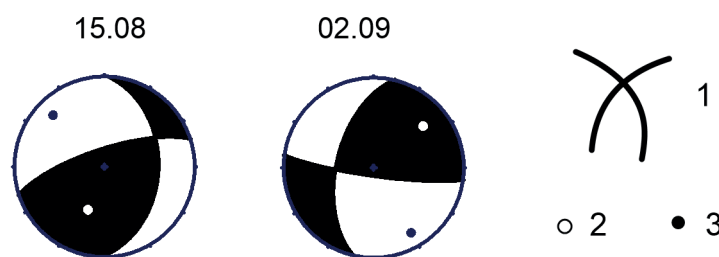


Рис. 5. Диаграммы механизмов очагов землетрясений 15 августа с $K_p=12.8$ и 2 сентября с $K_p=12.9$ по данным табл. 5, зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

В очаге землетрясения № 11 за 15 августа преобладали напряжения сжатия ($PL_p=20^\circ < PL_t=48^\circ$). В результате реализовался сдвиг по более пологой ($DP_1=40^\circ$) плоскости NP1 меридионального ($STK_1=2^\circ$) простирания или сдвига-взброс по крутой ($DP_2=74^\circ$) плоскости NP2 запад-юго-западного ($STK_2=252^\circ$) простирания, при этом взбросовая составляющая подвижки незначительно преобладает над сдвиговой. В очаге землетрясения № 12 за 2 сентября напряжения сжатия и растяжения разнятся в меньшей степени ($PL_p=18^\circ$, $PL_t=29^\circ$) и близгоризонтальны, что привело к чистому сдвигу ($SLIP_2=9^\circ$) по наклонной ($DP_1=56^\circ$) плоскости NP2 близмеридионального ($STK_2=193^\circ$) простирания или взбросо-сдвигу ($SLIP_2=145^\circ$) по почти вертикальной ($DP_1=83^\circ$) плоскости NP1 близширотного простирания ($STK_1=98^\circ$).

Не менее активной в сейсмическом отношении была зона Центрального Памира. Несколько в стороне от пересечения южного окончания Каракульско-Сарезского (№ 7) и центральной части Бартанг-Пшартского (№ 8 а) разломов на рис. 2 зарегистрирован мощный рой землетрясений, включающий два землетрясения с $K_p \div 13$, два – с $K_p \div 12$, шесть – с $K_p \div 11$ (табл. 6), и свыше 140 с $K_p=8.6-10.5$ с меткой «рой». Наиболее сильные землетрясения возникли 8 (№ 13) и 27 сентября (№ 15) с $K_p=12.8$ и 12.6 соответственно. Ранее, 7 сентября, и позже, 3 октября, здесь отмечены относительно сильные толчки с $K_p \div 12$. Их эпицентры расположены в 25–27 км к юго-востоку от оз. Сарез, показанного на рис. 1 а.

По трем событиям, приведенным в табл. 7, в [Приложение 5] имеются сведения об их ощущимости: форшок за 7 сентября с $K_p=11.7$ ощущался на оз. Сарез (26 км) с $I_i=3$ балла; главный толчок 8 сентября (№ 13) с $K_p=12.8$ вызвал в Таджикистане сотрясения с $I_i=5$ баллов в Мургабе (81 км), 3 балла на оз. Сарез (27 км), 2 балла в Душанбе (327 км); толчок № 15–3 балла на оз. Сарез (25 км), 2 балла в Хороге (140 км) в Таджикистане и 2 балла в г. Каши (Кашгар) в Китае. Для этих же событий в [Приложение 4] представлены параметры механизмов их очагов агентства GCMT [11], приведенные в табл. 7 и на рис. 6.

Таблица 6. Параметры землетрясений роя на Памире, вблизи оз. Сарез из [Приложение 2]

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	φ° , N	λ° , E	h , км	K_p	№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	φ° , N	λ° , E	h , км	K_p
	02.08	22:47:46	37.984	73.128	10	11.3	15	27.09	05 40 38	38.035	72.998	27 _{pp}	12.6
	09.08	00:07:08	38.045	72.966	10	10.7		27.09	05 53 23	38.060	73.023	10	11.4
	16.08	12:17:54	37.990	72.997	10	11.4		03.10	06 19 54	38.090	73.012	10	11.8
	07.09	13:34:09	38.041	73.018	10	11.7		21.10	17 46 03	38.081	73.012	10	10.6
13	08.09	05:20:01	38.065	73.054	21 _{pp}	12.8		26.10	06 08 36	38.006	73.096	10	10.6

Таблица 7. Параметры механизма трех очагов землетрясений роя на Памире, вблизи оз. Сарез

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
	07.09	13:34:09.0	10	11.7	3	104	47	198	43	11	50	64	-35	157	59	-149	GCMT
13	08.09	05:20:01.5	10	12.8	14	264	72	124	11	356	40	72	2	310	88	162	GCMT
15	27.09	05:40:37.9	10	12.6	4	76	25	345	65	174	190	47	-55	325	53	-121	GCMT

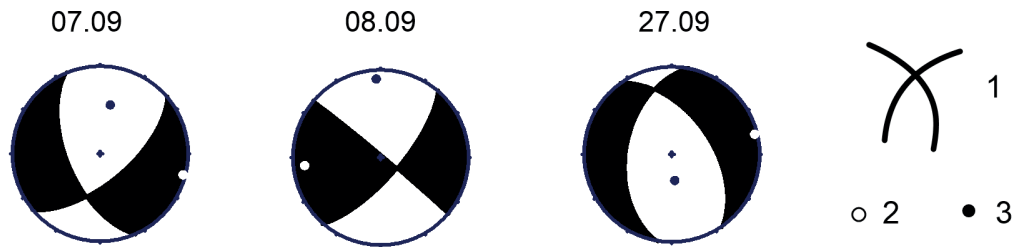


Рис. 6. Диаграммы механизмов очагов землетрясений из табл. 7, зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

Как видим, в очаге форшока за 7 сентября почти горизонтальные ($PL_T=3^\circ$) напряжения растяжения преобладают над напряжениями сжатия ($PL_P=43^\circ$), что при отрицательных значениях $SLIP$ соответствует подвижке типа сбросо-сдвиг по обеим достаточно крутым ($DP_1=64^\circ$, $DP_2=59^\circ$) нодальным плоскостям северо-восточного ($STK_1=50^\circ$) и юг-юго-восточного ($STK_2=157^\circ$) простирания. Однако в очаге возникшего через 15 часов, 8 сентября, максимального толчка роя (№ 13) с $K_p=12.8$ система напряжений изменилась – напряжения растяжения и сжатия оказались примерно равными ($PL_P=11^\circ \approx PL_T=14^\circ$), к тому же и значения параметра $SLIP$ положительны и равны ($SLIP_1=2^\circ$ и $SLIP_2=162^\circ$). В результате в его очаге реализовался чистый сдвиг по обеим близвертикальным ($DP_1=72^\circ$, $DP_2=88^\circ$) плоскостям северо-восточного ($STK_1=40^\circ$) или северо-западного ($STK_2=310^\circ$) простирания. Затем, в очаге второго события 13-го класса, 27 сентября с $K_p=12.6$, напряжения растяжения, согласно табл. 7, вновь близгоризонтальны ($PL_T=4^\circ$) и преобладают над напряжениями сжатия ($PL_P=65^\circ$). При этом в очаге возникла подвижка типа сдвиго-сброса по обеим нодальным наклонным ($DP_1=47^\circ$, $DP_2=53^\circ$) плоскостям близмеридионального ($STK_1=190^\circ$) и северо-западного ($STK_2=325^\circ$) простирания.

На юго-западном Памире зафиксированы три ощутимых толчка: 1 июня в 01^h26^m с $K_p=11.0$, $h=6$ км, к юго-западу от с. Рошткала (27 км), где отмечены сотрясения с $I_i=4$ балла; 18 августа в 11^h34^m с $K_p=11.0$, $h=3$ км в 43 км от Хорога, в котором землетрясение ощущалось с $I_i=3-4$ балла; 16 декабря в 12^h34^m с $K_p=9.4$, $h=3$ км в 38 км от Хорога, где отмечены сотрясения с $I_i=2$ балла.

В Ванчском районе в декабре отмечены два ощутимых толчка с $K_p \div 10$: 5 декабря с $K_p=10.4$ в 12 км к юго-западу от райцентра Ванч, где отмечены сотрясения с $I_i=3$ балла; 10 декабря с $K_p=9.7$ в 20 км от Ванча, где $I_i=2-3$ балла. Эти землетрясения приурочены к западному окончанию Ванч-Акбайтальского разлома (№ 6 на рис. 2) на глубине $h=11$ и 3 км.

Ощутимый толчок с $I_i=3$ балла отмечен 22 ноября в 39 км к юго-востоку от пгт Джиргаталь с $K_p=11.4$. Он привязан к зоне Дарваз-Заалайского разлома (№ 5 а на рис. 2) в ее восточной части. Глубина очага 11 км.

В Памиро-Гиндукушской зоне (IV) глубокофокусных, точнее, промежуточных землетрясений, на глубинах $h=70-301$ км локализовано 7482 события, или 84% всего объема каталога с $K_p \geq 8.6$ (табл. 8). Их пространственное распределение представлено на рис. 3. Основная их часть возникла на территории Афганистана. Традиционно вся область промежуточных землетрясений, как и ранее [2], подразделяется по плотности гипоцентров и ориентировке области эпицентров на три подзоны: близширотную Афганскую ($\varphi \leq 36.9^\circ N$), северо-восточную Хорогскую ($\varphi = 37.0-37.9^\circ N$) и близширотную Мургабскую ($\varphi = 38.0-38.8^\circ N$). Такое деление целесообразно, так как они характеризуются разными видами распределения землетрясений по глубине.

Таблица 8. Распределение промежуточных землетрясений по энергетическим классам в пределах Афганской, Хорогской и Мургабской подзон в 2021 г.

Название подзоны	Энергетический класс						$K_p \geq 10$	Всего
	9	10	11	12	13	14		
Афганская с $h=70-301$ км	4441	428	70	21	6	1	526	4794 (4489)
Хорогская с $h=70-270$ км	2160	146	37	13	1	–	197	2416 (1955)
Мургабская с $h=70-200$ км	131	18	6	–	2	1	27	272 (177)
Всего	6732	592	113	34	9	2	750	7482 (6621)

Примечание. В скобках даны суммы числа событий за 2020 г.

Большинство (около 5 тыс.) промежуточных землетрясений возникло в Афганской подзоне Гиндукуша в диапазоне глубин 70–301 км с $K_p \geq 8.6$, в том числе 7 из 19-ти с $K_p \geq 12.6$ под номерами № 1, 4, 5, 7, 10, 16, 19 (рис. 3, [Приложение 2]). Три из них (№ 1, 7, 10) ощущались в столице республики, г. Душанбе, с интенсивностью от 2 до 4 баллов [Приложение 4]. Максимальный энергетический класс среди событий этой зоны в 2021 г. – $K_p=14.0$ у землетрясения № 1 (рис. 3) 16 января в 20^h02^m, что на порядок выше, чем в прошлом 2020 г. [2]. Землетрясение 16 января реализовалось на глубине $h_n=198$ км ($h_{rp}=202$ км) с $\varphi=36.637^\circ N$, $\lambda=70.505^\circ E$, в самой заглубленной «чаше» Памиро-Гиндукуша и с самой высокой объемной плотностью очагов. Для него собраны из разных источников сведения о вызванных им сотрясениях в 30 населенных пунктах шести окружающих его государств: к югу – в Афганистане, Пакистане; к северу – в Таджикистане, Узбекистане, Казахстане, Кыргызстане. Максимальная интенсивность $I_i=V$ по шкале ММ [16] зафиксирована в ближайшем афганском г. Файзабаде, на эпицентральной расстоянии $\Delta=54$ км, гипоцентральной – $r=205$ км [Приложение 5], самый удаленный пункт – столица Кыргызстана, г. Бишкек, с $\Delta=773$ км и $I_i=II$ по шкале EMS-98 [19]. В столице Таджикистана, г. Душанбе, с $\Delta=262$ км – $I_i=4$ балла по шкале MSK-64 [20]. Для этого события получены пять решений механизма очага, приведенные в табл. 9 из [Приложение 4] и на рис. 7.

Таблица 9. Параметры механизма очага максимального землетрясения Афганской подзоны 16 января с $h_n=198$ км, $h_{rp}=202$ км, $K_p=14.0$

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	$h_{мех}$, км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
1	16.01.	20:02:47.2	209	5.6							130	67	97	293	24	74	IPGP
1	16.01.	20:02:47.2	214	5.5	64	71	13	316	23	221	140	69	103	288	24	60	GFZ
1	16.01.	20:02:47.2	211	5.5	68	62	7	314	21	221	137	66	98	297	25	72	NEIC
1	16.01.	20:02:47.2	210	5.6	64	54	8	307	25	214	130	70	94	286	21	67	GCMT

Как видим, все решения сходны, с небольшими вариациями. Разброс в положении как осей напряжений сжатия ($PL_p \rightarrow 20-25^\circ$), так и растяжения ($PL_t \rightarrow 64-69^\circ$) невелик и однозначен – преваширование напряжений сжатия. Типы движений по обеим нодальным плоскостям подобны с малым разбросом их простираний и более существенным – падений: взбросы по крутым ($DP=65-70^\circ$) плоскостям NP1 юго-восточного ($125-140^\circ$) простирания и надвиги по пологим ($DP=21-25^\circ$) плоскостям NP2 запад-северо-западного ($286-297^\circ$) простирания.

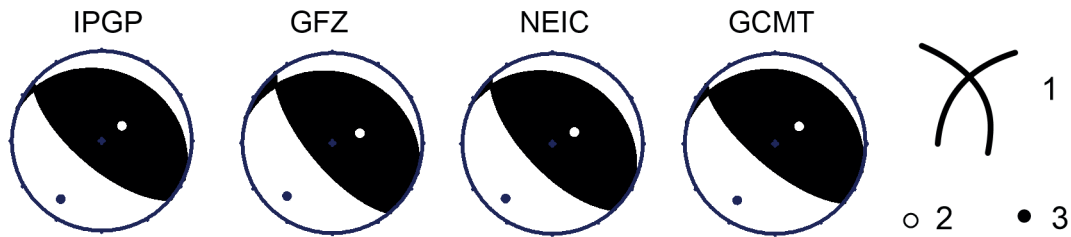


Рис. 7. Диаграммы механизма очага максимального землетрясения Афганской подзоны 16 января с $K_p=14.0$ по данным разных агентств (табл. 9), зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

Хорогская подзона, включающая землетрясения с $h=70-270$ км, $\Delta\varphi=36.9^\circ-37.9^\circ$ (рис. 3), характеризуется в 2021 г. небольшой плотностью эпицентров во всем интервале и скученностью более сильных событий с $K_p>11.5$ в южной ее части, продолжении Афганской подзоны. Из них в ощутимые с I_i не выше III баллов шкалы ММ попадает землетрясение 24 января с $K_p=13.4$, $Mw_{GCMT}=5.1$, $h_{и}=109$ км, вызвавшее колебания в шести пунктах Таджикистана с интенсивностью $I_i=2.5-4$ балла (250–412 км), а также в Афганистане ($I_i=III-V$ балла ММ, $\Delta=54-208$ км), Пакистане ($I_i=II-IV$ балла ММ, $\Delta=145-307$ км), Узбекистане ($I_i=II-III$ балла ММ, $\Delta=420-519$ км), Казахстане ($I_i=II$ балла ММ, $\Delta=550-698$ км), Кыргызстане ($I_i=II$ балла ММ, $\Delta=537-773$ км). Вторым ощутимым с $I_i=2$ балла толчком было слабое ($K_p=10.6$) землетрясение возле г. Хорога ($\Delta=44$ км) 3 ноября в 04^h29^m с $h=95$ км (Приложение 5).

Решение механизма очага для описанного максимального толчка с $K_p=13.4$ в Хорогской подзоне получено в GCMT [11] ([Приложение 4], табл. 10, рис. 8).

Таблица 10. Параметры механизма очага максимального землетрясения Хорогской подзоны 24 января с $K_p=13.4$

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	$h_{мех}$, км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
2	24.01	19:01:21.9	131	5.1	40	90	13	349	47	244	243	14	-15	348	87	-103	GCMT

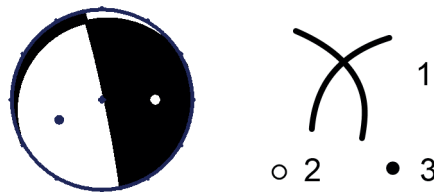


Рис. 8. Диаграмма механизма очага максимального землетрясения Хорогской подзоны 24 января с $K_p=13.4$ (№ 2) согласно табл. 10

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

В его очаге юго-западные ($AZM_p=244^\circ$) напряжения сжатия и широтные ($AZM_T=90^\circ$) напряжения растяжения близки по величине ($PL_T=40^\circ$, $PL_p=47^\circ$). Подвижка по нодальной плоскости NP1 запад–юго-западной ($STK_1=243^\circ$) ориентации с близгоризонтальным падением ($DP_1=14^\circ$) имеет тип сбросо-сдвига ($SLIP_1=-15^\circ$), а по нодальной плоскости NP2 запад–северо-западной ($STK_2=348^\circ$) ориентации с почти вертикальным падением ($DP_2=87^\circ$) – сброса ($SLIP_1=-103^\circ$).

В **Мургабской подзоне** максимальный энергетический класс $K_p=14.4$ характеризует землетрясение № 3 на рис. 3 за 12 февраля в 17^h01^m с $h=130$ км, описанное выше при уточнении энергетического класса. Землетрясение является сильнейшим не только среди промежуточных землетрясений, но среди всех событий каталога Таджикистана за 2021 г. [Приложение 2]. Оно локализовано в 50 км северо-западнее Мургаба, в 52 км восточнее оз. Сарез и приурочено к Рушано-Северо-Пшартскому

разлому (№ 8 б на рис. 2) восточнее сдвоенных Каракульско-Сарезских разломов (№ 7). Ощущалось в шести государствах – Таджикистане, Узбекистане, Кыргызстане, Казахстане, Афганистане, Пакистане с интенсивностью от 2 до 4 баллов [Приложение 5]. В табл. 11 и на рис. 9 показаны пять вариантов параметров механизма очага этого землетрясения.

Таблица 11. Параметры механизма очага землетрясения 12 февраля с $K_p=14.4$ из Мургабской подзоны по данным разных агентств

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	$h_{\text{мех}}$, км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
3	12.02	17:01:34	93		77	161	4	5	13	326	51	32	83	239	58	94	MOS
3	12.02	17:01:34	63		–	–	–	–	–	–	44	32	114	196	62	76	ISC-PPSM
3	12.02	17:01:34	98	5.8	86	83	4	273	1	183	96	46	95	269	45	85	GFZ
3	12.02	17:01:34	112	5.9	88	153	0	52	2	322	52	43	89	233	47	91	NEIC
3	12.02	17:01:34	101	5.9	87	51	3	232	0	142	55	45	94	229	45	86	GCMТ

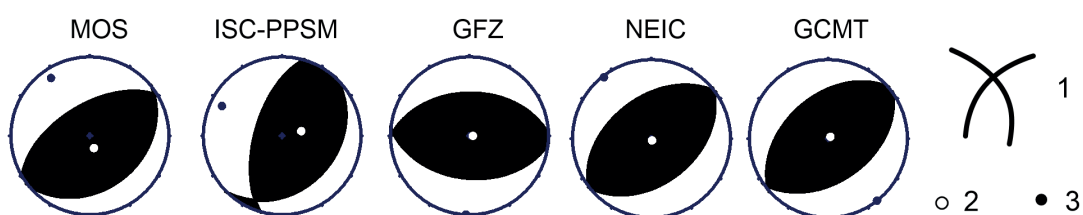


Рис. 9. Диаграммы механизма очага землетрясения 12 февраля с $K_p=14.4$ из Мургабской подзоны по данным разных агентств (табл. 11), зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

Во всех решениях ось сжатия горизонтальна ($PL_p=0-13^\circ$), а растяжения – близвертикальна ($PL_p=77-88^\circ$). Все 12 значений $SLIP$ в табл. 11 находятся в пределах $76-114^\circ$, что соответствует подвижкам типа «взброс» ($NP2$) или «надвиг» ($NP1$). Решения MOS, NEIC и GCMТ подобны – обе нодальные плоскости имеют северо-восточное / юго-западное простирание. Близширотная ориентация нодальных плоскостей $NP1$ и $NP2$ в решении GFZ и близмеридиональная плоскости $NP2$ в решении ISC делают эти решения отличными от трех предыдущих.

Землетрясения № 9 и № 14, произошедшие 29 июля в $23^{\text{h}}09^{\text{m}}$ с $K_p=13.0$, $h_{\text{рп}}=96$ км и 17 сентября в $22^{\text{h}}06^{\text{m}}$ с $K_p=12.7$, $h_{\text{рп}}=107$ км [Приложение 2], зафиксированы в 80 и 44 км северо-восточнее оз. Сарез (рис. 2). В проекции на земную поверхность они находятся в зоне пересечения северной части Ванч-Акбайтальского и средней части сдвоенных Каракульско-Сарезских глубинных разломов (№ 6, 7 на рис. 2), хотя их влияние на глубинные процессы в слое $\Delta h=96-107$ км, скорее всего, невелико или же вовсе отсутствует. В то же время соотношение напряжений сжатия и растяжения в опубликованном агентством GCMТ решении механизма очага землетрясения № 14 17 сентября (табл. 12) необычно для Памира – напряжения растяжения юго-западного направления ($AZM_T=234^\circ$, $PL_T=10^\circ$) несколько преобладают над напряжениями сжатия север-северо-западного ($AZM_p=330^\circ$, $PL_p=28^\circ$) направления. Отрицательные значения $SLIP$ (-14° и -152°) для обеих крутых ($DP_1=63^\circ$, $DP_2=78^\circ$) нодальных плоскостей близмеридиональной ($STK_1=9^\circ$) и близширотной ($STK_2=105^\circ$) ориентации свидетельствуют о редком на Памире типе подвижек – сбросо-сдвиге (рис. 10).

Таблица 12. Параметры механизма очага землетрясения 17 сентября с $K_p=12.7$ из Мургабской подзоны

№	Дата, дд.мм	t_0 , ч:мин:с	$h_{\text{мех}}$, км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агентство
					T		N		P		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
14	17.09	22:06:43	147	4.8	10	234	60	127	28	330	9	63	-14	105	78	-152	GCMТ

В целом, уровень сейсмичности зоны IV как по числу землетрясений, так и по уровню высвобожденной энергии в 2021 г. оказался несколько выше такового в 2020 г. ($N_2=7482$ вместо $N_2=6621$ и $\Sigma E=5.053 \cdot 10^{14}$ Дж вместо $\Sigma E=3.756 \cdot 10^{14}$ Дж).



Рис. 10. Диаграмма механизма очага землетрясения 17 сентября с $K_p=12.7$ (№ 14) из Мургабской подзоны согласно табл. 12, зачернены области сжатия

1 – нодальные плоскости; 2 – ось растяжения; 3 – ось сжатия.

Заключение. Сейсмический процесс в Таджикистане, особенно в северо-восточной части Таджикской депрессии (Гарм-Таджикабадский район), в зоне ее сближения с геологическими структурами Южного Тянь-Шаня, протекал в 2021 г. беспокойно, с серьезными сотрясениями. Непосредственно внутри государственных границ весьма значимым по энергии, с $K_p=14.1$, $M_{S_{ISC}}=5.9$, явилось мелкое ($h=13$ км) Таджикабадское землетрясение в прибрежной части хр. Петра Первого, в 25 км к юго-западу от районного центра Таджикабад и в 168 км восточнее г. Душанбе, детально описанное в отдельной статье [1]. Оно возникло 10 июля 2021 г. и вызвало сотрясения с интенсивностью $I_0=7-8$ баллов в эпицентре с $\varphi=38.94^\circ N$, $\lambda=70.60^\circ E$. Годом ранее, 4 июля 2020 г., оно предвлялось землетрясением чуть меньшей энергии ($K_p=13.3$, $M_{S_{ISC}}=5.$) и интенсивности ($I_0=7$ баллов), с близким эпицентром ($\varphi=39.00^\circ N$, $\lambda=70.99^\circ E$) также в прибрежной части хр. Петра Первого [21], и сопровождалось громадным количеством ($N_\Sigma=2578$, $K_p=5.5-11.3$) расположенных там же афтершоков, приведенных в настоящем Ежегоднике отдельным Приложением 3.

Не менее активной в сейсмическом отношении была зона коровых землетрясений Центрального Памира. Несколько в стороне от пересечения южного окончания Каракульско-Сарезского (№ 7) и центральной части Бартанг-Пшартского (№ 8 а) разломов на рис. 2 зарегистрирован мощный рой землетрясений, включающий два землетрясения с $K_p \div 13$, два – с $K_p \div 12$, шесть – с $K_p \div 11$ (табл. 6), и свыше 140 с $K_p=8.6-10.5$. Наиболее сильные землетрясения возникли 8 (№ 13) и 27 сентября (№ 15) соответственно. Их эпицентры расположены в 25–27 км к юго-востоку от оз. Сарез, показанного на рис. 1 а.

В районе строящейся Рогунской ГЭС зафиксированы два ощутимых толчка: 24 ноября в 02^h34^m с $K_p=10.6$ и 4 декабря в 21^h38^m с $K_p=10.2$. Первый возник в непосредственной близости от Рогунской ГЭС (2 км) и Обигарма (4 км) на глубине 15 км, второй – в 26 км к юго-западу от Рогуна. Они ощущались в Рогуне до 3 баллов [Приложение 5]. Вблизи столицы республики г. Душанбе реализовались лишь слабые землетрясения не выше 9-го класса.

Глубокие ($h=70-301$ км) и сильные землетрясения, в силу удаленности и большой глубины, не опасны на территории республики. Даже максимальное из них, 12 февраля с $K_p=14.4$, $M_{GCMT}=5.9$, $h=130$ км, сильнейшее не только среди промежуточных землетрясений, но среди всех событий каталога Таджикистана за 2021 г. [Приложение 2], локализованное в 50 км северо-западнее Мургаба, в 52 км восточнее оз. Сарез, вызвало в Мургабе (50 км) сотрясения не выше 4 баллов, в Хорроге (180 км) – 3 балла, Душанбе (400 км) – 2–3 балла.

Подводя итоги, можно утверждать, что в целом в 2021 г. сейсмический процесс в республике протекал в фоновом режиме.

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие: Т.Р. Улубиева, Л.И. Рислинг, Р.С. Михайлова, З.М. Нилобекова, З.С. Маматкулова, С.Ш. Хакимова, Г.Н. Холова, Р.У. Джурасев, Н.А. Лукаш, С.Г. Пойгина, Г.М. Бахтиярова.

Электронное приложение App05b_Tadjikistan_2021 (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>) включает: 1 – Сейсмические станции Геофизической службы НАНТ в 2021 г.; 2 – Каталог землетрясений Таджикистана за 2021 г.; 3 – Каталог землетрясений района Таджикабадской последовательности с землетрясением 10 июля 2021 г. с $K_p=14.1$, $M_w=5.8$, $I_0=7-8$; 4 – Каталог механизмов очагов землетрясений Таджикистана за 2021 г.; 5 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Таджикистана в 2021 году; 6 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Таджикистана в 2021 г.

Л и т е р а т у р а

1. Джурраев Р.У. Таджикибадское землетрясение 10 июля 2021 г. с $M_S=5.8$, $I_0=7-8$ баллов (Таджикистан) // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 278–290. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.26> EDN: UECROA
2. Улубиева Т.Р., Михайлова Р.С., Рислинг Л.И. Сейсмичность Таджикистана и прилегающих территорий в 2020 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 101–113. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.09> EDN: FOXCPR
3. Ачилов Г.Ш., Бабаев А.М., Мирзоев К.М., Михайлова Р.С. Сейсмогенные зоны Памира // Геология и геофизика Таджикистана. – 1985. – № 1. – С. 117–138.
4. Улубиева Т.Р., Михайлова Р.С., Рислинг Л.И. Сейсмичность Таджикистана и прилегающих территорий в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.09> EDN: YBJCIU
5. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32 (199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
6. Каток А.П. Об использовании номограммы Раутиан для энергетической классификации глубоких Памиро-Гиндукушских землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. II. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 139–143.
7. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 109.
8. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2021. (2025) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
9. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Global Centroid Moment Tensor (CMT) Catalog [Сайт]. (2025). – URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch>
11. Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьёв С.Л., Шебакин Н.В. Стандартная шкала магнитуд // Известия АН СССР. Серия геофизическая. – 1962. – № 2. – С. 153–158.
12. Petrova N.V., Gabsatarova I.P. Depth corrections to surface-wave magnitudes for intermediate and deep earthquakes in the regions of North Eurasia // Journal of Seismology. – 2020. – V. 24, N 1. – P. 203–219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09900-8>
13. Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // Seismological Research Letters. – 2013. – V. 84, N 5. – P. 810–815.
14. Фролова А.Г., Берёзина А.В., Шукурова Р., Соколова Н.П., Молдобекова С., Першина Е.В., Афонина Л.Р. Каталог землетрясений Кыргызстана и Узбекистана за 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
15. Сарыева Г.Ч., Тачов Б., Халаева А.Т., Дурасова И.А., Эсенова А., Халлыева Т., Велиева Г., Чарыева Б., Хрулева О.С., Союнова М. (2025). Каталог землетрясений Копетдага за 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
16. Search Earthquake Catalog. (2025) // USGS [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
17. European Mediterranean Seismological Centre. (2025). [Site]. – URL: <http://www.emscsem.org/Earthquake/earthquake.php>
18. Муралиев А.М., Малдыбаева М.Б., Абдыраева Б.С. Каталог механизмов очагов землетрясений территории «Кыргызстан и Узбекистан» за 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
19. Grünthal G. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) // Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. – Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie (CEGS), 1998. – V. 15. – 99 p.
20. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
21. Джурраев Р.У. Таджикибадское землетрясение 4 июля 2020 г. с $M_S=5.2$, $I_0=7$ баллов (Таджикистан) // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 313–322. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.28> EDN: UMJKTA

SEISMICITY of TAJIKISTAN and ADJACENT TERRITORIES in 2021

T.R. Ulubieva¹, R.S. Mikhailova², L.I. Risling¹¹Geophysical Survey of the National Academy of Sciences of Tajikistan,
Dushanbe, Tajikistan, tanya_55_08@mail.ru²Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, rm-gs@mail.ru

Abstract. In 2021, seismic monitoring of Tajikistan territory with adjacent areas of several states – Uzbekistan, Kyrgyzstan, China, India, Pakistan and Afghanistan – was carried out by a network of seven digital seismic stations of the Geophysical Survey of the National Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. A total of 8606 earthquakes were recorded with the energy classes $K_R=8.6\div 14.4$, of which 1424 were shallow shocks with $h=1\text{--}60\text{ km}$, scattered throughout zones I–III, and 7482 earthquakes were located at intermediate depths (70–301 km) of the Pamir-Hindu Kush in zone IV. 79 earthquakes were tangible. One of them, Tajikabad earthquake of July 10, 2021 with $K_R=14.1$, $M_{W_{GCMT}}=5.8$ and intensity in the epicenter $I_0=7\text{--}8$, was surveyed and described in a separate paper with isoseist mapping. The consolidated catalog of earthquake focal mechanisms contains 23 events, for which 41 solutions have been found. The strongest earthquake with a focus in the Earth's crust was the above mentioned Tajikabad earthquake. In the Afghan zone of the intermediate earthquakes, a sublatitudinal strip of seven foci with $K_R\geq 12.6$ was realized, with the maximum event on January 16, $K_R=14.0$, as well as a group of three foci in the east of the Murghab subzone, the strongest of which, on February 12 with $K_R=14.4$, $M_{W_{GCMT}}=5.9$, turned out to be the strongest among all events in the Tajikistan earthquake catalog for 2021. The total energy released in the sources of all earthquakes in the region was $\Sigma E=8.085\cdot 10^{14}\text{ J}$, including $\Sigma E=3.032\cdot 10^{14}\text{ J}$ for shallow events ($h<70\text{ km}$) and $\Sigma E=5.053\cdot 10^{14}\text{ J}$ for intermediate ($h=70\text{--}301\text{ km}$) ones.

Keywords: digital station, earthquake in the Earth's crust, intermediate earthquake, focal mechanism, shaking intensity, Pamir-Hindu Kush.

For citation: Ulubieva, T.R., Mikhailova, R.S., & Risling, L.I. (2025). [Seismicity of Tajikistan and adjacent territories in 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 102–117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.09> EDN: JBEVLW

References

- Juraev, R.U. (2025). [Tajikabad earthquake of July 10, 2021 with $M_s=5.8$, $I_0=7\text{--}8$ (Tajikistan)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 278–290. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.26> EDN: UECROA
- Ulubieva, T.R., Mikhailova, R.S., & Risling, L.I. (2024). [Seismicity of Tajikistan and adjacent territories in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 101–113. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.09> EDN: FOXCPR
- Achilov, G.Sh., Babaev, A.M., Mirzoev, K.M., & Mikhailova, R.S. (1985). [Seismogenic zones of the Pamir]. *Geologiya i Geofizika Tadzhikistana* [Geology and Geophysics of Tajikistan], 1, 117–138. (In Russ.).
- Ulubieva, T.R., Mikhailova, R.S., & Risling, L.I. (2023). [Seismicity of Tajikistan and adjacent territories in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 111–119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.09> EDN: YBJCIU
- Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspierimental'naia seismika (Trudy IFZ AN SSSR, № 32 (199))* [Experimental seismic] (pp. 88–93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Katok, A.P. (1974). [On the use of the Rautian nomogram for the energy classification of deep Pamir-Hindu Kush earthquakes]. In *Magnituda i energeticheskaja klassifikaziya zemletriaseniy. T. II* [Magnitude and earthquake energy classification. V. II] (pp. 139–143). Moscow, Russia: IFZ AN SSSR Publ. (In Russ.).
- Rautian, T.G. (1960). [Energy of earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti (Trudy IFZ AN SSSR, № 9 (176))* [Methods of Detail Study of Seismicity] (pp. 75–114). Moscow, Russia: Inst. Fiz. Zemli Akad. Nauk SSSR Publ. (In Russ.).
- GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2021. (2025). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
- International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Global Centroid Moment Tensor (GCMT). Catalog Search. (2025). Retrieved from <http://www.globalcmt.org/>
- Vanek, I., Zatopek, A., Karnik, V., Kondorskaya, N.V., Riznichenko, Yu.V., Savarenskij, E.F., Solov'yov, S.L., & Shebalin, N.V. (1962). *Standartnaya shkala magnitud* [Standardization of magnitude scale]. *Izvestiya AN SSR. Seriya geofizicheskaya*, 2, 153–158.
- Petrova, N.V., & Gabsatarova, I.P. (2020). Depth corrections to surface-wave magnitudes for intermediate and deep earthquakes in the regions of North Eurasia. *Journal of Seismology*, 24(1), 203–219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09900-8>
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E.R., Harris, J., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., & Bormann, P. (2013). Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). *Seismological Research Letters*, 84(5), 810–815.

14. Frolova, A.G., Berezina, A.V., Shukurova, R., Sokolova, N.P., Moldobekov, S., Pershina, E.V., & Afonina, L.R. (2025). [Catalog of earthquakes of Kyrgyzstan and Uzbekistan for 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
15. Saryeva, G.Ch., Tachov, B., Khalaeva, A.T., Durasova, I.A., Esenova, A., Halleyeva, T., Velieva, G., Charyeva, B., Khruleva, O.S., & Soyunova, M. (2025). [Kopetdag earthquake catalog for 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html/>
16. USGS. (2025). Search Earthquake Catalog. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
17. European Mediterranean Seismological Centre. (2024). Retrieved from <http://www.emscsem.org/Earthquake/earthquake.php>
18. Muraliev, A.M. (resp. comp.), Maldybaeva, M.B., Abdyaeva, B.S. (2025). Catalog of mechanisms of earthquake foci in the territory of Kyrgyzstan and Uzbekistan for 2021]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
19. Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 15, 99 p.
20. Medvedev, S. V. Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
21. Juraev, R.U. (2024) [Tadjikabad earthquake of July 4, 2020 with $M_s=5.2$, $I_0=7$ (Tajikistan)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 313–322. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.28> EDN: UMJKTA