

**ГИНДУКУШСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 26 октября 2015 г. с $M_w=7.5$, $I_0\sim 7$:
ПРЕДВАРЯЮЩАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ и АФТЕРШОКОВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ**

Михайлова Р.С.¹, Улубиева Т.Р.², Петрова Н.В.¹

¹Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, raisa@gsras.ru

²Геофизическая служба АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, tanya_55_08@mail.ru

Аннотация. 26 октября 2015 г. в Афганской подзоне Памиро-Гиндукуша на глубине $h_{rp}=217$ км произошло сильное Гиндукушское землетрясение с $K_p=17.0$, $M_w=7.5$. Вызванные этим землетрясением сотрясения разной интенсивности зафиксированы в населенных пунктах 15 государств: Афганистана, Таджикистана, Пакистана, Туркменистана, Индии, Кыргызстана, Узбекистана, Казахстана, Китая, Ирана, Непала, ОАЭ, России, Катара и Бангладеша с суммарной площадью $S_\Sigma=14\cdot 10^6$ км². Землетрясение предвлялось тремя крупными ($K_p=12.5, 12.1, 14.0$) форшоками и сопровождалось до 31.12. небывалой для глубоких толчков серией из более 1400 афтершоков с $K_p=9-13$. Энергетическая ступень между главным толчком и максимальным форшоком $\Delta K_\phi=3.0$, между главным толчком и максимальным ($K_p=12.8$) афтершоком $\Delta K_a=4.2$. График повторяемости афтершоков имеет наклон $\gamma=-0.67$, который по абсолютной величине ($|\gamma|=0.67$) выше среднего значения в регионе $|\gamma|=0.50$. Параметр затухания α закона Омори в начальной фазе спада $\alpha=-1.3$, по абсолютной величине также выше среднего для сильных землетрясений Мира. По результатам совместного анализа решений механизма очага от разных агентств и вертикальных разрезов вдоль и поперек облака афтершоков сделано заключение, что в очаге реализовалась подвижка типа взброс по крутой плоскости восток–юго-восточного простираания, падающей на юг. Причиной активности в месте землетрясения является движение Индийского континента на север и столкновение с Евразией, в результате которого под Гиндукушем предполагается отрыв и опускание Гиндукушской плиты. Гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. и его афтершоки – лишь один из актов последовательного снятия напряжений и деформаций в субширотной полосе, отмеченной в 2015 г. миграцией эпицентров землетрясений с $K_p=13-17$ с востока на запад.

Ключевые слова. Памиро-Гиндукуш, промежуточные землетрясения, форшок, афтершок, закон Омори, макросейсмическое поле, механизм очага.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.31

Для цитирования: Михайлова Р.С., Улубиева Т.Р., Петрова Н.В. Гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. с $M_w=7.5$, $I_0\sim 7$: предшествующая сейсмичность и афтершоковая последовательность // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015). – С. 324–339. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.31

Введение. 26 октября 2015 г. на северо-востоке Афганистана, в Гиндукушской очаговой зоне, которую Ч. Рихтер назвал «замечательной зоной постоянной активности» [1], на глубине $h=230$ км ($h_{rp}=217$ км) произошло очень сильное землетрясение с $M_w=7.5$. События на такой глубине обычно вызывают меньший ущерб на земной поверхности, чем мелкофокусные землетрясения аналогичной магнитуды. Однако событие 26 октября 2015 г. было достаточно сильным, чтобы вызвать не только необычайно высокий макросейсмический эффект на большой территории, но и причинить значительный материальный ущерб и привести к гибели по меньшей мере 115 человек [2].

Этому землетрясению посвящен ряд публикаций [3–8], в которых отмечается сложный характер процесса в очаге, включающий, возможно, 2–3 субсобытия, делаются заключения о связи особенностей разрывов в очагах этого и других Гиндукушских землетрясений с тектоническим строением Гиндукушской зоны, сформированным в процессе коллизии Евразийской и Индийской плит. Однако остается ряд вопросов относительно положения главного толчка 26 октября 2015 г. и его афтершоков, центр тяжести которых существенно смещен на запад, причин интенсивной афтершоковой последовательности, несвойственной землетрясениям на промежуточных глубинах, направленности сейсмического процесса в Гиндукушской зоне до и после главного толчка. В данной статье анализируются инструментальные параметры и макросейсмические проявления Гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г., его афтершоковая последовательность и предвляющая сейсмичность. При этом использованы данные, полученные на региональных сейсмических станциях Таджикистана, а также информация, опубликованная международными сейсмологическими центрами.

Инструментальные данные. Записи землетрясения 26 октября, полученные на станциях ГС АН РТ, расположенных на эпицентральных расстояниях 165–380 км, интересны тем, что землетрясение представлено двойным толчком с разницей 10^8 – в $09^h09^m30^s$ и в $09^h09^m40^s$, в силу чего первый был обработан как отдельный толчок с $K_p=14.0$, $M^p=5.6$ [9]. Кроме того, в научном анализе широкополосных сигналов GSN в [2] отмечено, что *P*-волны Гиндукушского землетрясения 2015 г. показывают его сложным событием, включающим, возможно, 2–3 субсобытия перед основным.

Основные параметры Гиндукушского землетрясения по данным ГС АН РТ и главных международных сейсмологических центров (далее в тексте – «агентств») приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры Гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г. по данным различных сейсмологических центров

| Агентство | t_0 , ч мин с | δt_0 , с | Гипоцентр | | | | | | Магнитуда | Источник |
|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|------------------------------|----------|
| | | | φ° , N | $\delta\varphi$, км | λ° , E | $\delta\lambda$, км | h , км | δh , км | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| ГС АН РТ | 09 09 40 | – | 36.50 | – | 70.30 | – | 230 | – | $K_p=17$ | [9] |
| MOS | 09 09 30.5 | 0.9 | 36.45 | 4.4 | 70.82 | 2.9 | 207 | – | $MS=6.9/31$, $m_b=6.9/62$ | [10] |
| ISC | 09 09 39.91 | 0.2 | 36.50 | 4.9 | 70.53 | 4.3 | 204 f 217 _{pp} | 7.8 | $m_b=7.2/69$ | [11] |
| NEIC-1 | 09 09 32.70 | – | 36.45 | – | 70.70 | – | 233 | – | $M_w=7.5/89$, $m_b=7.9/144$ | [11] |
| NEIC-2 | 09 09 42 | – | 36.66 | – | 70.59 | – | 210.5 | – | $M_w=7.5/163$ | [11] |
| NEIC-3 | 09 09 42.56 | 1.4 | 36.52 | 10.5 | 70.37 | 9.7 | 231.0 | 1.9 | $M_{ww}=7.5$ | [11] |
| NEIC-4 | 09 09 45 | – | 36.50 | – | 70.38 | – | 194.9 | – | – | [11] |
| GCMT | 09 09 46.6 | 0.1 | 36.55 | – | 70.42 | – | 209.4 | 0.7 | $M_w=7.5/163$ | [11] |
| USGS | 09 09 42 | – | 36.524 | – | 70.368 | – | 231 | – | $M_w=7.5$, подвижка 1.6 м | [2] |
| IPGP | 09 09 32.00 | – | 36.46 | – | 70.71 | – | 218 | – | $M_w=7.6$ | [11] |
| ВЛ | 09 09 31.20 | 0.9 | 36.59 | – | 70.79 | – | 207 | – | $m_b=6.1$ | [11] |

Примечание. Сведения об агентствах из графы 1 даны в обозначениях к настоящему ежегоднику. Представленное в графе 10 таблицы значение $MS=6.9$ по данным MOS получено И.П. Габсатаровой осреднением станционных значений магнитуд по 31 станции из [10].

Разброс решений в таблице невелик: по широте $\Delta\varphi=0.21^\circ$, по долготе – $\Delta\lambda=0.32^\circ$. Значение глубины очага варьирует в диапазоне 195–233 км, $h_{pp}=217$ км. Из магнитуд в большей части источников наиболее значима моментная магнитуда, $M_w=7.5$. Магнитуда MS для землетрясений с глубинами более 60 км в ISC [11] не определяется, однако в Сейсмологическом бюллетене ФИЦ ЕГС РАН [10] имелись данные по MS с 31 станции, которые собрала и любезно предоставила авторам статьи И.П. Габсатарова: Ala-Archa (6.9), Borovoe (6.8), Jazator (6.6), Groznyy (6.8), Garni (6.5), Arti (7.0), Nalchik (6.8), Khabaz (6.7), Neytrino (6.4), Kislovodsk (6.6), Ulaanbaatar (6.9), Pallekele (7.4), Milestii Mici (6.8), Minsk (6.7), Pulkovo (6.9), Lovozero (7.0), Apatity (7.2), Kalinigrad (7.0), Copenhagen (7.7), Kul'dur (7.1), Mys Shultsa (6.7), Kingsbay (7.0), Yuzhno-Sakhalin (7.1), Matsushiro (6.7), Nord (7.2), Magadan (6.9), Erimo (7.3), Kuril'sk (6.9), Petropavlovsk (7.0), Soendre Stroemf (6.9), College, Alaska (7.0). Среднее значение по всем станциям – $MS=6.9$. С учетом поправки за глубину из [12] ($\Delta M=+0.8$ при $h=230$ км), скорректированная магнитуда составляет $MS^p=7.7$, что неплохо согласуется с $M_w=7.5$.

Механизм очага исследуемого землетрясения в восьми вариантах разных агентств (табл. 2) представлен из Приложения [13].

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения 26 октября 2015 г. с $K_p=17.0$, $M_w=7.5$, $h=230$ км

| Агентство | t_0 , час мин с | h , км | Магнитуды | | K_p | Оси главных напряжений | | | | | | Нодальные плоскости | | | | | |
|-----------|----------------------|-------------|-----------|-------|-------|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|---------------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|
| | | | M_w | m_b | | <i>T</i> | | <i>N</i> | | <i>P</i> | | <i>NP1</i> | | | <i>NP2</i> | | |
| | | | | | | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>PL</i> | <i>AZM</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> | <i>STK</i> | <i>DP</i> | <i>SLIP</i> |
| MOS | 09 09 30.5 | 207 | – | 6.9 | 17.0 | 73 | 340 | 11 | 108 | 13 | 201 | 102 | 58 | 78 | 305 | 34 | 109 |
| IPGP | 09 09 32.0 | 218 | 7.6 | – | – | – | – | – | – | – | – | 108 | 66 | 88 | 293 | 24 | 94 |
| NEIC-1 | 09 09 32.7 | 233 | – | 7.1 | – | 65 | 14 | 1 | 106 | 25 | 197 | 106 | 70 | 89 | 289 | 20 | 93 |

| Агентство | t_0 , час мин с | h , км | Магнитуды | | K_p | Оси главных напряжений | | | | | | Нодальные плоскости | | | | | |
|-----------|----------------------|-------------|-----------|-------|-------|------------------------|-------|------|-------|------|-------|---------------------|------|--------|-------|------|--------|
| | | | M_w | m_b | | T | | N | | P | | $NP1$ | | | $NP2$ | | |
| | | | | | | PL | AZM | PL | AZM | PL | AZM | STK | DP | $SLIP$ | STK | DP | $SLIP$ |
| NEIC-2 | 09 09 42 | 210 | 7.5 | – | – | 64 | 19 | 1 | 287 | 26 | 196 | 107 | 71 | 91 | 284 | 19 | 87 |
| NEIC-3 | 09 09 42.6 | 231 | 7.5 | – | – | 66 | 16 | 1 | 283 | 24 | 193 | 104 | 69 | 91 | 280 | 21 | 86 |
| GCMT | 09 09 46.6 | 209 | 7.5 | – | – | 66 | 18 | 2 | 283 | 24 | 193 | 104 | 69 | 92 | 279 | 21 | 85 |
| NEIC-4 | 09 09 54.5 | 199 | 7.5 | – | – | 65 | 13 | 0 | 104 | 25 | 194 | 104 | 70 | 90 | 285 | 20 | 91 |
| ISC | 09 09 39.9 | 204 | – | 7.2 | – | 61 | 87 | 21 | 313 | 19 | 216 | 143 | 67 | 113 | 275 | 32 | 47 |

Решения механизма очага, представленные в табл. 2 (некоторые из них показаны на рис. 1), свидетельствуют о преобладании в очаге напряжений сжатия ($PL_p=13-26^\circ < PL_T=61-73^\circ$), которые при близвертикальном растяжении приводят к взбросовым подвижкам, полученным по всем решениям. Также можно отметить крутые ($DP_1=58-71^\circ$) плоскости $NP1$ и пологие ($DP_2=19-34^\circ$) – $NP2$. В частности, решение механизма очага NEIC-1 указывает на то, что взбросовый разрыв произошел либо по крутой ($DP_{NP1}=70^\circ$) плоскости $NP1$, простирающейся на восток-юго-восток (106°) и падающей на юг, либо по надвиговой ($DP_{NP2}=20^\circ$) плоскости $NP2$, простирающейся на запад-северо-запад (289°) и падающей на север. По заключению USGS [2, 6], основанному на результатах моделирования двух плоскостей тензора входного момента и сравнения подгонок формы сигнала, нодальная плоскость $NP1$ лучше соответствует данным. При этом в [2] отмечается, что «подгонка формы волны улучшается за счет смещения местоположения (главного толчка) на запад, в сторону афтершоков». Близкая интерпретация применима в какой-то мере и к другим решениям, кроме решения ISC, с несколько другим простираем плоскости $NP1$ ($STK=143^\circ$).

Тектоническая позиция очага и действующая плоскость разрыва. Сейсмичность Гиндукушской зоны обусловлена континентальным столкновением Индийской и Евразийской тектонических плит, которые сходятся с относительной скоростью 40–50 мм в год [6]. Субдукция Индийской плиты под Евразийскую вызывает многочисленные землетрясения и делает этот район одним из наиболее сейсмически опасных на Земле.

Как отмечено в [5, 7], Гиндукуш в Афганистане, расположенный на западной окраине столкновения Индии с Азией, – одно из немногих мест на планете, где предполагается отрыв части опускающейся (Индийской) плиты в результате столкновения континентов. Методом сейсмической томографии обнаружена зона пониженных скоростей P -волн в верхней части ($h \sim 60-180$ км) субдуцирующей литосферы, которую авторы [5] интерпретируют как погружение континентальной коры, и повышенные скорости в ее нижней ($h=180-265$ км), более плотной, эклогитизированной части. Из анализа скорости деформации авторами [5, 7] сделан вывод, что глубокая часть плиты отделяется от более мелкой части, поскольку плавучий материал земной коры сопротивляется субдукции, и такие сильные землетрясения, как анализируемое в данной статье, скорее всего, являются разрывами вдоль плоскости литосферного сдвига.

На рис. 1 а приведена карта сейсмоактивных зон и глубинных разломов региона расположения Памиро-Гиндукушской зоны [14], где произошло землетрясение 26 октября 2015 года. Максимальная сейсмическая активность, наблюдаемая в афганской части Памиро-Гиндукуша, занимает в мантии практически субвертикальный объем глубиной от 180 до 270 км и площадью сечения около 40 тыс. км² ($\Delta\varphi=36.2-37.8^\circ N$ и $\Delta\lambda=69.6-72.4^\circ E$). Наибольшее количество землетрясений в 2015 г. зарегистрировано в слое с $h=200-230$ км [9].

Хотя прямой связи разломной тектоники в земной коре с процессами на глубине, скорее всего, нет, но провоцирование коровых землетрясений глубокими происходит чаще всего в Южном Тянь-Шане, в области влияния самого протяженного Дарвазского разлома (переименованного в двух его частях), начинающегося в Афганистане, над зоной самых глубоких очагов (230–300 км), и доходящего в его восточной части до границы с Китаем. Самым ярким примером этой взаимосвязи являются события 1974 г.: 30 июля произошло сильное глубокое ($h=200$ км) землетрясение в Гиндукуше с $M_w=7.3$, $\varphi=36.41^\circ N$, $\lambda=70.75^\circ E$, а через 12 дней, 11 августа, вблизи границ Китая реализовалось такое же сильное коровое ($h=18$ км) Маркансуйское землетрясение с $M_w=7.3$, $\varphi=39.39^\circ N$, $\lambda=73.86^\circ E$, сопровождавшееся очень большой серией афтершоков.

Проведенное ранее [15] сравнение конфигурации изолиний послынных карт сейсмической активности землетрясений Памиро-Гиндукуша выявило перекручивание изолиний именно в этой

зоне повышенной активности промежуточных землетрясений (структура типа пропеллера). Согласно последним исследованиям [16], наблюдаемая современная геометрия может быть согласована с моделью двусторонней субдукции Евразийской плиты и ранее подвергнутой надвигом континентальной литосферы Индии. Высказано предположение, что субдуцированная плита Гиндукуша ниже 210 км опускается в мантию с вертикальной скоростью 10 см/год [16].

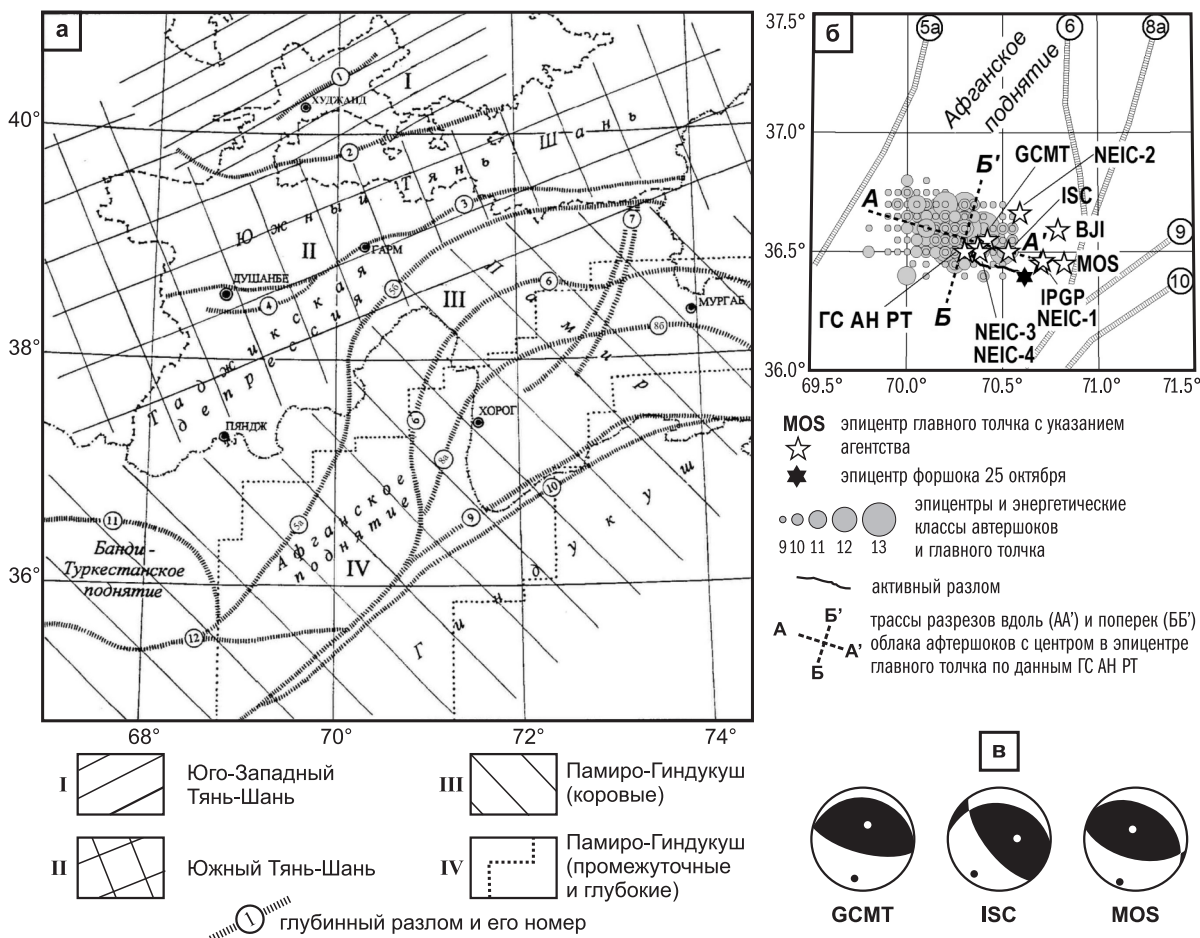


Рис. 1. Тектоническая позиция очага

а – глубинные разломы I порядка Таджикистана и Памиро-Гиндукуша по [14]: 1 – Северо-Ферганский, 2 – Заамин-Хайдараканский, 3 – Южно-Гиссарский, 4 – Иляско-Вахшский, 5 а – Дарваз-Заалайский, 5 б – Афгано-Северо-Памирский, 6 – Ванч-Акбайталский, 7 – Каракульско-Сарезский, 8 а – Бартанг-Пшартский, 8 б – Рушано-Северо-Пшартский, 9, 10 – Афгано-Южно-Памирские, 11 – Альбурз-Мормульский, 12 – Андараб-Мирзавалангский; б – эпицентр главного толчка по данным разных агентств в табл. 1, форшока и афтершоков по данным ГС АН РТ; в – механизм очага главного толчка по данным GCMT, MOS и ISC в проекции нижней полусферы, зачернены области сжатия, черная точка – ось сжатия, белая – растяжения.

На рис. 1 б показано положение эпицентра Гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г. в районе Афганского поднятия по данным разных агентств, а также его ближайшего во времени форшока и афтершоков, лоцированных сетью станций ГС АН РТ. Как видно из рисунка, большинство международных агентств дают решение для эпицентра в восточной части облака афтершоков или за его пределами. Наиболее надежными, на наш взгляд, являются решения ГС АН РТ, GCMT, USGS, NEIC-3, NEIC-4 и ISC, определяющие положение очага в восточной части облака афтершоков. Отметим, что по данным этих агентств, время в очаге главного толчка ($t_0 \geq 09^h 09^m 40^s$) примерно на 10^s позже, чем для самых восточных решений эпицентра, полученных агентствами MOS, IPGP, NEIC-1 и ВЛ ($t_0 = 09^h 09^m 30.5^s - 09^h 09^m 32.7^s$). Вероятно, решения MOS, IPGP, NEIC-1 и ВЛ получены при использовании в качестве первого вступления *P*-волн главного толчка вступлений от субсобытий, предшествовавших основному толчку. Как указывалось ранее, таджикская сеть обработала толчок, предваряющий основной, как отдельное событие, с разницей в 10^s . Далее в тексте и на рис. 1 б он упоминается как форшок 26 октября.

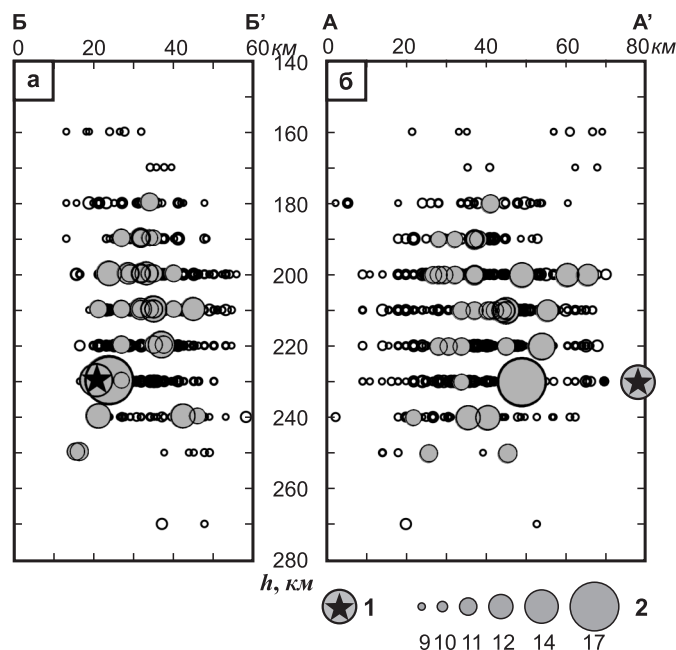


Рис. 2. Вертикальные разрезы поперек (а) и вдоль (б) облака афтершоков, показанные в плане на рис. 1 (А–А' – вдоль, Б–Б' – поперек)

1 – форшок 26 октября с $K_p=14$; 2 – афтершоки с $K_p=9-13$ и главный толчок с $K_p=17$.

Ориентация облака афтершоков на рис. 1 б хорошо согласуется с восток–юго-восточной/запад–северо-западной ориентацией нодальных плоскостей механизма очага по данным большинства агентств (рис. 1 в, табл. 2), однако для выбора одной из них в качестве действующей требуются дополнительные данные, в частности, глубинное распределение афтершоков, показанное на рис. 2 в проекции на вертикальные плоскости, секущие облако афтершоков поперек (а) и вдоль (б) его простирания. Линии ББ' и АА' на рис. 1 б являются проекциями этих плоскостей на поверхность Земли, а простирание АА' составляет 106° с направлением на север, как в решении NEIC-1 для нодальной плоскости *NP1*, наиболее близком к среднему значению *STK* для этой плоскости по данным большинства агентств (табл. 2). Как видно из рис. 2 а, поперечный разрез облака афтершоков демонстрирует почти вертикальную ориентацию облака, причем на глубинах 210–250 км плоскость разрыва падает на юг, если ее идентифицировать по распределению афтершоков с $K_p \geq 11$. Выше 210 км облако сильных афтершоков с $K_p \geq 11$ практически вертикально, а для более слабых толчков намечается тенденция смены направления падения на северное. Такое распределение согласуется с особенностями тектонического строения Гиндукушской зоны, под которой плоскость погружения континентальной коры Индийской плиты и гипоцентров землетрясений на глубинах менее 180–200 км падает на север, тогда как более глубокая часть плиты отделяется от более мелкой ее части с падением соответствующей плоскости гипоцентров землетрясений на юг под крутым углом. С учетом этих особенностей мы выбираем в качестве действующей – плоскость *NP1*, круто падающую на юг в решениях разных агентств (табл. 2).

Предшествующая сейсмичность исследована для среза землетрясений с глубинами $h \geq 160$ км в районе с координатами $\varphi=36.0-37.5^\circ\text{N}$, $\lambda=69.5-71.5^\circ\text{E}$ (рис. 3). Она интересна направленной с восток–северо-востока на запад–юго-запад миграцией эпицентров крупных толчков 13-го и 14-го классов в область очага Гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. (рис. 3 а). После реализации форшока 26 октября направление миграции изменилось на запад–северо-западное и отмечено фактом возникновения главного толчка уже через 10^5 после форшока, в 28 км к западу от него, и продолжением миграции на запад афтершоков (рис. 3 б). Ломаная линия миграции на рис. 3, вероятно, соответствует проекции на земную поверхность области наибольших деформаций, связанных с отрывом нижней части субдуцирующей плиты, причем оба направления миграции поддерживаются ориентацией нодальных плоскостей разрывов в очагах землетрясений на соответствующих участках (рис. 3 а, б).

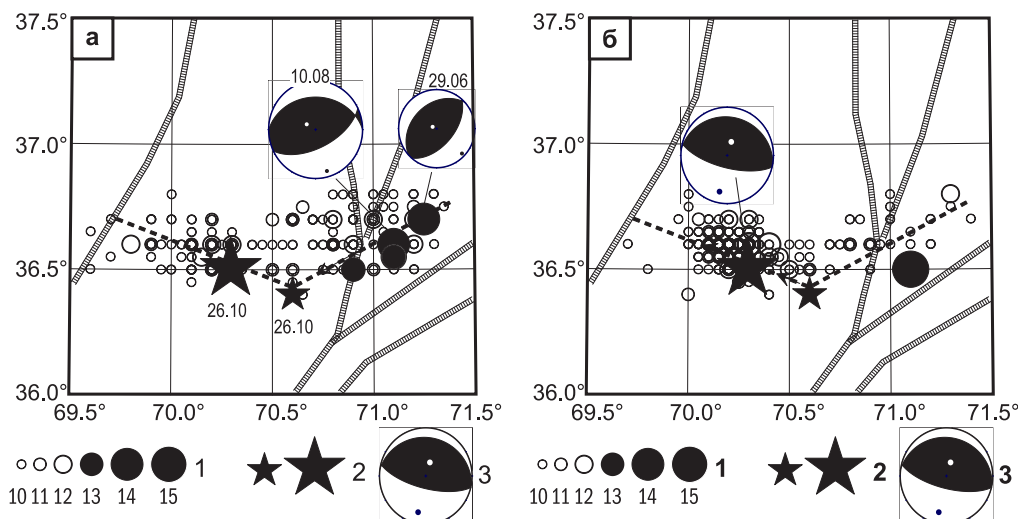


Рис. 3. Срез сейсмичности на глубинах $h \geq 160$ км в районе $\varphi=36.0\text{--}37.5^\circ\text{N}$, $\lambda=69.5\text{--}71.5^\circ\text{E}$: а) 01.01. – 26.10.2015 г.; б) 26.10. – 31.12.2015 г.

1 – энергетические классы $K_p=10\text{--}15$; 2 – эпицентры форшока и основного толчка 26 октября; 3 – диаграммы механизмов очагов в проекции нижней полусферы предшествующих событий и основного толчка по данным GСMT, зачернены области сжатия; пунктиром и стрелками показаны линии и направления миграции эпицентров.

Надо отметить, что область будущего главного толчка и афтершоков Гиндукушского землетрясения 26 октября была активной и до их реализации (рис. 3 а), однако эта активность проявлялась относительно слабо, на уровне землетрясений с $K_p \leq 12$. Крупных форшоков непосредственно вблизи главного толчка выявлено три: первые два произошли 9 и 13 октября на глубине $h=210$ км с $K_p=12.5$ и $K_p=12.1$, а третий, с $K_p=14.0$, реализовался, как указано выше, уже 26 октября, за 10^5 до главного толчка [9]. Оценим величину энергетической ступени между главным толчком и максимальным форшоком:

$$\Delta K_\phi = K_0 - K_\phi = 17.0 - 14.0 = 3.0. \quad (1)$$

Ближнее и дальнее последствие Гиндукушского землетрясения 26 октября. Для сильных ($M_w > 7$) промежуточных и глубоких ($h > 200$ км) землетрясений Памиро-Гиндукуша ближнее и дальнее последствие связаны с афтершоками в очаговой области и со спровоцированными впоследствии сильными коровыми ($h=10\text{--}30$ км) землетрясениями как над очагом, так и во всей Азии.

При анализе ближнего последствие землетрясения 26 октября выделено беспрецедентное количество ($N_{\text{афт}} > 1400$) афтершоков, не наблюдаемое ранее после глубоких землетрясений в Памиро-Гиндукуше за всю историю детальных инструментальных наблюдений в Таджикистане с 1952 года.

Афтершоки являются отражением релаксационных процессов в области очага главного события. Результаты анализа методом ортогональной регрессии темпов спада афтершоковой последовательности Гиндукушского землетрясения 26 октября 2015 г. показаны на рис. 4. Из рисунка видно, что релаксация напряжений в очаговой зоне проявляется в уменьшении интенсивности потока повторных толчков во времени (сутки) с разной скоростью, быстрой в начальной стадии (рис. 4 а). В последующий период отмечаются нерегулярные флуктуации интенсивности потока событий. Представленный в двойном логарифмическом масштабе на рис. 4 б временной ход начальной стадии уменьшения числа афтершоков N описывается уравнением прямой (рис. 4 б):

$$\lg N = 2.64(\pm 0.07) - 1.3(\pm 0.07) \cdot \lg t, \quad \rho = 0.98, \quad (2)$$

или в степенном виде:

$$N = 440 \cdot t^{-1.3}, \quad (3)$$

где t – время в сутках, ρ – коэффициент корреляции.

Таким образом, коэффициент спада со временем потока повторных событий землетрясения 26 октября равен по абсолютной величине 1.3, что превышает пределы экспериментальных

определений закона Омори [17] для большинства афтершоковых последовательностей крупных коровых землетрясений Мира, с преобладающим средним значением $|a|=1.0$ [18].

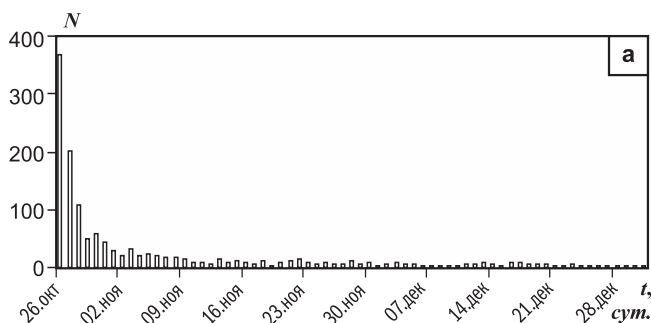


Рис. 4 а. Изменение числа афтершоков со временем с отсчетом от момента главного толчка и суммированием в интервалах $dt=1$ сутки

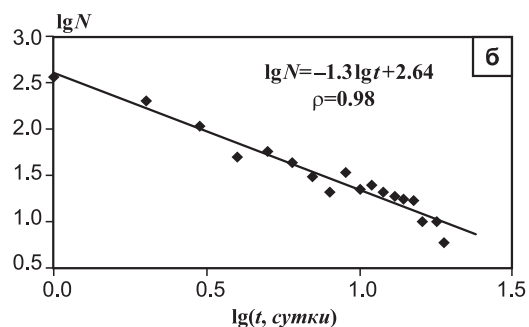


Рис. 4 б. Закон затухания афтершоков в билогарифмическом масштабе

Статистика распределения по месяцам и энергетическим классам афтершоков Гиндукушского землетрясения 26 октября дана в табл. 3. Для всех афтершоков за октябрь–декабрь 2015 г. построен график повторяемости (рис. 5). Его уравнение, полученное с высоким коэффициентом корреляции $\rho=0.99$, имеет вид:

$$\lg N_{\text{афт}} = 8.99 - 0.67 K_p. \quad (4)$$

Таблица 3. Распределение по месяцам и энергетическим классам афтершоков землетрясения 26 октября 2015 г.

| № | Месяц | Энергетический класс | | | | | Всего |
|---|---------|----------------------|-----|----|----|----|-------|
| | | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| 1 | Октябрь | 663 | 140 | 23 | 5 | 1 | 832 |
| 2 | Ноябрь | 355 | 53 | 4 | 2 | 2 | 416 |
| 3 | Декабрь | 118 | 38 | 3 | – | – | 159 |
| | Итого | 1136 | 231 | 30 | 7 | 3 | 1407 |

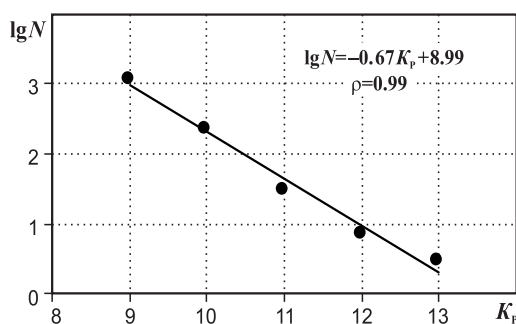


Рис. 5. График повторяемости афтершоков

Полученное значение угла γ наклона графика повторяемости, равное по модулю $|\gamma|=0.67$, превышает среднее региональное $|\gamma|=0.50$, что нередко наблюдается в больших сериях афтершоков землетрясений с очагом в земной коре, но в данном случае это свойство пролонгируется и для серии афтершоков глубокого толчка.

Распределение по глубине афтершоков Гиндукушского землетрясения 26 октября приведено на рис. 6 а, б.

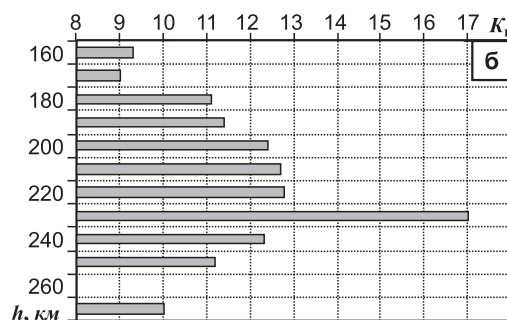
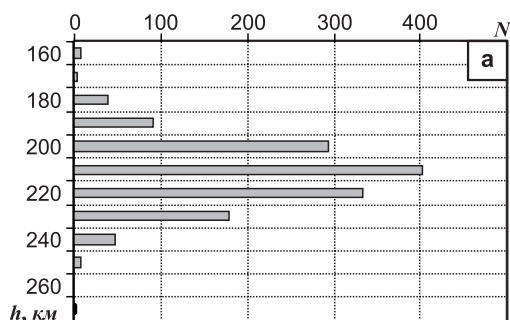


Рис. 6. Распределение числа (а) и значений максимальных энергетических классов (б) афтершоков по интервалам глубин

Как видим из рис. 6 а, мощность слоя субдуцированной коры и мантии, вовлеченных в афтершоковый процесс, равна 110 км, с минимальными числами афтершоков на уровне его кровли ($h_{\min}=160$ км, $N=8$) и подошвы ($h_{\max}=270$ км, $N=2$). Максимум (403 афтершока) зафиксирован на уровне $h=210$ км, близко к глубине главного толчка согласно наиболее надежному решению ISC ($h_{pP}=217$ км), использующему фазу pP отраженных от поверхности Земли P -волн. Ниже гипоцентра главного толчка по данным ГС АН РТ, NEIC-1, NEIC-4 ($h=230-233$ км) возникло лишь 4 % афтершоков, выше – 83 %, основная масса реализовалась в слое с $h=200-220$ км, что свидетельствует в пользу глубины $h_{pP}=217$ км в качестве предпочтительной.

Гистограмма распределения максимальных энергетических классов афтершоков в каждом 10-километровом слое, приведенная на рис. 6 б, представляет собой асимметричное распределение, однако оно становится симметричным (нормальным), если главный толчок отнести, опираясь на глубину $h_{pP}=217$ км по данным ISC, к интервалу 220 ± 5 км. Величина энергетической ступени между главным толчком и максимальным афтершоком в исследуемой серии, равная

$$\Delta K_a = K_0 - K_a = 17.0 - 12.8 = 4.2, \quad (5)$$

заметно выше аналогичных величин для главных толчков в земной коре. Еще большей была эта разница ($\Delta K_a=6.0$) при Гиндукушском (II) землетрясении 14.03.1965 г. с $M_w=7.7$, $h=215$ км [19]. Не исключено, что из-за большой ступени ΔK_a создается видимость отсутствия афтершоков у глубоких землетрясений, которые при большой разнице ΔK_a просто не регистрируются.

Как видим, сложные группирующиеся последовательности с форшоками и афтершоками (второй тип по классификации Моги [20]) реализуются не только для очагов в земной коре, но и для мантийных землетрясений глубокого ядра Афганской подзоны Памиро-Гиндукуша. В частности, предыдущее сильное Гиндукушское землетрясение в этой зоне 03.03.2002 г. с $M_w=7.3$, $h=180$ км имело 25 фор- и 366 афтершоков [21].

Пространственно-временное развитие афтершокового процесса показано на рис. 7 в двух сечениях – вдоль (АА' на рис. 1 б) и поперек (ББ' там же) всего их объема – и на двух энергетических срезах – с $K_p \geq 9$ и ≥ 11 . На рисунке отчетливо, особенно на более высокой энергетической ступени (рис. 7 б), прослеживается развитие афтершокового процесса с юга на север и с востока на запад, причем западное направление поддерживается и самым восточным положением форшока 26 октября с $K_p=14.0$. Расхождения поперек зоны со временем нет, т.к. первоначальный размер сечения в 50 км сократился к концу года до 20 км. Но вдоль зоны смещение поля заметно и преимущественно в западном направлении. Скорость этого смещения можно оценить по более сильным ($K_p \geq 11$) событиям на рис. 7 б. После реализации форшока, главного толчка и первых афтершоков 26 октября, «проработавших» зону шириной около 55 км, развитие сейсмического процесса, связанное со снятием остаточных напряжений и деформаций, шло с замедлением от 0.8 км/сутки в период с 26 октября до 5 ноября, 0.6 км/сутки в период с 6 по 15 ноября и до 0.3 км/сутки к концу года.

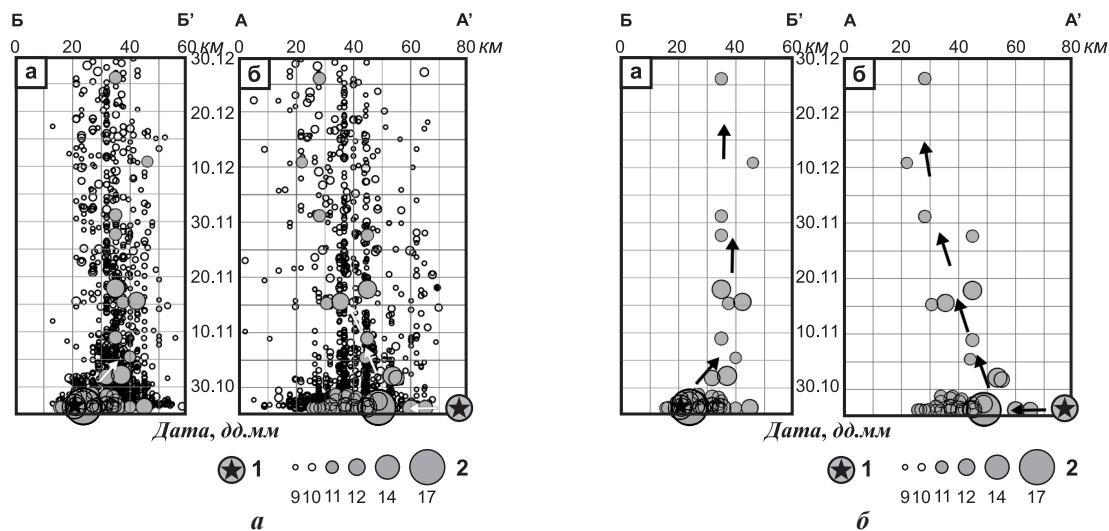


Рис. 7. Пространственно-временное развитие сейсмического процесса в очаговой зоне Гиндукушского землетрясения вдоль (АА') и поперек (ББ') афтершоковой зоны: а) события с $K_p \geq 9$; б) события с $K_p \geq 11$

1 – форшок 26 октября с $K_p=14$; 2 – афтершоки с $K_p=9-13$ и главный толчок с $K_p=17$.

Дальнее последствие сильных Гиндукушских землетрясений выражается в провоцировании всплесков сейсмической активности в земной коре и мантии не только Памиро-Гиндукушской зоны, но и горной системы Памира, Центральной Азии, Кашмира и Китая. Так, например, землетрясение 03.03.2002 г. с $M_w=7.3$, $h_{rp}=233$ км [22] спровоцировало в 2002 г. три разрушительных коровых землетрясения в Афганистане (25 марта с $M_w=6.1$, 27 марта с $M_w=5.6$, 12 апреля с $M_w=5.9$ [23]) и три землетрясения в Кашмире (1, 3 и 20 ноября с $M_w=5.3$, 5.3 и 6.3) [24].

Подобная же картина развернулась и после описываемого события 26 октября 2015 года. Так, через 22 дня после него, 17 ноября, в 480 км к север-северо-востоку реализовалось Талдыкское землетрясение [25] в Ошской области Кыргызстана с $K_p=14.3$, $M_w=5.5$, $h=10$ км, а еще через 20 дней, 7 декабря 2015 г., в 280 км к востоку от главного толчка произошло сильнейшее Сарезское (II) землетрясение в Центральном Памире с $K_p=16.9$, $M_w=7.2$, $h=20$ км [26]. Кроме того, два землетрясения, уже в 2016 г., произошли на противоположном от эпицентра восточном конце Дарваз-Каракульского разлома, в Заалайском хребте Южного Тянь-Шаня: (26.06.2016 г. с $K_p=15.3$, $M_w=6.4$, $h=20$ км, $\varphi=39.40^\circ N$, $\lambda=73.60^\circ E$ и 25.11.2016 г. с $K_p=15.9$, $M_w=6.6$, $h_{rp}=12$ км, $\varphi=39.20^\circ N$, $\lambda=74.00^\circ E$) [27].

Макросейсмические данные. Эпицентр землетрясения ($36.5^\circ N$, $70.3^\circ E$) находится на северо-востоке Афганистана, в зоне максимального сближения границ Афганистана, Таджикистана и Пакистана (рис. 8). Ближайшими из сотрясенных населенных пунктов являются г. Кундуз (130 км) в Афганистане с $I_i=7$ баллов и г. Хорог (157 км) – в Таджикистане с $I_i=6$ баллов [28]. Соответствующие гипоцентральные расстояния при $h=230$ км равны 264 км и 278 км соответственно. Единственный пункт с максимальной интенсивностью $I_i=8$ баллов расположен в Санджвале в Пакистане, в 361 км от эпицентра (рис. 8, [28]), и такая высокая интенсивность здесь представляется завышенной.

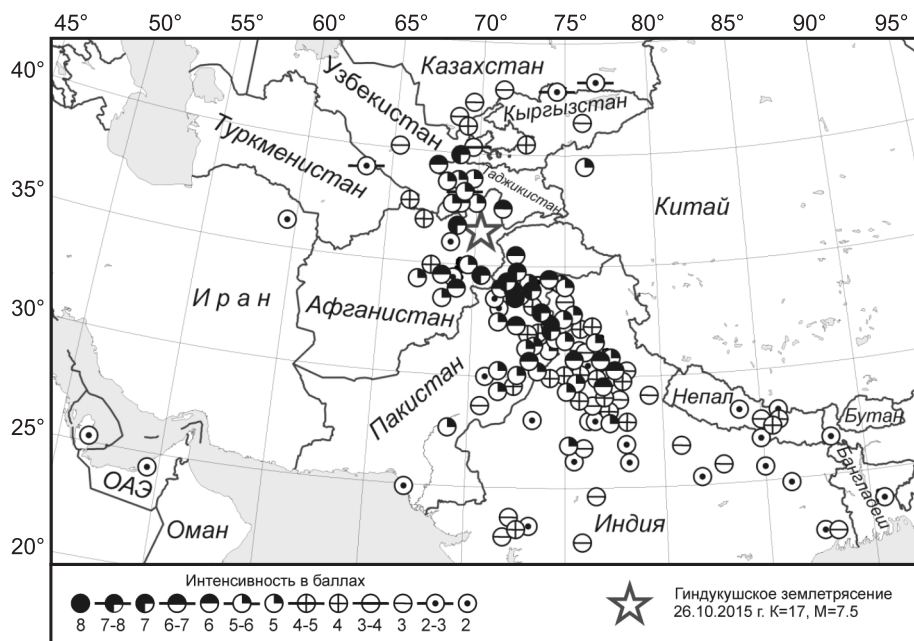


Рис. 8. Карта пунктов-баллов Гиндукушского землетрясения с $K_p=17.0$, $M_w=7.5$, $h=230$ км

Всего же сотрясениями разной интенсивности, кроме вышеназванных, охвачены территории еще 11 государств: Туркменистана ($\Delta_{min}=403$ км), Индии (429 км), Кыргызстана (497 км), Узбекистана (533 км), Китая (598 км), Казахстана (650 км), Ирана (960 км), Непала (1727 км), ОАЭ (2017 км), Российской Федерации (2145 км), Катара (2148 км) и Бангладеша (2379 км). Расстояние между крайними пунктами по долготе (Доха в Катаре и Танги в Бангладеше) равно ~ 3900 км, по широте – (Калькутта в Индии и Новосибирск в России) ~ 3600 км [28]. Суммарная площадь сотрясений интенсивностью выше 2-х баллов составляет свыше $14 \cdot 10^6$ км². В десяти пунктах отмечена интенсивность $I_i \geq 7$ баллов (табл. 2), суммарное число n_2 пунктов-баллов в приложении [29] равно 184, хотя Геофизическая служба Таджикистана сообщает сведения об интенсивности сотрясений лишь в шести пунктах [9], Сейсмологический бюллетень – о девяти

[10] (по шкале MSK-64 [30]). Остальные 175 пунктов включены редколлегией в приложение [28] по данным USGS [2], где интенсивность оценена по Модифицированной шкале Меркалли [31].

Таблица 4. Сведения о наибольших ($I_i > 7$) сотрясениях Гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г.

| № | Пункт | $\varphi^\circ N$ | $\lambda^\circ E$ | Δ , км | r , км |
|-----------------|------------|-------------------|-------------------|---------------|----------|
| 8 баллов | | | | | |
| 1 | Санджвал | 33.77 | 72.43 | 361 | 428 |
| 7 баллов | | | | | |
| 2 | Кундуз | 36.73 | 68.87 | 130 | 264 |
| 3 | Джалалабад | 34.42 | 70.45 | 232 | 327 |
| 4 | Мингора | 34.78 | 72.37 | 267 | 352 |
| 5 | Мардан | 34.20 | 72.05 | 301 | 379 |
| 6 | Абботтабад | 34.15 | 73.22 | 372 | 437 |
| 7 | Вах | 33.77 | 72.75 | 377 | 442 |
| 8 | Уратюбе | 39.91 | 69.00 | 396 | 458 |
| 9 | Джелам | 32.935 | 73.73 | 505 | 555 |
| 10 | Бхопалвала | 32.43 | 74.37 | 586 | 629 |

Геометрически макросейсмическое поле Гиндукушского землетрясения, представленное на рис. 8, имеет форму эллипса, вытянутого в северо-западном направлении, с $AZM=325^\circ$. На уровне $I_i \geq 5$ баллов длина продольной оси $a \sim 390$ км, поперечной – $b \sim 80$ км, площадь $S_{I=5} = 24490$ км². Северо-западная ориентация эллипса может быть связана с грунтовыми условиями и уровнем заселенности прилегающих к очагу территорий, где ощущались сотрясения. Использовать ее для выбора действующей плоскости разрыва представляется некорректным, т.к. глубина очага в несколько раз превышает его размеры.

Конечно, в горной местности Гиндукуша и в других районах данные об интенсивности не могут быть однородными и, соответственно, график ее затухания требует большего числа пунктов. Тем не менее, такая попытка предпринята, и результат изображен на рис. 9. Для $M_w=7.5$, $h=230$ км получено уравнение макросейсмического поля в виде:

$$I = 1.5 \cdot M - 4.42 \cdot \lg r + 5.7, \quad \rho = 0.73, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент корреляции, r – гипоцентрального расстояние.

На рис. 9 показаны исходные данные и установленное уравнение (6) в сопоставлении с уравнением (7) Н.В. Шебалина с коэффициентами, справедливыми для Центральной Азии согласно [32]:

$$I = 1.5 \cdot M - 3.5 \cdot \lg r + 3.0. \quad (7)$$

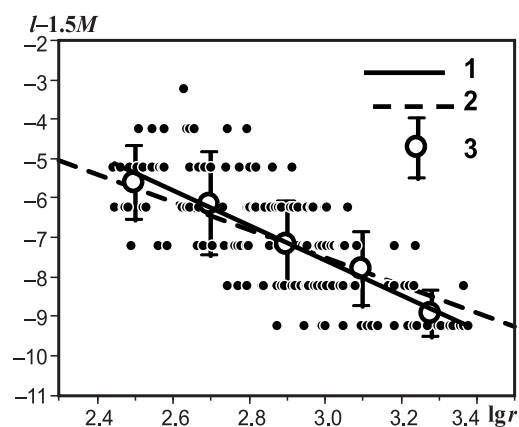


Рис. 9. Зависимость $I=f(r)$ для землетрясения 26 октября 2015 г.

1 – уравнение (6); 2 – формула Шебалина (7); 3 – среднеинтервальные значения $I_{cp} \pm \delta I$.

Также на рисунке приведены среднеинтервальные значения интенсивности $I_{cp} \pm \delta I$ (3 на рис. 9), установленные в интервалах расстояний ($\lg r \pm 0.1$), с указанием стандартных отклонений δI для I_{cp} . Как видно из рисунка, максимальные стандартные отклонения, $\delta I = \pm 1.06 \dots \pm 1.31$, наблюдаются в диапазоне расстояний 400–1000 км. Коэффициент затухания $\nu=4.42$ в уравнении (6) выше, чем в осредненном уравнении (7) для неглубоких землетрясений, но по уровню соотношения (6) и (7) близки, а с учетом большого разброса исходных данных можно рекомендовать уравнение (7) для оценки сейсмического эффекта не только коровых, но и промежуточных землетрясений Гиндукуша.

Попытаемся рассчитать, какое значение I_0 приписать исследуемому землетрясению в заголовке статьи. Перечислим исходные для расчета данные: магнитуа $M_w=7.5$; две возможные глубины очага –

$h_n=230$ км, $h_{pP}=217$ км; два набора значений параметров в уравнении макросейсмического поля вида $I_0=bM-v\lg h+c$: $b=1.5$, $v=4.42$, $c=5.7$ по уравнению (6) и $b=1.5$, $v=3.5$, $c=3.0$ – по уравнению (7); $I_i=8$ баллов в единственном населенном пункте Пакистана – Санджвал (Sanjwāl) с $\varphi=33.77^\circ\text{N}$, $\lambda=72.43^\circ\text{E}$, $\Delta=360$ км, $r=427$ км. В результате расчетов по формуле (6) получено для $h_n=230$ и $h_{pP}=217$ км $I_{01}=6.52$, $I_{02}=6.63$, среднее – 6.57, или 6–7 баллов, но никак не 8 баллов. По формуле (7): $I_{03}=5.98$, $I_{04}=6.07$, среднее – 6.02, т.е. точно 6 баллов. Отсюда следует вывод, что уравнение (6) лучше соответствует имеющимся данным наблюдений, т.к. дает более близкое к наблюдаемой интенсивности в ближайших населенных пунктах значение средней расчетной балльности в эпицентре, $I_0=6.57$. Следовательно, в заголовке можно приближенно поставить $I_0\approx 7$ баллов, несмотря на то, что в одном пункте зафиксировано 8 баллов (возможно, из-за плохих грунтовых условий).

Историческая сейсмичность исследуемой зоны представлена в табл. 5, согласно которой за период 1832–2015 гг. произошло 18 глубоких землетрясений с $M>7$. Два из них – Бадахшанское в январе 1832 г. и Гиндукушское(И) в ноябре 1937 г. – имели $I_0=9$ баллов, максимальную магнитуду $M=8.0$ имело Айваджское землетрясение в июле 1909 года. Три землетрясения с очень близкими гипоцентрами к исследуемому землетрясению и с большими магнитудами ($M=7.6$, 7.7) реализовались в 1911 г., 1921 г., 1965 году. Добавляя к ним событие 2015 г., получаем ряд высокомагнитудных событий с нарастающими между ними интервалами длительностью в 10, 34 и 50 лет. Четыре землетрясения – 14 марта 1965 г. с $M=7.5$, 30 июля 1974 г. с $M=7.3$, 30 декабря 1983 г. с $M=7.1$ и 3 марта 2002 г. с $M=7.3$ – сопровождалась повторными толчками.

Таблица 5. Список глубоких землетрясений с $M>7$, зарегистрированных с 1832 г. вблизи эпицентральной зоны Афганского землетрясения 26 октября 2015 г.

| № | Год | Число, месяц | t_0 , ч мин с | Координаты гипоцентра | | | M | Балл в эпицентре, название землетрясения | Источник |
|----|------|--------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------|------|--|-----------|
| | | | | φ° , N | λ° , E | h , км | | | |
| 1 | 1832 | январь | – | 36.5 | 71.0 | 180 | 7.4 | 9, Бадахшанское | [33] |
| 2 | 1909 | 07.07 | 21 37 50 | (36.5) | (69.0) | 230 | 8.0 | 7, Айваджское | [33] |
| 3 | 1911 | 04.07 | 13 33 26 | (36.5) | (70.5) | 160 | 7.6 | (8) | [33] |
| 4 | 1912 | 25.04 | 10 27 48 | 36.5 | 70.5 | 220 | 7.2* | – | [33] |
| 5 | 1917 | 21.04 | 00 49 49 | 37.0 | 70.5 | 220 | 7.3 | – | [33] |
| 6 | 1921 | 15.11 | 20 36 38 | 36.5 | 70.5 | 215 | 7.6 | – | [33] |
| 7 | 1922 | 06.12 | 13 55 36 | 37.4 | 71.3 | 230 | 7.2 | (8), Шивское | [33] |
| 8 | 1929 | 01.02 | 17 14 25 | 36.7 | 71.3 | 200 | 7.2 | 7–8 | [33] |
| 9 | 1937 | 14.11 | 10 58 10 | 35.0 | 73.0 | 200 | 7.3 | 9, Гиндукушское | [33] |
| 10 | 1939 | 21.11 | 11 01 46 | 36.3 | 70.6 | 220 | 7.1 | (7) | [33] |
| 11 | 1960 | 19.02 | 10 36 54 | 36.8 | 71.0 | 190 | 7.1 | (7) | [33] |
| 12 | 1962 | 06.07 | 23 05 33 | 36.8 | 70.1 | 210 | 7.4 | 7 | [33] |
| 13 | 1965 | 14.03 | 15 53 06 | 36.62 | 70.77 | 215 | 7.7 | 6–7, Гиндукушское | [33] |
| 14 | 1966 | 06.07 | 07 46 16 | 36.4 | 71.2 | 215 | 7.2 | (7), Гиндукушское | [33] |
| 15 | 1974 | 30.07 | 05 12 40 | 36.41 | 70.75 | 200 | 7.3 | (7) | [33] |
| 16 | 1983 | 30.12 | 23 52 40 | 36.4 | 70.6 | 210 | 7.1 | 6–7 | [34] |
| 17 | 2002 | 03.03 | 12 08 07 | 36.6 | 70.7 | 180 | 7.3 | 7 | [21] |
| 18 | 2015 | 26.10 | 09 09 40 | 36.5 | 70.3 | 230 | 7.5 | 7, Гиндукушское | Наст. ст. |

Заключение. Сильное землетрясение 26 октября 2015 г. с $M_w=7.5$, произошедшее на промежуточной глубине $h=230$ км, несколько отличается от предыдущих, прежде всего, большими размерами площади ощутимых сотрясений (свыше $14\cdot 10^6$ км²), причем область максимальных сотрясений смещена к юго-востоку от эпицентральной, в Пакистан и Северную Индию.

Гиндукушскому землетрясению предшествовала миграция эпицентров крупных сейсмических событий с $K_p=13$ –14 с востока на запад, в район очага 26 октября, которая продолжилась и во время афтершоковой серии. Вероятно, субширотная миграция эпицентров в западном направлении отмечает проекцию на земную поверхность области наибольших деформаций, связанных с отрывом и опусканием Гиндукушской плиты в ее западной, менее затронутой процессом отрыва части.

Совместный анализ решений механизма очага Гиндукушского землетрясения 2015 г. по данным разных агентств и вертикальных разрезов вдоль и поперек облака его афтершоков поз-

волил выбрать в качестве наиболее вероятной плоскость разрыва восток–юго-восточного простираения, круто падающую на юг (NPI в табл. 2), по которой произошла взбросовая подвижка.

Землетрясение сопровождалось наиболее интенсивной за период инструментальных наблюдений серией афтершоков, число которых превысило 1400. Наклон графика их повторяемости, $|\gamma|=0.67$, по модулю выше среднего $|\gamma|=0.5$ и свидетельствует об относительно большем числе слабых толчков в афтершоковой серии. Величина энергетической ступени между максимальным афтершоком и главным толчком велика, $\Delta K_a=4.2$. Серия характеризуется интенсивным затуханием в начальной стадии с коэффициентом Омори $\alpha=-1.3$, что выше по модулю среднего значения $|\alpha|=1.0$ для сильных землетрясений Мира. Весьма вероятно также, что последовавшие за землетрясением 26 октября, имевшим промежуточную глубину, коровые землетрясения 17 ноября с $K_p=14.3$, $M_w=5.5$, $h=10$ км в Южном Тянь-Шане и 7 декабря с $K_p=16.9$, $M_w=7.2$, $h=20$ км в Центральном Памире были спровоцированы этим промежуточным землетрясением в Гиндукуше. Следующие вспышки продолжились в 2016 г. на востоке Южного Тянь-Шаня – 26.06.2016 г. с $K_p=15.3$, $M_w=6.4$, $h=20$ км и 25.11.2016 г. с $K_p=15.9$, $M_w=6.6$, $h=12$ км. Согласно современным представлениям, активные разломы и вызванные ими землетрясения в северном Пакистане и прилегающих частях Индии и Афганистана являются прямым результатом конвергенции между Индийской и Евразийской плитами.

Авторы выражают благодарность Габсатаровой И.П. за ценную информацию относительно стационарных значений магнитуды по поверхностным волнам Гиндукушского землетрясения.

Л и т е р а т у р а

1. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. – М.: ИЛ, 1963. – 670 с.
2. USGS: Search Earthquake Catalog. (2021). [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
3. Zhan Z., Kanamori H. Recurring large deep earthquakes in Hindu Kush driven by a sinking slab // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – V. 43, N 14. – P. 7433–7441.
4. Poli P., Prieto G., Rivera E., Ruiz S. Earthquake initiation and thermal shear instability in the Hindu-Kush intermediate-depth nest // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – V. 43, N 4. – P. 1537–1542.
5. Kufner S.K., Schurr B., Haberland C., Zhang Y., Saul J., Ischuk A., Oimahmadov I. Zooming into the Hindu Kush slab break-off: A rare glimpse on the terminal stage of subduction // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2017. – V. 461. – P. 127–140.
6. Hayes G.P., Myers E.K., Dewey J.W., Briggs R.W., Earle P.S., Benz H.M., Smoczyk G.M., Flamme H.E., Barnhart W.D., Gold R.D., Furlong K.P. Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015. – US Geological Survey, 2017. – № 2016–1192. – 148 p.
7. Kufner S.K., Kakar N., Berada M., Bloch W., Metzger S., Yuan X., Mechie J., Ratschbacher L., Murodkulov Sh., Deng Zh., Schurr B. The Hindu Kush slab break-off as revealed by deep structure and crustal deformation // *Nature Communications*. – 2021. – V. 12, N 1. – P. 1–11.
8. Gupta S., Upadhayaya A. K. Preearthquake anomalous ionospheric signatures observed at low-mid latitude Indian station, Delhi, during the year 2015 to early 2016: Preliminary results // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – V. 122, N 8. – P. 8694–8719.
9. Улубиева Т.Р. (отв. сост.); Рислинг Л.И., Михайлова Р.С., Нилобекова З.М., Маматкулова З.С., Дмитриева Т.Н., Кутузова А.П., Валявская Т.Н., Артёмова Е.В. Каталог землетрясений Таджикистана за 2015 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
10. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2015. (2021) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015
11. International Seismological Centre. (2020). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
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. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09900-8>
13. Михайлова Р.С., Левина В.И. Каталог механизмов очагов землетрясений Таджикистана за 2015 г. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
14. Ачилов Г.Ш., Бабаев А.М., Мирзоев К.М., Р.С. Михайлова Р.С. Сейсмогенные зоны Памира. Земная кора, тектоника, магматизм Памира // *Геология и геофизика Таджикистана*. – Душанбе: Дониш, 1985. – № 1. – С. 117–138.

15. Михайлова Р.С., Бибарсова Д.Г. Сейсмическая активность глубокофокусных землетрясений Памиро-Гиндукушской зоны // Землетрясения Средней Азии и Казахстана, 1983. – Душанбе: Дониш, 1985. – С. 129–143.
16. Sippl C., Schurr B., Yuan X., Mechie J., Schneider F.M., Gadoev M., Orunbaev S., Oimahmadov I., Haberland C., Abdybachaev U., Minaev V., Negmatullaev S., Radjabov N. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2013. – V. 118, N 4. – P. 1438–1457. doi: 10.1002/jgrb.50128
17. Omori F. On the after-shocks of earthquakes // Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo. – 1894. – V. 7. – P. 111–200.
18. Татевосян Р.Э., Аптекман Ж.Я. Этапы развития афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений Мира // Физика Земли. – 2008. – № 12. – С. 3–23.
19. Астафьева Е.Г., Горбунова И.В., Захарова А.И. и др. Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР в 1965 г. – М.: Наука, 1967. – С. 44–70.
20. Mogi K. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper) // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. – 1963. – V. 41, N 3. – P. 615–658.
21. Михайлова Р.С., Улубиева Т.Р., Чепкунас Л.С. Гиндукушское землетрясение 3 марта 2002 г. с $M_w=7.3$, $I_0=8$ (южнее Таджикистана) // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 331–336.
22. Михайлова Р.С., Улубиева Т.Р. Гиндукушские землетрясения 3 марта 2002 г. в $12^{\text{h}}08^{\text{m}}08.2^{\text{s}}$ и в $12^{\text{h}}08^{\text{m}}22.5^{\text{s}}$ с $MS=7.3$ и их влияние в ближней и дальней зоне // Материалы Международной конференции, посвященной шестидесятилетию со дня Хаитского землетрясения 1949 г. в Таджикистане, г. Душанбе, 19–11 июля 2009 года. – Душанбе: Дониш, 2009. – С. 81–90.
23. Михайлова Р.С., Улубиева Т.Р., Чепкунас Л.С. Землетрясения 25 марта с $M_w=6.1$, 27 марта с $M_w=5.6$, 12 апреля 2002 г. с $M_w=5.9$ (южнее Таджикистана) // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 337–342.
24. Михайлова Р.С., Рогожин Е.А. Кашмирские землетрясения 1, 3 и 20 ноября 2002 г. с $M_w=5.3$, 5.3 и 6.3 // Материалы Международной конференции «Сейсмичность Северной Евразии». – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 186–193.
25. Фролова А.Г., Гребенникова В.В., Багманова Н.Х., Берёзина А.В., Першина Е.В., Молдобекова С. Талдыкское землетрясение 17 ноября 2015 г. с $K_p=14.1$, $M_w=5.5$ (Кыргызстан) // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 340–348. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.32
26. Негматуллаев С.Х., Джураев Р.У., Улубиева Т.Р. Сарезское землетрясение 7 декабря 2015 г. // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – Т. 2, № 74. – С. 171–176.
27. Улубиева Т.Р. (отв. сост.); Рислинг Л.И., Михайлова Р.С., Нилобекова З.М., Маматкулова З.С., Дмитриева Т.Н., Кутузова А.П., Валяевская Т.Н., Артёмова Е.В. Каталог землетрясений Таджикистана за 2016 г. – Душанбе: Фонды ГС АН РТ, 2017. – 145 с.
28. Улубиева Т.Р., Рислинг Л.И., Нилобекова З.М. (отв. сост.); Артёмова Е.В., Лукаш Н.А., Михайлова Р.С. Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений Таджикистана в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
29. Улубиева Т.Р. (отв. сост.), Пойгина С.Г., Бахтиарова Г.М., Артёмова Е.В., Лукаш Н.А. Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощутимых землетрясений Таджикистана за 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html>
30. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
31. The Modified Mercalli Intensity Scale. Earthquake Topics. (2021). // USGS [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli.php>
32. Шебалин Н.В. Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый Каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 20–31.
33. Михайлова Р.С., Каток А.П., Матасова Л.М., Джанузаков К.Д., Сыдыков А. (отв. сост.). III. Средняя Азия и Казахстан // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 198–296.
34. Баринаева А.Я. и др. Землетрясения Средней Азии и Казахстана // Землетрясения в СССР в 1983 году. – М.: Наука, 1986. – С. 45–60.

THE HINDU KUSH EARTHQUAKE on October 26, 2015 with $M_w=7.5$, $I_0\sim 7$:

PRELIMINARY SEISMICITY and AFTERSHOCK SEQUENCE

R.S. Mikhailova¹, T.R. Ulubieva², N.V. Petrova¹

¹*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia, rm-gs@mail.ru*

²*Geophysical Survey of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, tanya_55_08@mail.ru*

Abstract. On October 26, 2015, a strong Hindu Kush earthquake with $K_R=17.0$, $M_w=7.5$ occurred in the Afghan Pamir-Hindu Kush subzone at a depth of $h_{ip}=217$ km. Shakes of varying intensity caused by this earthquake were recorded in settlements of 14 states: Afghanistan, Tajikistan, Pakistan, Turkmenistan, India, Kyrgyzstan, Uzbekistan, Kazakhstan, China, Iran, Nepal, United Arab Emirates, Russia, Qatar and Bangladesh with a total area of $S_{\Sigma}=14\cdot 10^6$ km². The earthquake was preceded by three large ($K_R=12.5$, 12.1, 14.0) foreshocks and was accompanied by a series of more than 1400 aftershocks unprecedented for aftershocks of deep earthquakes with $K_R=9\text{--}13$. The energy step between the mainshock and the maximum foreshock is $\Delta K_{for}=3.0$, between the mainshock and the maximum ($K_R=12.8$) aftershock – $\Delta K_{aft}=4.2$. The aftershock recurrence graph has a slope $\gamma=-0.67$, which in absolute value is higher than the average value in the region $|\gamma|=0.50$. The attenuation parameter α of the Omori law in the initial phase of attenuation, $\alpha=-1.26$, in absolute value is also higher than the average $|\alpha|=1.0$ for strong earthquakes in the World. Based on the results of a joint analysis of the focal mechanism solutions of different agencies and vertical sections along and across the aftershock cloud, it was concluded that an upthrust movement occurred in the source along a steep east-south-east nodal plane, dipping to the south. The reason for the activity at the site of the earthquake is the movement of the Indian continent to the north and its collision with Eurasia, as a result of which the separation and subduction of the Hindu Kush plate continue. The Hindu Kush earthquake on October 26, 2015, and its aftershocks are just one of the events of successive deformation and stress relief in the latitudinal zone, marked in 2015 by the migration of earthquake epicenters with $K_R=13\text{--}17$ from east to west.

Keywords. Pamir-Hindu Kush, intermediate earthquakes, foreshock, aftershock, Omori law, macroseismic field equation, focal mechanism.

DOI: 10.35540/1818-6254.2021.24.31

For citation: Mikhailova, R.S., Ulubieva, T.R., & Petrova, N.V. (2021). [The Hindu Kush earthquake on October 26, 2015 with $M_w=7.5$, $I_0\sim 7$: Preliminary seismicity and aftershock sequence]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 324–339. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.31

R e f e r e n c e s

1. Richter, Ch. (1963). *Elementarnaia seismologiya* [Elementary seismology]. Moscow, Russia: IL Publ., 670 p. (In Russ.).
2. USGS: Search Earthquake Catalog. (2021). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
3. Zhan, Z., & Kanamori, H. (2016). Recurring large deep earthquakes in Hindu Kush driven by a sinking slab. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7433–7441.
4. Poli, P., Prieto, G., Rivera, E., & Ruiz, S. (2016). Earthquakes initiation and thermal shear instability in the Hindu Kush intermediate depth nest. *Geophysical Research Letters*, 43(4), 1537–1542.
5. Kufner, S.K., Schurr, B., Haberland, C., Zhang, Y., Saul, J., Ischuk, A., & Oimahmadov, I. (2017). Zooming into the Hindu Kush slab break-off: A rare glimpse on the terminal stage of subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 461, 127–140.
6. Hayes, G.P., Meyers, E.K., Dewey, J.W., Briggs, R.W., Earle, P.S., Benz, H.M., ... & Furlong, K.P. (2017). Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015 (№ 2016–1192). US Geological Survey.
7. Kufner, S.K., Kakar, N., Bezada, M., Bloch, W., Metzger, S., Yuan, X., ... & Schurr, B. (2021). The Hindu Kush slab break-off as revealed by deep structure and crustal deformation. *Nature communications*, 12(1), 1–11.
8. Gupta, S., & Upadhayaya, A.K. (2017). Preearthquake anomalous ionospheric signatures observed at low-mid latitude Indian station, Delhi, during the year 2015 to early 2016: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(8), 8694–8719.
9. Ulubieva, T.R., Risling, L.I., Mikhailova, R.S., Nilobekova, Z.M., Mamatkulova, Z.S., Dmitrieva, T.N., Kutuzova, A.P., Valiavskaia, T.N., & Artemova, E.V. (2021). [Catalog of Tajikistan earthquakes for 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).

10. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2015. (2021). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2015
11. International Seismological Centre. (2021). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
12. 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. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09900-8>
13. Mikhailova, R.S., & Levina, V.I. (2021). [Catalog of focal mechanisms of Tajikistan earthquakes for 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
14. Achilov, G.S., Babaev, A.M., Mirzoev, K.M., & Mikhailova, R.S. (1985). [Seismogenic zones of the Pamir]. *Geologiya i geofizika Tadzhikistana* [The Geology and Geophysics of Tadzhikistan], 1, 117–153.
15. Mikhailova, R.S., & Bibarsava, D.G. (1985). [Seismic activity of deep-focus earthquakes in the Pamir-Hindu Kush zone]. In *Zemletriaseniia Srednei Azii i Kazakhstana* [Earthquakes Central Asia and Kazakhstan] (pp. 129–143). Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ. (In Russ.).
16. Sippl, C., Schurr, B., Yuan, X., Mechie, J., Schneider, F.M., Gadoev, M., ... & Radjabov, N. (2013). Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1438–1457. doi: 10.1002/jgrb.50128
17. Omori, F. (1894). On the after-shocks of earthquakes. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 7, 111–200.
18. Tatevossian, R.E., & Aptekman, Z.Y. (2008). Aftershock sequences of the strongest earthquakes of the world: Stages of development. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 44(12), 945–964.
19. Astafyeva, E.G., Gorbunova, I.V., Zakharova, A.I., et al. (1967). [Earthquakes in Central Asia]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1966 godu* [Earthquakes in the USSR in 1965] (pp. 44–70). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
20. Mogi, K. (1963). Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 41(3), 615–658.
21. Mikhailova, R.C., Ulubieva, T.R., & Chepkunas, L.S. (2008). [Hindu Kush earthquake on March 3, 2002 with $M_w=7.3$, $I_0=8$ (south of Tajikistan)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2002 godu // [Earthquakes of Northern Eurasia in 2002]* (pp. 186–193). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
22. Mikhailova, R.S., & Ulubieva, T.R. (2009). [Hindu Kush earthquakes on March 3, 2002 12^h08^m08.2^s and 12^h08^m22.5^s with $M_w=7.3$ and their influence in the near and far zone]. In *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashennoi shestidesyatiletiiyu so dnya Khaitkogo zemletryaseniya 1949 v Tadzhikistane* [Materials of the International Conference dedicated to the Sixtieth anniversary of the Khait earthquake 1949 in Tajikistan] (pp. 81–90). Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ. (In Russ.).
23. Mikhailova, R.S., Ulubieva, T.R., & Chepkunas, L.S. (2008). [Earthquakes of March 25 with $M_w=6.1$, March 27 with $M_w=5.6$, April 12 with $M_w=5.9$ (southern Tajikistan)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2002 godu // [Earthquakes of Northern Eurasia in 2002]* (pp. 186–193). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
24. Mikhailova, R.S., & Rogozhin, E.A. (2008). [Kashmir earthquakes on November 1, 3 and 20, 2002 with $M_w=5.3$, 5.3 and 6.3]. In *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «Seismichnost' Severnoi Evrazii»* [Proceedings of the International Conference «Seismicity of Northern Eurasia»] (pp. 186–193). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
25. Frolova, A.G., Grebennikova, V.V., Bagmanova, N.Kh., Berezina, A.V., Pershina, E.V., & Moldobekova, S. (2021). [Taldyk earthquake on November 17, 2015 with $K_R=14.1$, $M_w=5.5$] *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 340–348. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.32
26. Negmatullaev, S.H., Juraev, R.U., & Ulubieva, T.R. (2018). [Sarez earthquake on Desember 7, 2015]. *Vestnik Natsional'nogo Yadernogo Centra Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National nuclear center of the Republic of Kazakhstan], 2(74), 171–176. (In Russ.).
27. Ulubieva, T.R., Risling, L.I., Mikhailova, R.S., Nilobekova, Z.M., Mamatkulova, Z.S., Dmitrieva, T.N., Kutuzova, A.P., Valiavskaia, T.N., & Artemova, E.V. (2017). *Katalog zemletriasenii Tadzhikistana za 2016 g.* [Catalog of earthquakes of Tajikistan for 2016]. Dushanbe: Funds of the Geophysical Survey of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 145 p. (In Russ.).
28. Ulubieva, T.R., Risling, L.I., Nilobekova, Z.M., Artemova, E.V., Lukash, N.A., & Mikhailova, R.S. (2021). [Macroseismic effect of tangible earthquakes in Tajikistan in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).

29. Ulubieva, T.R., Poigina, S.G., Bakhtiarova, G.M., Artemova, E.V., & Lukash, N.A. (2021). [Information on the settlements for which the information on macroseismic manifestations of tangible earthquakes in Tajikistan for 2015 is available]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-24.html> (In Russ.).
30. Medvedev, S.V., Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seymicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
31. The Modified Mercalli Intensity Scale. Earthquake Topics. (2021). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli.php>
32. Shebalin, N.V. (1977). [Reference earthquakes and macroseismic field equations]. In *Novyi catalog sil'nykh zemletriasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* [A new catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975] (pp. 20–30). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
33. Mikhailova, R.S., Katok, A.P., Matasova, K.M., Januzakov, K.D., & Sydykov, A. (1977). [III. Central Asia and Kazakhstan]. In *Novyi catalog sil'nykh zemletriasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* [A new catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975] (pp. 198–296). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
34. Barinova, A.Ya. et al. (1986). [Earthquakes of Central Asia and Kazakhstan]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1983 godu* [Earthquakes in the USSR in 1983] (pp. 45–60). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).