ОЧАГ И ПОСЛЕДСТВИЯ СИЛЬНЕЙШЕГО ГИНДУКУШСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 ОКТЯБРЯ 2015 г. (Мw=7.5)

Мусрепов А.В., Соколов А.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с Mw=7.5. Динамика разрыва в очаге была сложной, выявлено два последовательных толчка с разницей в ~10 сек, у первого M=5.9, второй характеризовался максимумом высвобожденной сейсмической энергии с Mw=7.5. В работе рассмотрены особенности волновой картины землетрясения по данным сети ИГИ РК, проведено сопоставление с результатами обработки международных и региональных сейсмологических Центров. Рассмотрены характеристики сейсмичности района Гиндукуша по данным глобальных сетей сейсмических станций начиная с 1973 г. Исследованы закономерности афтершоковой деятельности. Проанализированы записи сильных движений по данным Казахстанских и Центральноазиатских станций.

Введение

Уникальная зона глубокофокусной сейсмичности в районе Гиндукуша является одним из самых сейсмически активных районов Центральной Азии. За последние 20 лет здесь произошло несколько разрушительных землетрясений, сопровождавшимся большим количеством жертв. Так 4 февраля 1998 года здесь произошло землетрясение с mb=5.9, унёсшее жизни 2323 человек, после землетрясения 30 мая 1998 с mb=6.6 погибли ~4000 человек, а 25 марта 2002 г. погибли ~1000 человек [1]. Сильнейшие землетрясения Гиндукуша ощущаются на большой территории Центральной Азии, в том числе на юге и юго-востоке Казахстана. Кроме того, выявлена тенденция группируемости во времени сильнейших землетрясений с М≥7.0. В частности, установлено, что после сильнейших глубокофокусных гиндукушских землетрясений в течение периода от 2х недель до 4.5 месяцев нередко происходят сильные коровые события с М≥7.0 в регионе Центральной и Южной Азии [2, 3]. Всего произошло 10 таких пар землетрясений, начиная с 1900 года. Помимо появления пар сильных событий, имеются также случаи группирования сильных землетрясений Гиндукуша, Алтая (М≥6.9) и Северного Тянь-Шаня (М≥6.0) [4]. В связи с этим, изучение характеристик сейсмичности Гиндукуша имеет большое значение для изучения сейсмической опасности Центральной Азии, а также в целях среднесрочного прогноза сильных коровых землетрясений. 26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с Мw=7.5, параметры очага и последствия землетрясения являются предметом изучения этой работы.

Историческая сейсмичность Гиндукуша

Гиндукуш относится к складчатым горам и возник вследствие коллизии Индийской плиты и Евразии. Изучение тектонического строения и геодинамических процессов Гиндукушской зоны глубокофокусной сейсмичности привлекает внимание большого количества исследователей во всем мире [5–9]. Согласно [5] граница Мохо для исследуемой территории расположена на глубинах 70±5 км. Большинство землетрясений в районе Гиндукуша расположены в диапазоне глубин от 70 до 300 км. В таблице 1 представлены данные о землетрясениях с М≥7.0, произошедших с начала ХХ-го века [9]. С 1965 по 2002 гг. сильные землетрясения происходили регулярно с периодичностью 9 лет, потом в течение 13 лет землетрясений с магнитудой более 7 в рассматриваемом районе не было [9].

Таблица 1. Параметры землетрясений с М≥7.0 с 1900 г. из [6]

Год	Mec.	День	Широта	Долгота	h	М
1902	8	30	37.0	71.0	200	7.7
1908	10	23	36.5	70.5	220	7.6
1909	7	7	36.5	69.0	230	8.1
1911	7	4	36.5	70.5	160	7.6
1921	11	15	36.5	70.5	215	8.1
1922	12	06	36.5	70.5	230	7.5
1929	2	1	36.5	70.5	220	7.1
1949	3	4	36.6	70.6	300	7.7
1965	3	14	36.6	70.8	215	7.8
1974	7	30	36.35	70.76	211	7.4
1983	12	30	36.37	70.74	214	7.2
1993	8	9	36.38	70.87	214	7.0
2002	3	3	36.50	70.48	225	7.4
2015	10	26	36.463	70.712	231	7.5

Для исследований характеристик сейсмичности Гиндукуша был использован каталог NEIC Геологической службы США (USGS) [1], начиная с 1973 г., когда глубины определялись с относительно высокой точностью, до 1 апреля 2016 г. На рисунке 1 приведён нормированный к 1 году график повторяемости землетрясений. Из него можно сделать вывод о представительной регистрации землетрясений в этом районе, начиная с М = 4.25. Соотношение (1) описывает закон повторяемости землетрясений рассматриваемого района, который характеризуется большим углом наклона $\gamma = -0.93$.

$$lgN^* = -0.928 M + 5.814$$
(1)



Рисунок 1. График повторяемости землетрясений

На рисунке 2 приведены карты распределения эпицентров землетрясений в зависимости от магнитуд и глубин. Наиболее сильные землетрясения сосредоточены ближе к центру района, чуть смещены на запад, на глубинах ~180–230 км (рисунок 2 в, г). Наибольшее количество мелких событий расположены на окраине зоны и имеют магнитуды менее 6 (рисунок 2 а, б).



Рисунок 3. Распределение количества землетрясений по глубинам

На рисунке 3 показано распределение по глубинам количества землетрясений в районе Гиндукуша, большинство землетрясений сконцентрированы на глубинах 80–120 км и 180–240 км.

Характеристика основных параметров очага землетрясения 26 октября 2015 г.

26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с Мw=7.5. Динамика разрыва в очаге была сложной, выявлено два последовательных толчка с разницей в ~10 сек, у первого М=5.9, второй характеризовался максимумом высвобожденной сейсмической энергии с Мw=7.5 (рисунок 4). Многие Международные и региональные сейсмологические Центры провели оперативную обработку землетрясения некоректно,



Рисунок 2. Карты распределения землетрясений по глубинам (выделены цветом) и магнитудам: а) магнитуды M<5, б) 5≤M<6, в) 6≤M<7, г) М≥7

приняв вступление Р-волны первого события (Pf на рисунке 4) за вступление Р-волны основного толчка, в связи с этим были некорректно определены такие парамеры землетрясения как время в очаге, координаты эпицентра, Международный Центр данных (IDC) не верно определил mb (таблица 2). Окончательная обработка Геологической службы США и КНЦД включает как обработку основного толчка так и первого события (таблица 3). Несмотря на то, что Казахстанские станции зарегистрировали землетрясение в диапазоне эпицентральных расстояний 740–1860 км от события с максимальной магнитудой, и все станции расположены на севере в узком диапазоне азимутов (рисунок 5), параметры обоих событий близки к параметрам определенным NEIC (таблица 3).

Фокальный механизм очага получен методом тензора центроида сейсмического момента (СМТ) [1]. На рисунке 6 приведена стереограмма фокального механизма. Механизм очага характеризуется взбросом, обе возможные плоскости имеют северовосточное простирание. Ось сжатия близгоризонтальна и субмеридиональна. Ось растяжения – близвертикальна.

Таблица 2.	Инструмен	нтальные хар	актеристин	ки землетряс	ения 26.1	0.2015 г.
по данн	ым региона.	льных и межс	дународных	сейсмологиче	гских Цен	нтров

Агентство	Время в очаге	Широта	Долгота	h, км	К-во фаз, используемых для решения	mb	mp v	Mw
ЦСОССИ (оперативный)	09:09:27.7	36.0843	70.7991	221	18	6.3	7.3	
ИС НАН КР	09:09:29.2	36.2622	71.2695			7.5		
EMSC (Франция)	09:09:30.6	36.320	71.100					7.7
ГС РАН	09:09:31.0	36.490	70.850	215	31	7.4		
GFZ (ΦΡΓ)	09:09:31.2	36.380	70.900	189	32	7.7		
NEIC (оперативный)	09:09:32	36.463	70.712	231	194	7.7		7.5
IDC REB (Австрия)	09:09:33.8	36.467	70.832	231	93	5.4		

Таблица 3. Уточненные параметры гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. (форшока и основного толчка) по данным ЦСОССИ ИГИ и NEIC Геофизической службы США

Агентство	Время в очаге	Широта	Долгота	Smajax, км	h, км	К-во фаз, исполь- зуемых для решения	mb	mpv	Mw	
форшок										
ЦСОССИ	09:09:32.9	36.601	70.745	117	206	12	5.5	6.5		
NEIC	09:09:32.0	36.459	70.685	6	207	187	5.9			
основной толчок										
ЦСОССИ	09:09:44.6	36.801	70.546	20	216	16	6.7	7.8		
NEIC	09:09:42.6	36.524	70.368	6.7	231	194			7.5	



Рисунок 4. Сейсмограммы землетрясения 26 октября 2015 г. t0=09-09-42 по станциям РГП ИГИ. Z-компонента. Здесь Pf – время вступления P-волн форшока землетрясения



Рисунок 5. Карта расположения эпицентров а) форшока, б) – основного толчка гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. и станций РГП ИГИ, участвовавших в обработке



Рисунок 6. Стереограмма фокального механизма очага [1]

Афтершоковая активность

Как правило, после глубокофокусных землетрясений, либо афтершоков не бывает, либо происходит незначительное количество. Однако после основного толчка землетрясения 26 октября 2015 г. за период до 1 апреля 2016 г. произошло 54 афтершока с магнитудами mb от 3.9 до 4.6, в диапазоне глубин 182–229 км. В первые сутки произошло 19 афтершоков. На рисунке 7 представлена карта расположения эпицентров афтершоков и главного толчка, а на рисунке 8 показано распределение афтершоков по времени.

Интересно, что сразу после основного толчка произошло перераспределение землетрясений из района Гиндукуша по глубинам. Но рисунке 9 представлено распределение сейсмических событий из района Гиндукуша по глубинам да период времени 26.10.2015 г.-01.04.2016 г., значительно уменьшилось количество событий с глубинами меньше 180 км, существенно возросла доля землетрясений с глубинами от 180 до 220 км. Интересно, что такая же закономерность наблюдалась после некоторых сильных землетрясений с магнитудами более 6.5, на рисунке 10 представлено распределение количества сейсмических событий из района Гиндукуша по различным диапазонам глубин 80 ≤h<120 км, 120 ≤h<180 км, 180 ≤h<220 км и h≥220 км. Интересно, что перед землетрясением 26.10.2015 г., начиная с середины 2009 года наблюдалось сейсмическое затишье.



Рисунок 7. Пространственное распределение афтериюковой последовательности



Рисунок 8. Распределение афтершоковой последовательности по времени и магнитуде.



Рисунок 9. Распределение сейсмических событий из района Гиндукуша по глубинам да период времени 26.10.2015 г. – 01.04.2016 г

Макросейсмические параметры землетрясения

Землетрясение вызвало большое количество жертв (374), несколько тысяч раненых (более 2200), огромное количество разрушенных и поврежденных зданий (более 100000). на территории Пакистана, Афганистана и Индии [1]. Ощущалось жителями Таджикистана (Хорог 6 б, Душанбе 5–6 б), Узбекистана (Самарканд 5 б, Ташкент 4–5 б, Фергана 4 б,



Рисунок 10. Распределение количества сейсмических событий из района Гиндукуша по различным диапазонам глубин (км): 1–80≤h<120, 2–120≤h<180, 3–180≤h<220, 4– h≥220; 5– землетрясения с Mw≥6.5

Андижан и Наманган 3 б), Кыргызстана (Ош 4 б, Бишкек 3 б), Казахстана (Шымкент 4 б, Тараз 3–4 б, Алматы 3 б), России (Новосибирск и Уфа 2 б). Сразу после ощутимых землетрясений Геологическая служба США проводит интернет-опрос населения, на основе такого опроса была составлена карта интенсивности сотрясений землетрясения 26.10.2015 г. [1] (рисунок 11).



Рисунок 11. Карта интенсивности сотрясений землетрясения 26.10.2015г. по результатом оперативного интернет опроса населения [1]

			A					-	_	
Станция	A 1/14	I, баллы, в пункте	Амплитуд	ы ускорении,	CM/C ²	Амплитуды скоростеи, см/с			Период	Период
отанция	Δ, κ ινι	регистрации	B3	СЮ	Z	B3	СЮ	Z	ускор., с	скор., с
KBL	260	5	15,4	21,2	11,4	1,61	1,67	1,35	0,5	0,5
GARM	315		48,1	53,01		1,9	1,8			
NIL	387		21	19,8	6,9	2,87	2,87	2,623	1	1
ARLS	677		1,1	1,6	0,9	0,36	0,40	0,19	2,3	2,3
MNAS	689		2,2	2,6	1,6	0,71	0,42	0,36	3,3	3,3
MDO	922	3	0,3	0,3	0,3	0,16	0,13	0,17	3	3
ANVS	923		0,4		0,3	0,16		0,17	3,3	3,3
KNDC	923	3	0,7	0,8	0,6	0,26	0,29	0,19	4, 1,5	2, 1,5
PRZ	943		0,5		0,4	0,19		0,19	3,3	3,3
OTUK	1318		0,3	0,1	0,2	0,19	0,05	0,08	5	5
MAKZ	1483		0,1	0,1	0,2	0,06	0,09	0,1	7	7
ABKAR	1671		0,1	0,1	0,1	0,04	0,03	0,04	2, 7	2
BRVK	1848		0,1	0,1	0,1	0,04	0,06	0,11	5	5
AKTO	1859			0,1			0,03		1,5, 3, 5	1,5

Таблица 4. Параметры записей сильных движений для землетрясения 26.10.2015 г.



Рисунок 12. Зависимость максимальных амплитуд сильных движений от расстояния

Для научных исследований, оценки сейсмической опасности, риска и практики сейсмостойкого строительства большой интерес представляет анализ параметров записей сильных движений. Постоянный мониторинг сильных движений в ЦСОССИ был начат с 2006 г., с этого времени была создана и постоянно пополняется база данных цифровых записей сильных движений [11].Обработка данных осуществляется при помощи программного обеспечения ViewWave, разработанного Т. Кашимой [12], которое позволяет проводить визуализацию записи, откалиброванной за характеристики прибора в физических единицах, производить расчеты спектра Фурье и спектра реакции для разных значений затухания, производить дифференцирование и интегрирование записей. Для землетрясения 26.10.2015 г. были собраны записи акселерографов и велосиграфов Центральноазиатских станций, к сожаление часть данных пришлось отбраковать из-за того, что они были зашкалены. Записи велосиграфов были

предварительно продифференцированы. В таблице 4 представлены параметры записей сильных движений для землетрясения 26.10.2015 г., минимальное расстояние соответствует станции Кабул на расстоянии 280 км от эпицентра. На рисунке 12 представлена зависимость максимальных амплитуд сильных движений от расстояния.

Индуцированное землетрясение в Таджикистане (M=7.2) как последствие гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. (M=7.5)

В работах [2, 3] отмечено группирование сильных землетрясений в районе Центральной и Южной Азии. Согласно [2, 3] пары событий составляют глубокофокусное гиндукушское землетрясение (М≥6.7) и коровое событие (М≥7.0), произошедшее после него с запаздыванием до 4.5 месяцев в регионе Азии, ограниченном координатами 30-50° N и 50-90° E. Сильные коровые землетрясения после гиндукушских происходили в районах Тянь-Шаня, Туранской плиты, Копетдага, Иранского нагорья, Гиндукуша, Гималаев (таблица 5, рисунок 13). Сильнейшее глубокофокусное гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. повлияло на геодинамические процессы в Центральной Азии, после него произошло сильное коровое землетрясение в Таджикистане 7 декабря 2015 г. (М=7.2) вблизи оз.Сарез, его параметры приведены в таблице 5, расстояние между эпицентрами гиндукушского и Таджикского землетрясений 270 км.

Согласно работам [2, 3] после сильного гиндукушского землетрясения происходит перестройка флюидного поля в обширном регионе Центральной Азии, которая, увеличивает концентрацию флюидов в отдельных участках крупных разломных зон, что обеспечивает резкое ускорение процессов подготовки сильных землетрясений в наиболее ослабленных зонах.

Дата	Коорди эпице	инаты нтра	Глубина	м	Пауза,	Расстояние между эпи-	
гг, чч, мм	φ°, N	λ°, E	KM	IVI	мес.	центрами ∆, км	
21.04.1916 28.08.1916	36.5 30.0	70.5 81.0	220 33	6.8 7.3	4.3	1210	
01.02.1929 01.05.1929	36.7 37.8	71.3 57.8	200 20	7.4 7.2	3	1200	
07.09.1948 05.10.1948	36.9 38.0	70.6 58.3	220 18	6.7 7.3	0.9	1090	
04.03.1949 10.07.1949	36.6 39.2	70.6 70.8	300 16	7.7 7.4	4.3	290	
06.04.1956 09.06.1956	36.5 35.0	70.7 67.5	200 20	6.8 7.2	2.1	330	
30.07.1974 11.08.1974	36.4 39.3	70.8 73.7	200 18	7.3 7.3	0.4	410	
02.05.1981 28.07.1981	36.5 30.0	71.1 57.8	220 11	7.0 7.2	2.9	1430	
30.12.1983 19.03.1984	36.4 40.4	70.8 63.4	210 15	7.3 7.2	2.7	780	
29.07.1985 23.08.1985	36.2 39.4	70.9 75.4	100 20	7.2 7.0	0.8	530	
26.10.2015 07.12.2015	36.5 38.2	70.7 72.8	231 22	7.5 7.2	1.5	270	

Таблица 5. Параметры сильных землетрясений в регионе Центральной и Южной Азии [2, 3]

Заключение

В результате исследований детально изучены характеристики сейсмического режима в районе Гиндукуша, построен график повторяемости землетрясений за период 1973–2016 гг. построены распределения землетрясений по различным параметрам, изучено влияние сильных землетрясений на распределение землетрясений по глубинам.

Литература

- 1. [Электронный pecypc]: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes.
- Копничев, Ю.Ф. Вариации скорости вращения Земли и геодинамические процессы в Центральной Азии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Доклады А.Н. 1997. Т. 353, N 3. С. 386–389.
- 3. Копничев, Ю.Ф. Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии / Ю.Ф. Копничев, И. Баскутас, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 49–58.
- Копничев, Ю.Ф. Группирование сильных землетрясений в районе Центральной Азии: новые возможности среднесрочного прогноза сейсмических событий на Северном Тянь-Шане / Ю.Ф.Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. – 2006. – Т 411, N 2. – С. 246–249.
- Roecker, S.W., 1982. Velocity structure of the Pamir–Hindu Kush region: possible evidence of subducted crust / S.W. Roecker // J. Geophys. Res. 87, 945–959.
- Копничев, Ю.Ф. Картирование верхней мантии Памиро-Гиндукуша по поглощению поперечных волн / Ю.Ф. Копничев, П.Б. Каазик, О.В. Павлова // Докл. АН СССР. 1987. Т. 236. № 6. С.1335–1338.
- 7. Копничев, Ю.Ф. Новые данные о строении верхней мантии Гиндукуша / Ю.Ф. Копничев // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 3. С. 400–404.
- Negredo, A.N. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir–Hindu Kush region / A.N. Negredo, A. Replumaz, A. Villaseñor, S. Guillot // Earth and Planetary Science Letters 259 (2007) 212–225.
- Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Гиндукуша и их связь с глубокофокусной сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. С. 53–61.
- 10. [Электронный pecypc]: http://www.isc.ac.uk/iscbulletin
- 11. Соколов, А.Н. Использование данных по сильным движениям для прогноза воздействий на площадки строительства ответственных объектов /А.Н. Соколов, Р.Б.Узбеков // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6–8 июня 2012 г. г. Алматы ИЯФ. С. 97–105.
- 12. Kashima, T. 2002. ViewWave Help, IISEE, BRI.





О – коровые сильные землетрясения

Рисунок 13. Карта расположения эпицентров пар сильных землетрясений с 1900 г.

Собраны макросейсмические данные разрушительного землетрясения 26 октября 2015 г., обработаны записи сильных движений по данным сейсмических станций Афганистана, Пакистана, Таджикистана, Кыргызстана и Казахстана.

Подтверждена гипотеза о парах сильных землетрясений: глубокофокусное гиндукушское землетрясение (М≥6.7) и коровое событие (М≥7.0), произошедшее после него с запаздыванием до 4.5 месяцев в районе Центральной и Южной Азии. Сильнейшее глубокофокусное гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. ускорило процесс подготовки сильного корового землетрясения в Таджикистане 7 декабря 2015 г. (М=7.2) вблизи оз. Сарез.

2015 ж. 26 ҚАЗАНДАҒЫ ӨТЕ ҚАТТЫ ГИНДУКУШ ЖЕРСІЛКІНУДІҢ (Мw=7.5) ОШАҒЫ МЕН САЛДАРЛАРЫ

А.В. Мусрепов, А.Н. Соколов

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

2015 ж. 26 қазанда Гиндукуш ауданында Мw=7.5 апатты жерсілкінуі болған. Ошақтағы айырылым динамикасы күрделі болған, арасы ~10 сек. екі бірізді соққылар болған, біріншісінде М=5.9, екіншісі босатылған сейсмикалық энергияның Мw=7.5 максимумымен сипатталған. Жұмыста, ҚР ГЗИ желісінің деректері бойынша жерсілкінудің толқындық сүретінің ерекшеліктері қарастырылған, халықаралық және аймақтық сейсмологиялық Орталықтардың өңдеу нәтижелерімен салыстыруы жүргізілген. Глобаль сейсмикалық желілердің 1973 ж. бастап деректері бойынша Гиндукуш ауданы сейсмикалылығының сипаттамалары қарастырылған. Афтершоқ қимылының заңдылықтары зерттелген. Қазақстандық және Ортаазиялық станциялардың деректері бойынша қатты қозғалыстардың жазбалары талданылған.

THE ORIGIN AND CONSEQUENCES OF THE LARGEST HINDU KUSH EARTHQUAKE OF OCTOBER 26, 2015 (Mw=7.5)

A.V. Musrepov, A.N. Sokolov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

On October 26, 2015 there was a catastrophic earthquake Mw=7.5 at Hindu Kush region. The slip history was complex, it revealed two consecutive shocks with a difference of ~ 10 seconds of the first M = 5.9, the second was characterized by a maximum of released seismic energy with Mw = 7.5. The waveform peculiarities using data IGR RK seismic network studied. Earthquake parameters were compared with the results of the processing of International and regional seismological centers. The work considers seismicity characteristics of Hindu Kush area by data of global seismic stations networks since 1973. The regularities of aftershock activity investigated. The records of strong motion by data of Kazakhstan and Central Asia stations analyzed.