

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОБЛАСТЯХ САРЕЗСКОГО И НУРЕКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ (ТАДЖИКИСТАН): АДАПТАЦИЯ ЛИТОСФЕРЫ К ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

© 2016 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан,
г. Алма-Ата, Казахстан

Рассматриваются характеристики сейсмичности в областях Сарезского озера и Нурекского водохранилища. Установлено, что перед Памирским землетрясением 07.12.2015 г. ($M_w = 7.2$) сформировались кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Кольца сейсмичности пересекаются вблизи Усойского завала, который образовался в 1911 г. после сильного землетрясения и привел к образованию Сарезского озера и эпицентра Памирского землетрясения. Кроме того, вблизи от Сарезского озера произошли три из четырех самых сильных ($M \geq 6.0$) событий, зарегистрированных с 1950 г. в районе Памира на глубинах более 70 км. Совокупность имеющихся данных позволяет считать, что Памирское землетрясение, несмотря на очень большую энергию, относится к событиям, связанным с наведенной сейсмичностью. Кольцевые структуры в двух диапазонах глубин сформировались и в области Нурекского водохранилища. Предполагается, что образование кольцевых структур связано с процессами самоорганизации геологических систем, в результате действия которых поднимаются глубинные флюиды и литосфера постепенно адаптируется к дополнительной нагрузке, обусловленной заполнением водохранилищ. Отличие Нурекской плотины (а также многих других гидросооружений) от Усойского завала – в постоянной вибрации при падении воды с большой (более 200 м) высоты. Этот эффект может приводить к диссипации напряжений, в результате чего в областях искусственных водохранилищ происходят гораздо более слабые сейсмические события.

Ключевые слова: Сарезское озеро, Нурекское водохранилище, наведенная сейсмичность, кольцевые структуры, глубинные флюиды.

PACS 91.30.-f

Введение

В искусственных и сравнительно недавно заполненных естественных водохранилищах аккумулируются достаточно большие объемы воды, в ряде случаев превышающие 100 км^3 [Киссин, 1982]. Так, например, полный объем жидкости в водохранилище Кариба (Зимбабве, Замбия) составляет 180 км^3 , а в Братском водохранилище (Россия) – 169.3 км^3 . Это приводит к значительной дополнительной нагрузке на земную кору и реализации некоторых геодинамических процессов, позволяющих коре перейти к новому равновесному состоянию. В частности, хорошо известен эффект наведенной сейсмичности, проявляющийся в увеличении количества землетрясений и их энергии даже в тех областях, которые были малоактивными до заполнения водохранилищ [Simpson, Negmatullaev, 1981; Киссин, 1982]. Наиболее сильное землетрясение такого типа произошло в Индии в слабосейсмичном районе вблизи плотины Койна в 1967 г. ($M = 6.6$). В то же время в сейсмоактивных районах магнитуды подобных событий не превышали 6.3 (Кремаста, Греция, 1966 г.).

Одной из главных причин наведенной сейсмичности считается проникновение воды из водохранилищ по трещинам в глубь земной коры [Simpson, Negmatullaev, 1981; Киссин, 1982]. Однако при этом вода проникает на сравнительно небольшие глубины (порядка нескольких километров). Представляет интерес изучение вопроса о том, что может происходить с флюидным полем в областях больших водохранилищ и их окрестностях на относительно больших глубинах в земной коре и верхах мантии. В этой связи заметим, что длительное интенсивное техногенное воздействие приводит, в частности, к подъему флюидов из верхов мантии в областях крупных ядерных полигонов [Копничев, Соколова, 2001; 2008; Копничев и др., 2013]. В последние годы установлено, что миграция глубинных флюидов приводит к формированию кольцевых структур сейсмичности, в том числе при подготовке сильных коровых землетрясений [Копничев, Соколова, 2009; 2010; 2011а, б; 2013а, б]. В настоящей работе методика, связанная с анализом кольцевых структур сейсмичности, используется для исследования геодинамических процессов в областях двух крупных водохранилищ, расположенных в Таджикистане – естественного (Сарезского) и искусственного (Нурекского). Этот вопрос представляет особый интерес в связи с тем, что недавно – 07.12.2015 г., поблизости от Сарезского озера произошло достаточно сильное коровое землетрясение с $M_w = 7.2$.

Краткая геолого-геофизическая характеристика областей исследования

Сарезское озеро расположено в районе Центрального Памира (рис. 1). Оно начало заполняться после сильного ($M_w = 7.2$) землетрясения 18.02.1911 г., когда р. Мургаб была запружена в результате огромного оползня, образовавшего плотину высотой 567 м. Объем обвалившейся породы составил около 2 км^3 [Агаханянц, 1989]. В 1914 г. в нижнем бьефе плотины появились первые родники, свидетельствовавшие о просачивании воды из водохранилища. Уровень воды в озере поднимался приблизительно до 2000 г. В настоящее время длина озера составляет 56 км, наибольшая глубина – 505 м, площадь поверхности – 80 км^2 , объем воды – 17 км^3 . Высота уреза воды над уровнем моря достигает 3265 м.

Предполагается, что образовавшаяся при Сарезском землетрясении 1911 г. дамба, известная как Усойский завал, нестабильна и что землям вдоль рек Бартанг, Пяндж и Аму-Дарья грозит катастрофическое наводнение, если плотина разрушится при возможном сильном землетрясении. Главную же угрозу представляет обнаруженный

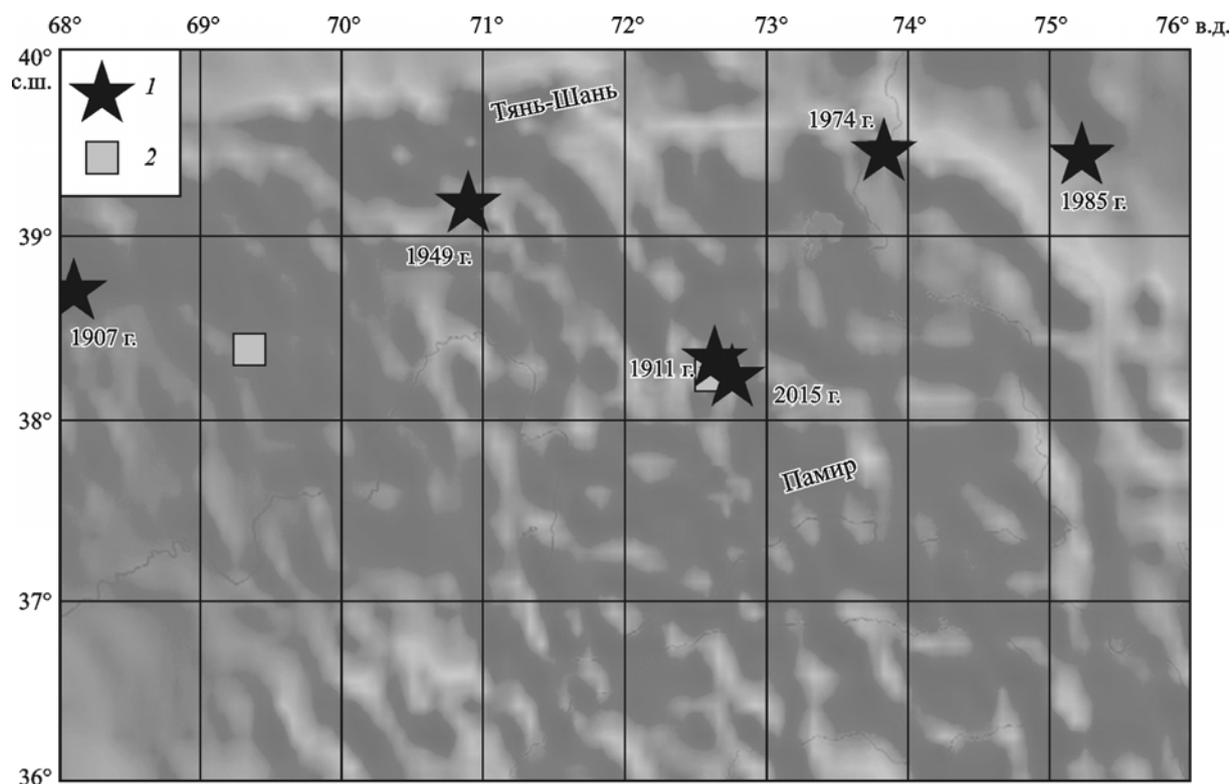


Рис. 1. Карта района исследований

1 – эпицентры неглубоких землетрясений с $M \geq 7.0$ с 1900 г.; 2 – Нурекская плотина (слева) и Усойский завал (справа)

в 1967 г. огромный (1.25 км^3), соизмеримый с объемом самой плотины неустойчивый массив на одном из склонов, нависающий над озером и получивший название Правобережного оползня [Агаханяни, 1989]. В случае разрушения плотины или обрушения оползня затоплению могут подвергнуться территории нескольких государств с населением более 6 млн человек.

Следует отметить, что после Сарезского землетрясения 1911 г. до 2015 г. в близких окрестностях озера не происходило коровых событий с $M \geq 6.0$ [Новый..., 1977]. В то же время 07.12.2015 г. поблизости от Сарезского озера произошло новое сильное землетрясение с $M_w = 7.2$ и глубиной гипоцентра 33 км (рис. 2, а). Интересно, что при этом событии интенсивность колебаний земной поверхности оказалась значительно ниже, чем обычно бывает при землетрясениях такой магнитуды [Новый..., 1977]. Судя по сообщениям таджикских сейсмологов, в области Сарезского озера имели место сотрясения интенсивностью всего лишь 5–6 баллов. Скорее всего, по этой причине при данном событии Усойский завал выстоял, и больших оползней также не произошло. Важно ответить на вопрос, связано ли событие 07.12.2015 г. с Сарезским озером, поскольку, как уже отмечалось, до сих пор наиболее сильное землетрясение такого типа имело магнитуду всего лишь 6.6.

Нурекское водохранилище расположено на севере Таджикской депрессии, на высоте ~ 1000 м над ур. моря (см. рис. 1). Оно начало заполняться после возведения плотины Нурекской ГЭС в 1972 г. и достигло проектной отметки в 1978 г. [Simpson, Negmatullaev, 1981]. Высота Нурекской плотины составляет 300 м, расчетный напор воды – 223 м. Длина водохранилища достигает 70 км, ширина – 1 км, средняя глубина – 107 м. Максимальный объем воды в водохранилище – $\sim 10.5 \text{ км}^3$, при этом уровень воды колеблется в пределах 53 м.

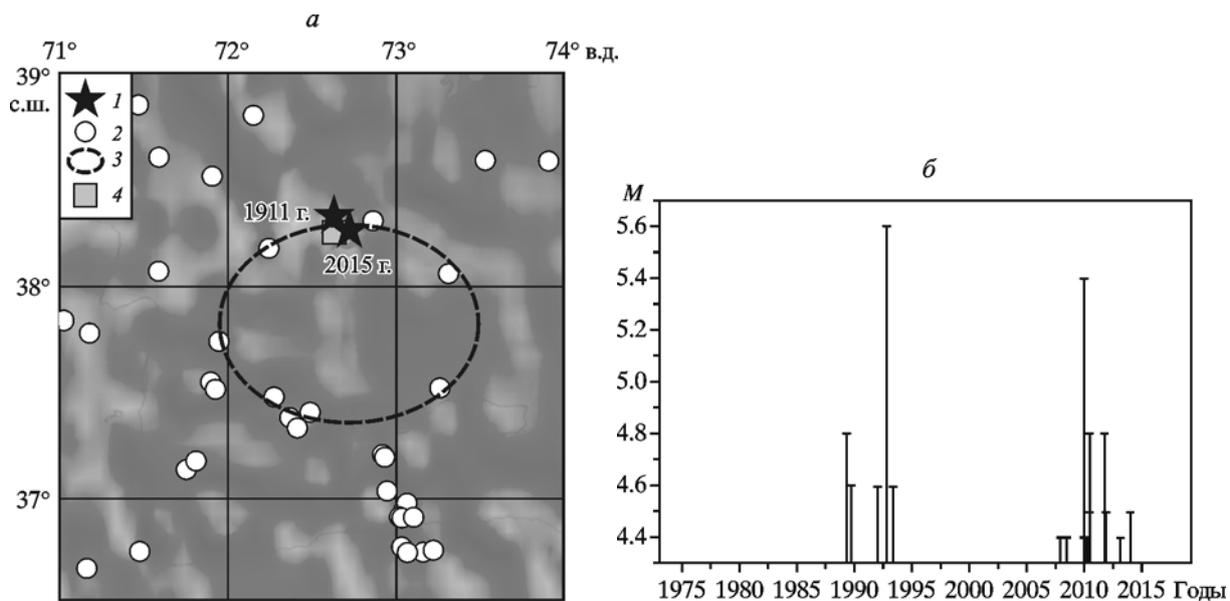


Рис. 2. Неглубокая сейсмичность (а) и зависимость $M(T)$ в области кольцевой структуры (б) в окрестностях Сарезского озера

1 – эпицентры неглубоких землетрясений с $M \geq 7.0$; 2 – эпицентры событий с $M \geq 5.0$; 3 – кольцо неглубокой сейсмичности; 4 – Усойский завал

Из приведенных данных следует, что потенциальная энергия воды, сконцентрированной в Сарезском озере, гораздо выше, чем для Нурекского водохранилища. Важно отметить, что в отличие от Усойского завала, в области Нурекской ГЭС действует постоянный интенсивный источник вибрации при падении воды с высоты более 200 м.

Использованные данные и методика исследований

В работе использовались главным образом каталоги Национального информационного центра по землетрясениям (NEIC), США, для областей, включающих Сарезское озеро и Нурекское водохранилище, начиная с 1950 г. и 1973 г. соответственно.

Методика выделения кольцевых структур имеет следующие особенности.

1. Исследуются характеристики сейсмичности за максимально возможный срок наблюдений (как правило, не менее 40 лет).

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (соответственно $M_{п1}$ и $M_{п2}$).

3. Производится перебор пороговых величин магнитуд $M_{п}$ (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. Мы принимаем, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы формирующих его эпицентров (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соот-

ответственно внутри и вне эллипса, от его контура) не превышает $1/4$ длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями $M_{п1}$ и $M_{п2}$. При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно L и l для неглубокого и глубокого колец).

6. Необходимо регулярно (не реже, чем раз в полгода) контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1–2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами $M_{п}$ (как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку в Северо-Восточной Японии 11.03.2011 г. [Копничев, Соколова, 2011а]).

Анализ данных

Область Сарезского озера. На рис. 2, *а* показаны эпицентры неглубоких землетрясений ($h = 0–33$ км) в районе, ограниченном координатами $36.5^{\circ}–39.0^{\circ}$ с.ш., $71^{\circ}–74^{\circ}$ в.д., куда входит большая часть Памира, с 01.01.1950 г. по 06.12.2015 г. ($M_{п1} = 5.0$). С начала 1950-х годов координаты землетрясений в данном районе начали определяться значительно точнее в связи с организацией Комплексной сейсмологической экспедиции Института физики Земли (ИФЗ) АН СССР [Гармский..., 1990]. На рис. 2, *а* четко выделяется кольцевая структура с длиной большой оси $L \sim 140$ км, вытянутая в субширотном направлении. На границу структуры попадают эпицентры Сарезского землетрясения 18.02.1911 г. ($M_w = 7.2$) и Памирского землетрясения 07.12.2015 г. ($M_w = 7.2$), вблизи от нее находится и Усойский завал. Из сведений, приведенных на рис. 2, *б*, следует, что структура формировалась начиная с 1954 г., при этом самое сильное ($M = 6.0$) событие на ее границе произошло в 1965 г. Интересно, что эпицентры событий в области кольца сейсмичности сначала располагались относительно далеко от Сарезского озера, а в 1995–2009 гг. переместились в его близкие окрестности. Следует отметить, что длительность формирования кольцевой структуры ($T_{п} \sim 61$ год) в данном случае значительно больше, чем перед другими сильными внутриконтинентальными землетрясениями (как правило, не более 40 лет [Копничев, Соколова, 2013а]).

На рис. 3 показана афтершоковая зона Памирского землетрясения 2015 г. Видно, что эта зона длиной ~ 75 км вытянута в северо-восточном направлении. Следует заметить, что Памирское землетрясение имело сдвиговый тип подвижки в очаге, при этом одна из нодальных плоскостей совпадала с простираем облака афтершоков.

На рис. 4, *а* представлены характеристики относительно глубокофокусной сейсмичности ($h = 34–70$ км), проявившейся в рассматриваемом районе начиная с 1973 г. В данном случае в 1989–2014 гг. проявилась узкая кольцевая структура, расположенная в основном севернее неглубокого кольца и ориентированная в субширотном направлении ($M_{п2} = 4.4$, $l \sim 140$ км). Наиболее сильное событие в области кольца сейсмичности зарегистрировано в 2010 г. ($M = 5.6$, см. рис. 4, *б*). Необходимо отметить, что неглубокая и глубокая кольцевые структуры пересекаются на долготях $\sim 72.2^{\circ}$ и 72.8° в.д., при этом эпицентр Памирского землетрясения 07.12.2015 г. и Усойский завал расположены на расстояниях соответственно ~ 10 и 15 км от восточной области пересечения колец.

На рис. 4, *в* представлены эпицентры сильнейших глубоких землетрясений ($M \geq 6.0$, $h = 71–200$ км), зарегистрированных в районе Памира с 1950 г. Видно, что произошло четыре таких события (все – в диапазоне глубин 110–125 км). Важно отметить, что

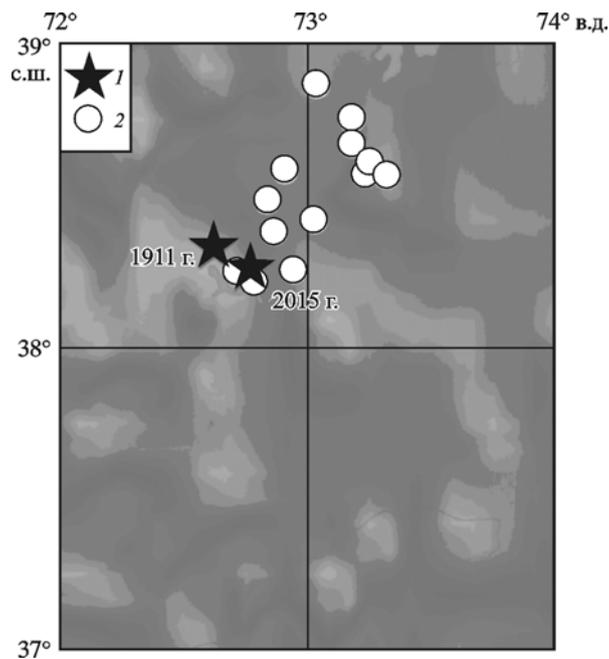


Рис. 3. Афтершоковая зона Памирского землетрясения 07.12.2015 г.

1 – эпицентры неглубоких землетрясений с $M \geq 7.0$; 2 – эпицентры событий с $M \geq 4.0$ за период 07–17.12.2015 г.

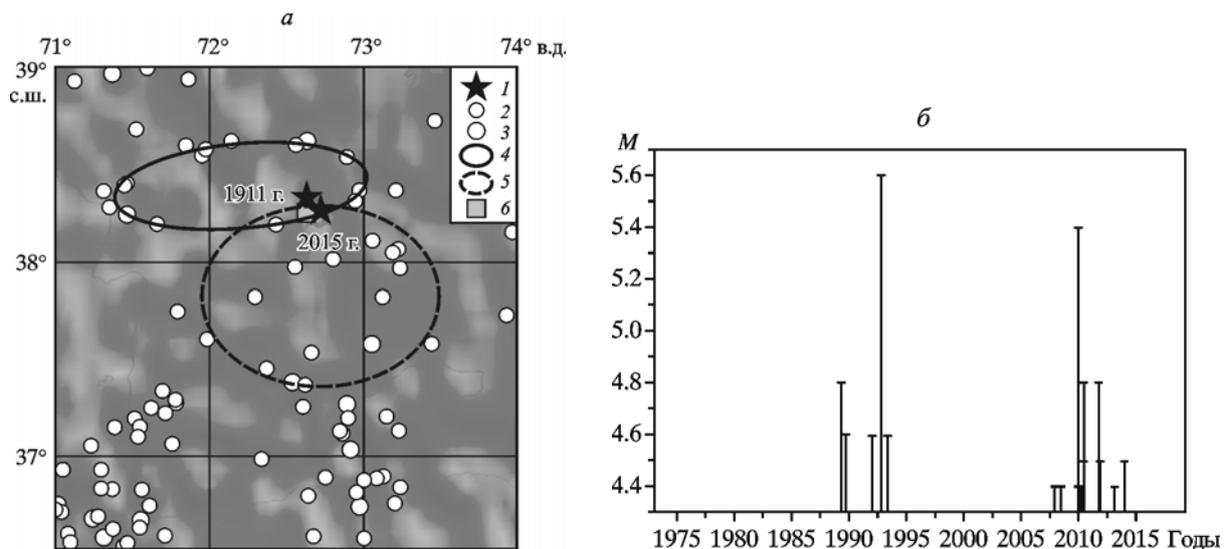


Рис. 4. Глубокая сейсмичность (а), зависимость $M(T)$ в области кольцевой структуры (б) и элементы сейсмичности ($M \geq 6.0$) на глубинах 71–200 км с 1950 г. (в) в окрестностях Сарезского озера

1 – эпицентры неглубоких землетрясений с $M \geq 7.0$; эпицентры событий с $M = 4.4–4.9$; 3 – эпицентры событий с $M \geq 5.0$; 4 – кольцо глубокой сейсмичности; 5 – кольцо неглубокой сейсмичности; 6 – Усойский завал

эпицентры трех из них попадают в небольшую область размером $\sim 35 \times 35$ км², внутри которой находится Сарезское озеро. Площадь области составляет ~ 1.6 % площади рассматриваемого района. Вероятность того, что три эпицентра попали в эту область случайно, определяется формулой

$$P_{3,4} = C^3_4 (0.016)^3 (0.984) \sim 2.5 \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что вероятность того, что очаги трех сильных глубокофокусных землетрясений не связаны с Сарезским озером, ничтожно мала.

Область Нурекского водохранилища. На рис. 5, а приведены эпицентры неглубоких землетрясений в районе Таджикской депрессии и Южного Тянь-Шаня, ограниченном координатами 37.5° – 39.5° с.ш., 68.5° – 71.0° в.д., начиная с 1973 г. ($M_{\text{пл}} = 4.5$). Отчетливо выделяется кольцевая структура с большой осью, ориентированной в субмеридиональном направлении ($L \sim 100$ км). Структура сформировалась в 1979–2015 гг. (рис. 5, б), наиболее сильные ($M = 5.0$) события произошли здесь в 1993 и 1998 годах.

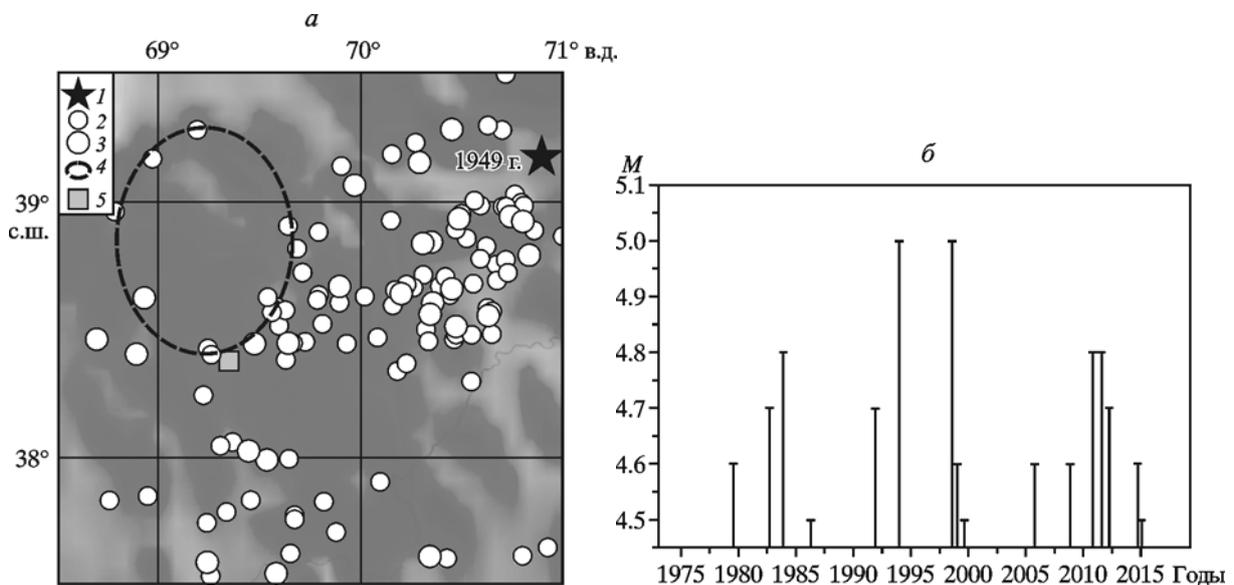


Рис. 5. Неглубокая сейсмичность (а) и зависимость $M(T)$ в области кольцевой структуры (б) в окрестностях Нурекского водохранилища

1–3 – то же, что на рис. 4; 4 – кольцо глубокой сейсмичности; 5 – Нурекская плотина

Рис. 6, а иллюстрирует характеристики относительно глубоких землетрясений. В данном случае выделяется кольцевая структура ($M_{\text{пл}} = 4.4$, $l \sim 110$ км), вытянутая в субширотном направлении, которая образовалась в 1976–2011 гг. (рис. 6, б). Самые сильные ($M = 5.0$ и 5.1) землетрясения зарегистрированы в 2005 г. Существенно, что точка соприкосновения неглубокого и глубокого колец расположена на расстоянии всего лишь ~ 10 км от Нурекской плотины.

На рис. 6, в показаны эпицентры самых глубоких ($h \geq 71$ км) землетрясений. В данном случае с 1973 г. зарегистрировано всего пять таких событий с $M = 4.6$ – 4.7 (глубины 78–119 км), при этом все они расположены на достаточно больших (~ 100 км) расстояниях от водохранилища. Таким образом, в отличие от области Сарезского озера, вблизи от Нурекского водохранилища на глубинах более 70 км не отмечены даже относительно слабые землетрясения.

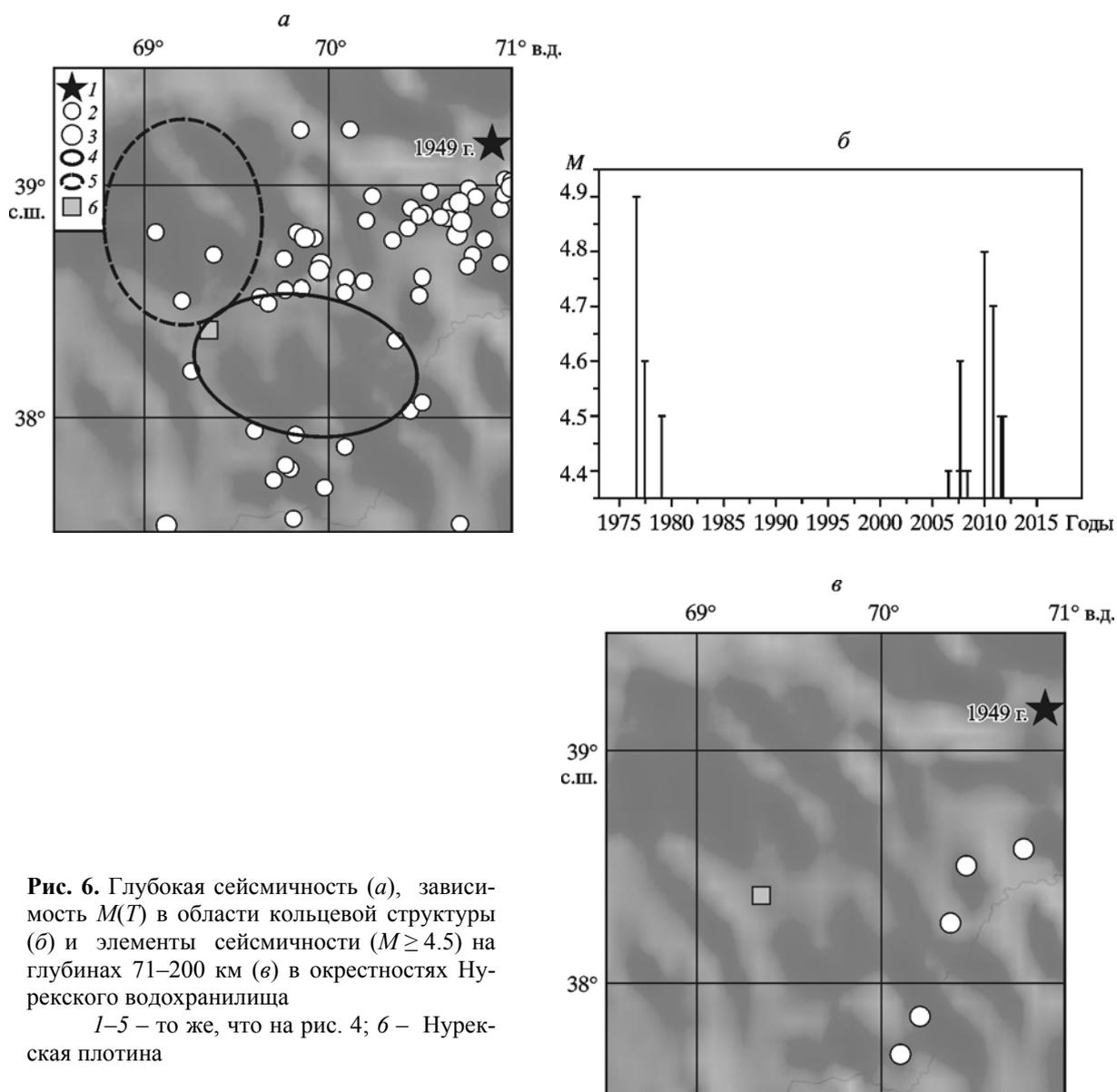


Рис. 6. Глубокая сейсмичность (а), зависимость $M(T)$ в области кольцевой структуры (б) и элементы сейсмичности ($M \geq 4.5$) на глубинах 71–200 км (в) в окрестностях Нурекского водохранилища

1–5 – то же, что на рис. 4; 6 – Нурекская плотина

Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений. Ранее [Копничев, Соколова, 2009, 2011а, 2013а, 2014] было показано, что по характеристикам неглубоких кольцевых структур можно оценивать магнитуды готовящихся сильных землетрясений. В работе [Копничев, Соколова, 2013а] получены корреляционные зависимости величин $\lg L$ (км) и $M_{\text{пл}}$ от магнитуд M_w сильных внутриконтинентальных событий с разными механизмами очагов, при подготовке которых сформировались эти структуры. Эти зависимости для землетрясений с механизмами типа сдвига, который проявился при землетрясении 07.12.2015 г., имеют вид:

$$\lg L \text{ (км)} = -1.12 + 0.49 M_w, \quad r = 0.94, \quad (2)$$

$$M_{\text{пл}} = -0.17 + 0.64 M_w, \quad r = 0.67, \quad (3)$$

где r – коэффициент корреляции.

Для событий с механизмами типа взброса и взбросо-сдвига, которые преобладают в районе Таджикской депрессии [Abers et al., 1988], получены следующие формулы:

$$\lg L \text{ (км)} = -1.11 + 0.45 M_w, \quad r = 0.85, \quad (4)$$

$$M_{\text{пл}} = -0.92 + 0.73 M_w, \quad r = 0.77. \quad (5)$$

В таблице приведены оценки величин M_w , которые могут соответствовать параметрам кольцевых структур в областях Сарезского озера и Нурекского водохранилища.

Оценки величин M_w по параметрам кольцевых структур

Область	L , км	$M_{пл}$	T_p , лет	$M_w(L)$	$M_w(M_{пл})$	M_w
38°–39° с.ш. 72°–74° в.д.	140	5.0	61	6.7	8.1	7.4±0.7
38°–39° с.ш. 69°–70° в.д.	100	4.5	36*	6.9	7.4	7.2±0.3

* Для этой области указана текущая величина T_p .

Обсуждение результатов. Заключение

Анализ полученных нами данных показал, что в областях Сарезского озера и Нурекского водохранилища в двух диапазонах глубин сформировались кольцевые структуры сейсмичности. Подобные структуры образуются перед большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции [Копничев, Соколова, 2009, 2011а, б, 2013б]. В указанных работах предполагалось, что данный эффект связан с процессами самоорганизации геологических систем [Летников, 1992], в результате которых происходит подъем флюидов из верхов мантии в земную кору, что в конечном счете приводит к уменьшению потенциальной энергии Земли. Анализ неоднородностей поля поглощения поперечных волн показывает, что флюиды обычно поднимаются по границам кольцевых структур [Копничев, Соколова, 2010]. При этом, с одной стороны, при формировании слоев двухфазного материала с сообщающимися порами и трещинами глубинные флюиды приводят к концентрации напряжений на кровле таких слоев [Каракин, Лобковский, 1982; Gold, Soter, 1984/1985], что и может инициировать сильные сейсмические события, а с другой – сами землетрясения и их афтершоковые последовательности облегчают подъем флюидов благодаря увеличению проницаемости горных пород при вибрационных процессах [Барабанов и др., 1987; Rojstacher, Wolf, 1992; Блехман, 1994; Ogawa, Heki, 2007; Miyazawa, Brodsky, 2008]. Существенно, что эпицентры сильных землетрясений, с которыми связано формирование кольцевых структур, как правило, располагаются вблизи областей пересечения или касания неглубокого и глубокого колец сейсмичности, где достигается наибольшая мощность двухфазных слоев, которой пропорциональна величина дополнительных напряжений [Каракин, Лобковский, 1982; Gold, Soter, 1984/1985]. Отметим, что один из главных источников выделения флюидов – дегидратация пород земной коры и верхней мантии, что приводит к их охрупчиванию [Raleigh, Paterson, 1965; Yamazaki, Seno, 2003; Jung et al., 2004]. Этот эффект и может вызывать формирование колец сейсмичности на относительно больших глубинах.

Во внутриконтинентальных районах кольцевые структуры сейсмичности чаще всего формируются только в верхнем диапазоне глубин, что мы связываем с меньшим содержанием здесь флюидов в литосфере по сравнению с активными окраинами континентов [Копничев, Соколова, 2013а].

По аналогии с подготовкой сильных землетрясений можно считать, что формирование кольцевых структур и близость областей их пересечения и касания к двум водохранилищам также доказывает их генетическую связь. Можно полагать, что образование колец сейсмичности и в рассматриваемых нами случаях связано с высвобождением

потенциальной энергии глубинных флюидов, благодаря подъему которых среда постепенно приближается к новому равновесному состоянию. Отметим, что в работах [Копничев, Соколова, 2013а, б] были получены данные, которые могут свидетельствовать о пропорциональности сейсмической энергии сильных неглубоких землетрясений величине выделенной в связи с этими событиями потенциальной энергии флюидов. В этом отношении существенно, что оценка магнитуды Памирского землетрясения 07.12.2015 г., полученная по формулам (2) и (3), близка к реальной величине (хотя, конечно, следует учитывать невысокую точность этой оценки).

Вместе с тем требует объяснения резкое различие уровней сейсмической активности в рассматриваемых областях. Как уже отмечалось, Памирское землетрясение 07.12.2015 г. оказалось значительно более сильным, чем все известные события, связанные с наведенной сейсмичностью. Кроме того, глубина его гипоцентра намного больше, чем у подобных землетрясений. По нашему мнению, это обусловлено следующим. Во-первых, глубина Сарезского озера (и, следовательно, дополнительное давление на его ложе) намного больше, чем у любого искусственного водохранилища. Во-вторых, одно из главных отличий Сарезского озера от большинства искусственных водохранилищ состоит в отсутствии постоянно действующего интенсивного источника вибрации при падении воды с большой высоты. Как известно, вибрация приводит к увеличению проницаемости горных пород даже в модельных экспериментах [Барабанов и др., 1987; Блехман, 1994]. Тем более этого можно ожидать на сравнительно больших глубинах в земной коре и в верхах мантии, где архимедова сила стремится выдавить флюиды к поверхности [Ogawa, Heki, 2007; Miyazawa, Brodsky, 2008]. Можно предположить, что постоянные колебания в верхней части коры, несмотря на сравнительно малые амплитуды, не позволяют существовать относительно толстому двухфазному слою со связанными порами и трещинами столь долго, чтобы этого оказалось достаточно для подготовки сильного землетрясения.

О связи Памирского землетрясения 07.12.2015 г. с Сарезским озером свидетельствует и положение сильнейших глубокофокусных событий в рассматриваемом районе (рис. 4, в). Можно полагать, что достаточно сильные землетрясения с $M = 6.0-6.3$ на глубинах 110–125 км также произошли здесь в результате охрупчивания мантийных пород при их дегидратации [Raleigh, Paterson, 1965; Yamazaki, Seno, 2003; Jung et al., 2004]. В то же время дегидратация могла быть инициирована дополнительной нагрузкой на литосферу при заполнении Сарезского озера, что также связано с процессами самоорганизации геологических систем [Летников, 1992], ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли.

Таким образом, есть большие основания считать, что Памирское землетрясение 07.12.2015 г., несмотря на очень высокую энергию и большую глубину, также относится к разряду событий, связанных с наведенной сейсмичностью. Следует также заметить, что, помимо роли Сарезского озера, существуют некоторые дополнительные эффекты, которые могли ускорить подготовку данного события. В работе [Копничев, Соколова, 2014] показано, что после Макранского землетрясения 24.09.2013 г. ($M_w = 7.7$), произошедшего в Южном Пакистане, резко активизировалась неглубокая сейсмичность в обширном регионе Центральной и Южной Азии, что связывалось с увеличением скорости смещения Индийской плиты относительно Евразии. Кроме того, 26.10.2015 г. произошло очень сильное глубокофокусное гиндукушское землетрясение ($M_w = 7.5$, $h = 231$ км). Как отмечено в [Копничев и др., 2002], после таких событий в течение 4.5 мес. нередко регистрируются сильные ($M \geq 7.0$) коровые землетрясения в регионе Центральной и Южной Азии, что также связывалось с возбуждением флюидного поля в литосфере (в данном случае после события 26.10.2015 г. прошло менее 1.5 мес.).

Еще одним косвенным подтверждением связи Памирского землетрясения 07.12.2015 г. с заполнением Сарезского озера может служить общий уровень сейсмичности в районах Центрального и Южного Памира. Согласно каталогам NEIC и [Новый..., 1977], по крайней мере с начала XIX в. до 2015 г. включительно здесь были зарегистрированы только два сильных коровых землетрясения с $M \geq 7.0$, одно из которых в 1911 г. «породило» Усойский завал, а второе – в 2015 г. произошло рядом с озером. Отсюда следует, что для большей части Памира период повторяемости событий с $M \geq 7.0$ заведомо больше 200 лет, поэтому крайне маловероятно, чтобы два землетрясения такой силы произошли в небольшой области в течение 100 с небольшим лет только в результате накопления деформации.

В области Нурека кольцевые структуры также касаются друг друга вблизи от водохранилища. В связи с этим можно предполагать, что формирование этих структур в рассматриваемых нами случаях связано в первую очередь с нагрузкой водного объема. В то же время в области Нурекского водохранилища, как и в окрестностях большинства других искусственных водохранилищ, где имеет место падение воды с большой высоты, по нашему мнению, не следует ожидать землетрясения с $M \sim 7.0$, соответствующего оценкам по формулам (4) и (5). Данные о сейсмичности в областях Нурекского и других крупных водохранилищ могут свидетельствовать о том, что постоянная вибрация способствует медленному подъему глубинных флюидов и диссипации напряжений, что обеспечивает постепенное уменьшение потенциальной энергии флюидов и препятствует подготовке достаточно сильных сейсмических событий.

Литература

- Агаханянц О.Е.* Сарез: Озеро на Памире. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 112 с.
- Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Николаев А.В.* О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду: Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений // Докл. РАН. 1987. Т. 297, № 1. С. 53–56.
- Блехман И.И.* Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
- Гармский геофизический полигон / Ред. А.Я. Сидорин. М.; Гарм: ИФЗ АН СССР, 1990. 240 с.
- Каракин А.В., Лобковский Л.И.* Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // Докл. АН СССР. 1982. Т. 268, № 2. С. 324–329.
- Киссин И.Г.* Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона // Физика Земли. 2001. № 11. С. 73–86.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в земной коре и верхах мантии в районе полигона Лобнор // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 2. С. 239–242.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Докл. РАН. 2009. Т. 429, № 1. С. 106–109.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* О корреляции характеристик сейсмичности и поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 34–51.

- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w = 9.0$) в районе Северо-Восточной Японии // Докл. РАН. 2011а. Т. 440, № 2. С. 246–249.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Неоднородности поля поглощения короткопериодных S -волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010 г., $M_w = 8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом региона // Геофизические исследования. 2011б. Т. 12, № 3. С. 22–32.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов // Геофизические исследования. 2013а. Т. 14, № 1. С. 5–15.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана // Вестн. НЯЦ РК. 2013б. Вып. 2. С. 131–139.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* О связи сильных землетрясений в районах Макрана и Центральной Азии: Возможная подготовка сильных сейсмических событий в районе Центрального Тянь-Шаня // Вестн. НЯЦ РК. 2014. Вып. 4. С. 39–45.
- Копничев Ю.Ф., Баскутас И., Соколова И.Н.* Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 49–58.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н., Соколов К.Н.* Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения S -волн в районе Невадского ядерного полигона // Физика Земли. 2013. № 6. С. 39–48.
- Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 535 с.
- Abers G., Bryan K., Roecker S., McCaffrey R.* Thrusting of the Hindu Kush over the Southeastern Tadjik basin, Afghanistan: Evidence from two large earthquakes // Tectonics. 1988. V. 7, N 1. P. 41–56.
- Gold T., Soter S.* Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure Appl. Geophys. 1984/1985. V. 122. P. 492–530.
- Jung H., Green H., Dobrzhinetskaya L.* Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change // Nature. 2004. V. 428. P. 545–549.
- Miyazawa M., Brodsky E.* Deep low-frequency tremor that correlates with passing surface waves // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. B01307. Doi: 10.1029/2006JB004890.
- Ogawa R., Heki K.* Slow postseismic recovery of geoid depression formed by Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L06313. DOI 10.1029/2007GL029340.
- Raleigh C., Paterson M.* Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3965–3985.
- Rojstacher S., Wolf S.* Permeability changes associated with large earthquake: An example from Loma Prieta, California // Geology. 1992. V. 20. P. 211–214.
- Simpson D.W., Negmatullaev S.K.* Induced seismicity at Nurek reservoir, Tadjikistan, USSR // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1981. V. 71, N 5. P. 1561–1586.
- Yamazaki T., Seno T.* Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B4. DOI 10/1029/2002JB001918.

Сведения об авторах

КОПНИЧЕВ Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk@kndc.kz

KOPNICHYEV Yuri Fedorovich – Dr. of Ph. & Math., professor, chief research scientist, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk@kndc.kz

СОКОЛОВА Инна Николаевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Республика Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. Тел.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

SOKOLOVA Inna Nikolayevna – Dr. of Ph. & Math., senior scientist, Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan. Almaty, Kazakhstan. Tel.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE AREAS OF SAREZ AND NUREK RESERVOIRS (TADJIKISTAN): LITHOSPHERE ADAPTATION TO ADDITIONAL LOADING

Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Abstract. We have been studying seismicity characteristics in the areas of Sarez lake and Nurek reservoir. Ring-shaped seismicity structures in two depth ranges (0–33 and 34–70 km) have been formed prior to the Pamir earthquake of 07.12.2015 ($M_w = 7.2$). Seismicity rings cross near Usoi dam, which had led to a formation of the Sarez lake since 1911, and epicenter of the Pamir earthquake. Besides, three of four strongest events ($M \geq 6.0$), recorded in the Pamir region at depths of more than 70 km since 1950, occurred near the Sarez lake. A totality of data obtained allows us to conclude that the Pamir earthquake, despite of very big energy, relates to events connected with induced seismicity. Ring-shaped seismicity structures in two depth ranges have been formed also in the Nurek reservoir area. It is supposed that ring structures formation is connected with processes of geological system self-organization, which result in deep-seated fluids ascending. For this reason lithosphere is adapting gradually to the additional loading, connected with reservoir filling. A distinction of the Nurek dam (and also many other hydro-electric power stations) from the Usoi dam consists in permanent vibration due to water fall from big height (more than 200 m). Such an effect can lead to gradual stress dissipation, for this reason events much weaker than the Pamir earthquake of 07.12.2015 occur in the areas of artificial reservoirs.

Keywords: Sarez lake, Nurek reservoir, induced seismicity, ring-shaped structures, deep-seated fluids.