

УДК 550.34; 531/534; 627.8

Фролова А.Г.

*Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан*

## О ВЛИЯНИИ ТОКТОГУЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ВБЛИЗИ ПЛОТИНЫ

**Аннотация.** Приведены результаты исследований наведённой сейсмичности в районе Токтогульской ГЭС при заполнении водохранилища, в первые годы эксплуатации гидроузла и в настоящее время.

**Ключевые слова:** плотина, землетрясения, уровень воды в водохранилище.

## ТОКТОГУЛ СУУ САКТАГЫЧЫНЫН ПЛОТИНАГА ЖАКЫН ЖДЕРИНДЕГИ СЕЙСМИКАЛУУЛУККА ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ ТУУРАЛУУ

**Кыскача мазмуну.** Токтогул ГЭСинин районундагы суу сактагычты толтуруу учурундагы, гидротүйүндү эксплуатациялоонун алгачкы жылдарындагы жана азыркы кездеги келтирилген сейсмикалуулукту изилдөөнүн жыйынтыктары келтирилген.

**Негизги сөздөр:** плотина, жер титирөөлөр, суу сактагычтагы суунун деңгээли.

## ON THE INFLUENCE OF THE TOKTOGUL RESERVOIR ON SEISMICITY NEAR THE DAM

**Abstract.** Results of investigations of the induced seismicity around the Toktogul hydroelectric power station during filling of a reservoir, in the first years of operation of the water-engineering system and now are given.

**Keywords:** dam, earthquakes, water level in the reservoir.

*Немного о проблеме наведённой сейсмичности.* О проявлении и причинах возбуждённой сейсмичности не утихают споры исследователей. Мнения учёных разделились: провоцирует водохранилище сильные землетрясения или, наоборот, разряжает земную кору серией слабых? Как показал опыт Токтогульской ГЭС, во время заполнения водохранилища увеличилось количество слабых местных толчков и все они происходили на небольшой глубине в пределах первых 5-и км [1]. Казалось бы, множество слабых землетрясений способно освободить столько же энергии, сколько одно сильное. Тем не менее, известны случаи возникновения разрушительных землетрясений вблизи плотин. Классическим примером проявления наведённой сейсмичности явилось катастрофическое по своим последствиям землетрясение вблизи плотины Койна в Индии в 1967 году.

В монографии индийских учёных Х. Гупта, Б.Растоги [2] выполнено обобщение мировых материалов по возбуждённой сейсмичности. Авторы поднимают вопросы о том, какие факторы определяют особенности проявления возбуждённой сейсмичности, либо проявления её слабыми толчками или сильным землетрясением. Главная роль в этом принадлежит наличию *особых геологических условий района* наблюдений, поэтому строительство плотин и водохранилищ не всегда вызывает землетрясения. Массив пород, на котором «лежит» будущее водохранилище, должен накопить большие напряжения, готовые выделиться при его заполнении. «Деформируемость и прочность пород, расположение разломов определяют местоположение очагов землетрясений, вероятность, размеры и механизм образования

новых разрывов по ослабленным зонам в массиве» [2]. Большое значение авторы монографии уделяют поро-трещинной проницаемости пород и зон разломов, роли порового давления. Основная причина возбужденной сейсмичности связана с возросшим порово-трещинным давлением, вызывающем снижение прочности массивов пород по зонам ослабления (трещинам, разломам). Избыточное порово-трещинное давление распространяется медленно, и этот факт может объяснить запаздывание на несколько лет активизации сейсмичности для некоторых водохранилищ относительно изменения уровня воды. Авторы отмечают также, что проявлению возбужденной сейсмичности может способствовать неравномерность распределения по площади нагрузки, обусловленной весом воды. И в качестве такого примера приводят Токтогульское водохранилище, состоящее из двух частей (каньонной и озеровидной), разделенной глубинным разломом на две части с разными объемами воды (1 и 18 км<sup>2</sup>).

В работе [3] отмечается, что по статистике из невысоких плотин - от 10 до 100 м только 10% проявлялись наведенными землетрясениями. С увеличением высоты вероятность инициирования наведенных землетрясений растёт. Важная характеристика наведенного сильного землетрясения в том, что оно происходит некоторое время спустя: через 5-10 лет после заполнения. Например, для плотины Койна прошло 5 лет от начала заполнения водохранилища до возникновения сильного землетрясения вблизи неё. Однако влияние на слабую сейсмичность происходит сразу же во время заполнения.

Относительно природы наведенной сейсмичности существуют два предположения. Первое – нагрузка водохранилища за счёт дополнительной массы воды, вызывающей дополнительные напряжения. Второе связано с проницаемостью воды через трещины вглубь земной коры, что приводит к уменьшению трения на плоскостях скольжения и, как следствие, увеличению числа сейсмических подвижек. В пользу второго свидетельствует факт, что инициирование сейсмичности зависит от высоты плотины и столба воды больше, чем от объёма самого водохранилища. Возможно, работают оба механизма, но в разной степени [4].

*О возбужденной сейсмичности вблизи Токтогульского водохранилища.* Токтогульская ГЭС расположена в районе высокой сейсмической активности. К северо-востоку и северо-западу от плотины проходит полоса эпицентров сильнейших землетрясений Тянь-Шаня – это 10-ти балльные Чиликское 1889 г., Кебинское 1911 г. и 9-ти балльные Чаткальское 1946 г. и Суусамырское 1992 г. землетрясения. Другая полоса землетрясений находится к югу от гидроузла. Самое сильное из них 8-и балльное Кочкор-Атинское землетрясение произошло в мае 1992 г. На основании исследований палеосейсмодислокаций и современной сейсмичности Токтогульский район отнесён к девятибалльной зоне возможных землетрясений [5].

Заполнение водохранилища началось в 1974 году. Детальное изучение сейсмичности в этот период времени проводилось сетью станций, принадлежащих Комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ АН СССР и отделу сейсмологии, а позднее – созданному на его основе Институту сейсмологии АН Киргизской ССР. Результаты анализа влияния заполнения водохранилища на сейсмичность вблизи него за период с 1973 по 1986 приведены в работе [6]. В этой работе рассмотрена сейсмичность двух участков Токтогульского района. Первый участок имеет форму прямоугольника с вершинами в точках 41°32' -72°29', 41°50' -72°29', 41°50' -72°51', 41°32' -72°51' и площадь 1100 км<sup>2</sup>. Второй участок – створ плотины также имеет прямоугольную форму с вершинами в точках 41°35'-72°35.2', 41°42.5' -72°35.2', 41°42.5' -72°41.5', 41°35' -72°41.5' и площадь 100 км<sup>2</sup> (рис.1).

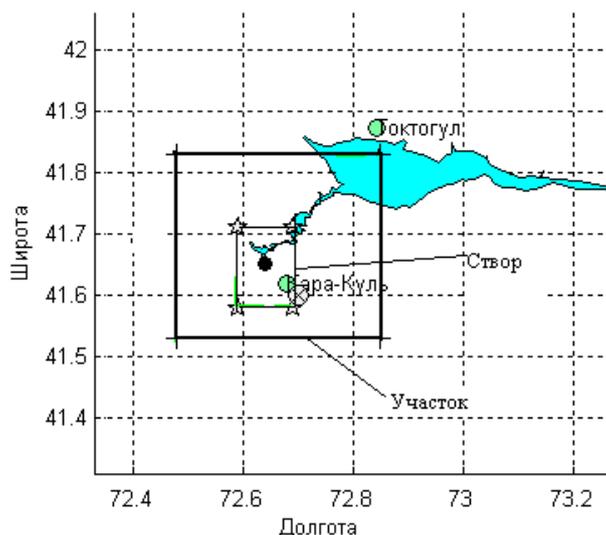


Рис.1. Участки детальных сейсмологических наблюдений в районе Токтогульской ГЭС за период с 1973 по 1986 годы.

На Токтогульском участке одновременно с увеличением уровня воды наблюдалось незначительное, близкое к фоновому, усиление сейсмичности вплоть до декабря 1977 г. (рис.2). Первый всплеск наведённой сейсмичности произошел в январе 1978 г., когда уровень воды в водохранилище достиг отметки 110 м относительно русла реки (абсолютная отметка 830 м.). Максимальное количество землетрясений в районе наблюдений произошло в июле 1979 г., когда уровень воды приблизился к отметке 920 м, при этом большая часть землетрясений происходила в створе плотины. Высокий уровень сейсмичности наблюдался до января 1980 г. и далее резко пошел на спад, хотя уровень воды держался на максимальных отметках вплоть до середины 1982 г. К декабрю 1986 г. сейсмичность в створе плотины уменьшилась до фоновых значений. Сейсмичность Токтогульского участка за период наблюдений с 1980 по 1987 годы при среднем падении значительно превосходила сейсмичность створа, т.е. «заработал» механизм, связанный с проницаемостью воды и ролью порового давления, которое распространяется с небольшой скоростью.

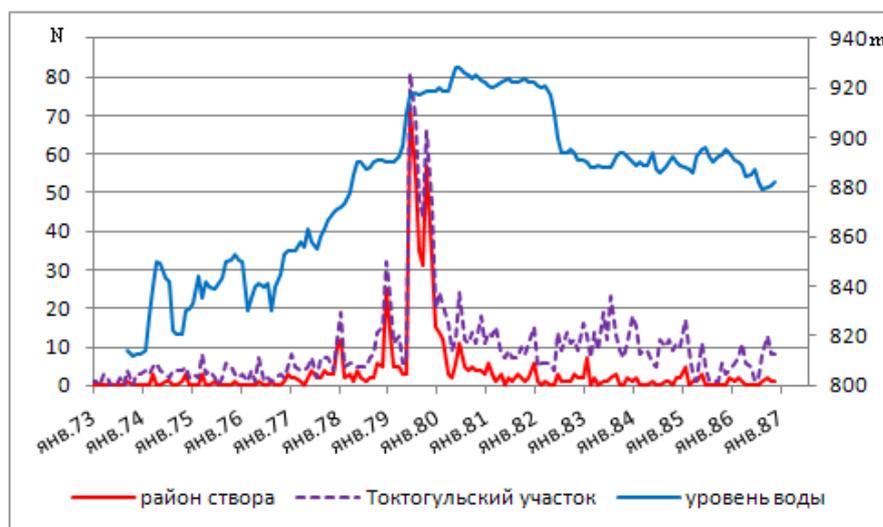


Рис. 2. Графики изменения ежемесячного количества землетрясений, зарегистрированных на Токтогульском участке и в районе створа плотины за период с 1973 по 1986 год [6].

Однако к полученным в то время результатам по наведённой сейсмичности надо сделать серьёзную поправку. В период с 1978 по 1985 на Токтогуле проводились локальные наблюдения американскими сейсмологами, которые в районе створа установили высокочувствительные сейсмометры. На рис. 3 видно, что именно в этот период регистрировались слабые толчки вплоть до энергетического класса  $K=1.5$ .

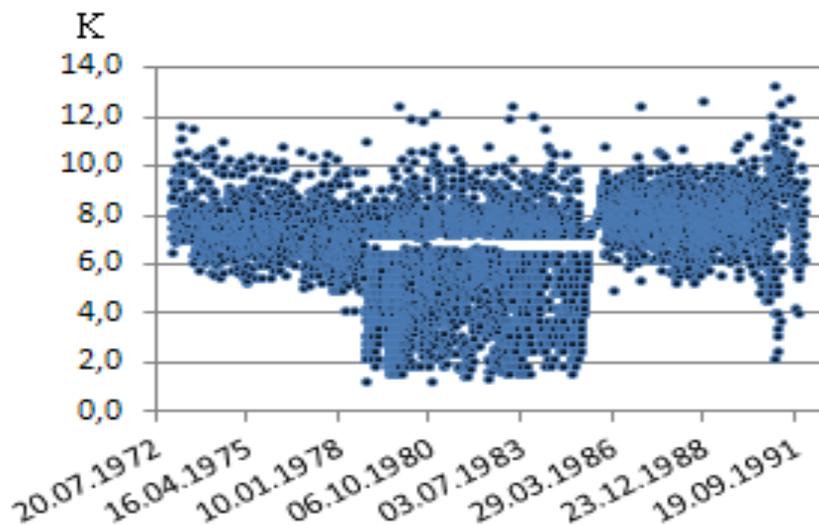


Рис.3. Сейсмичность Токтогульского участка за период с 1973 по 1991 гг.

Возможно, очень слабые землетрясения происходили как до заполнения водохранилища, так и в настоящее время, но энергетически они ниже чувствительности нашей сети наблюдений. Более корректно можно подойти к вопросу о наведённой сейсмичности, если учесть энергетическую представительность этого района. Сейсмическая станция Нарын работает с 1950 года. Можно утверждать, что уже с 50-х годов район исследований имеет представительный энергетический класс  $K=8.0$ . Для дальнейшего анализа наведённой сейсмичности мы убрали из каталога землетрясений Токтогульского района все слабые события с  $K < 8.0$  и получили другой график зависимости проявления сейсмичности от уровня воды в водохранилище (рис.4).

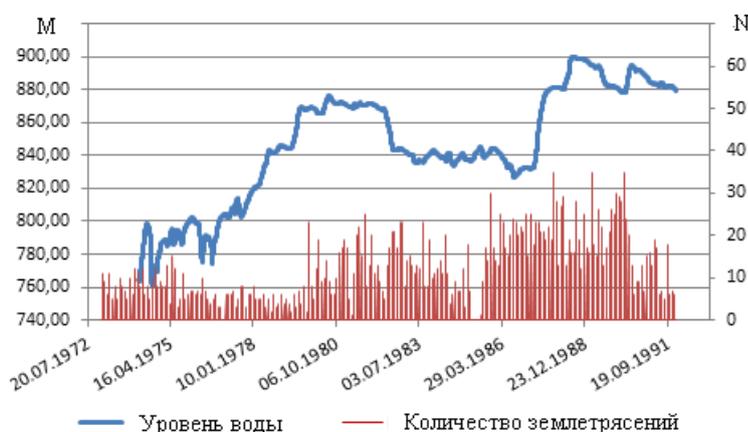


Рис.4. Уровень воды и проявление сейсмичности (с  $K \geq 8.0$ ) за период с 1973 по 1991 гг.

На начальном участке графика показана сейсмичность в 1973 году – до заполнения водохранилища. За период с октября 1975 по август 1979 года, несмотря на

подъём воды, количество землетрясений уменьшилось по сравнению с фоном. Возможно, тогда, действительно, наблюдалась разрядка напряжений очень слабыми толчками, которые не могла зарегистрировать наша сеть, но с середины 1978 года фиксировала высокочувствительная американская аппаратура. С конца 1980 года, когда уровень воды подходил к относительной отметке 870 м, фоновый уровень увеличился вдвое. Далее, с увеличением уровня воды, сейсмичность с определёнными колебаниями увеличивалась. За рассмотренный временной период уровень воды достиг максимальной отметки в 894 м в конце июля 1988 года, когда фоновый уровень сейсмичности увеличился втрое. Таким образом, при заполнении Токтогульского водохранилища довольно чётко наблюдалось проявление наведённой сейсмичности, которое продолжалось в течение многих лет.

В работе [7] был выполнен анализ сейсмичности территории Токтогульского водохранилища в разные временные периоды: до строительства (1961-1973), во время заполнения (1974-1980) и непрерывной эксплуатации (1980-2006 г). Авторы отметили проявление наведённой сейсмичности в период заполнения водохранилища с 1974 по 1980 гг. В последующие годы чёткая связь между уровнем воды и числом землетрясений не обнаружена.

Мы продолжили эти исследования за временной период с середины 2005 г., когда непосредственно на плотине появились первые записи землетрясений, по настоящее время [8]. Уровень воды в водохранилище при ежегодных сезонных колебаниях с максимумами в сентябре и минимумами в апреле неуклонно пошел на спад с сентября 2005 г. (отметка 897.86 м) и достиг минимальных значений в апреле 2009 г. (842.50 м). Далее водохранилище постепенно начало наполняться – в сентябре 2010 г. уровень воды достиг отметки 900.24 м, держался на высоких отметках до октября 2011 г. и снова пошёл на спад (рис. 5).

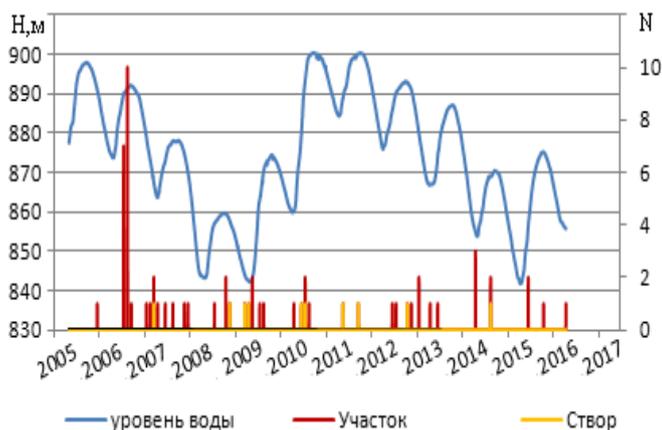


Рис. 5. Графики изменения уровня воды в водохранилище и ежемесячного количества землетрясений N, зарегистрированных на Токтогульском участке и в районе створа плотины с мая 2005 г. по февраль 2016 г.

Серия местных землетрясений в июле-августе 2006 г., на Токтогульском участке (18 толчков с двумя достаточно сильными с  $K=11.6$ ) произошла в период, когда уровень воды с максимальных отметок пошёл на спад. Возможно, уровень воды послужил спусковым механизмом разрядки напряжений, но в последующие годы явного проявления наведённой сейсмичности на Токтогульском участке и в створе плотины не замечено – наблюдается фоновая сейсмичность в сейсмоактивном районе. Возможно, микроземлетрясения и происходят вблизи плотины, но из-за шума гидроагрегатов не фиксируются толчки ниже 4-го энергетического класса.

На рис. 6 показано изменение уровня воды в водохранилище и энергетические классы  $K$  землетрясений, зарегистрированных системой наблюдений на Токтогульском участке и в створе плотин с 2005 по 2016 гг.

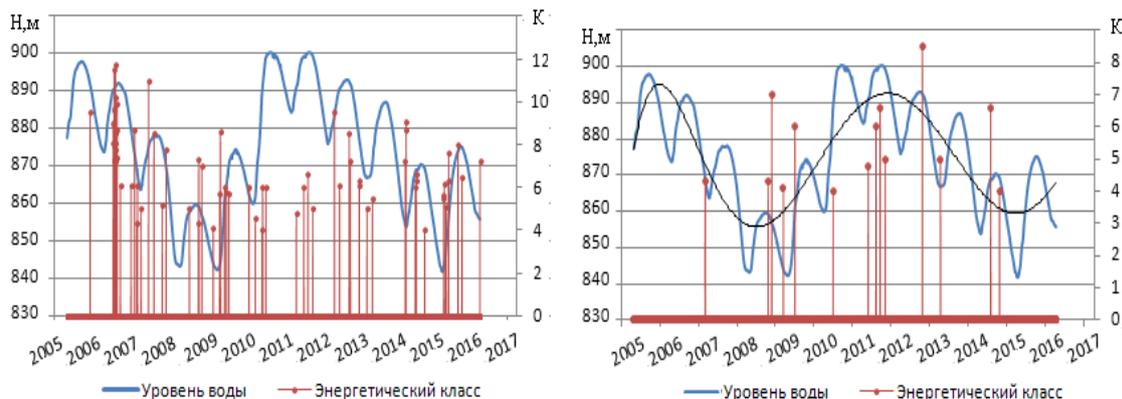


Рис. 6. Изменение уровня воды и энергетические классы  $K$  землетрясений, зарегистрированных на Токтогульском участке (слева) и в створе плотин (справа).

Судя по рисункам, землетрясения происходят определёнными группами, разделёнными периодами затишья. Сложно выделить какую-либо связь между возникновением событий и резким изменением уровня воды. Начиная с 2008 года, в районе Токтогульского гидроузла и в зоне возможного влияния водохранилища не произошло ни одного землетрясения выше 9-го энергетического класса. Возможно, проявляется положительная роль водохранилища в предотвращении сильного землетрясения: слабыми толчками происходит разрядка тектонических напряжений в земной коре.

### Литература

1. Simpson D.W. and Negmatullaev S.Kh. Induced seismicity studies in Soviet central Asia, *Earth. Inf. Bull.*, 10, pp. 208-213, 1978.
2. Х. Гупта, Б. Растоги. Плотины и землетрясения. Изд-во «Мир», 1979, 248 с.
3. Мирзоев К.М., Николаев А.Б., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведённая сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // *Физика Земли*, 2009, №10, с. 49-68.
4. Нерсесов И.Л., Ильясов Б.И., Павлов В.Д., Преображенский В.Б., Рузайкин А.И. Изменение сейсмичности Токтогульского гидроузла в связи с эксплуатацией водохранилища // *Изв. АН Кирг. ССР. Физ.-техн. и мат. науки*. 1988. № 4. С.64-70.
5. Абдрахматов К.Е., Джанузаков К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики. Бишкек. 2012. 51 с.
6. Методика оценки сейсмической опасности гидротехнических сооружений. М.: Наука. 1990. 136 с.
7. Камчибеков М.П., Егембердиева К.А. Сейсмичность территории Токтогульского водохранилища за 1961—2006 гг. // *Гидротехническое строительство*, 2007, №7.
8. Довгань В.И., Фролова А.Г. Сейсмометрические наблюдения на Токтогульской ГЭС. // *Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы. Сборник материалов Четвёртого международного симпозиума*. Бишкек, 15-20 июня 2008 г., с. 270-275.

Рецензент: д. ф.-м. н. Погребной В.Н.