УДК: 550.34.013.2
DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20802

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В РАЙОНЕ СУЛАКСКОГО КАСКАДА ГЭС

© 2016 И.А. Алиев, к.ф.-м.н., В.И. Черкашин, д.г.-м.н., М.А. Мусаев

Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия,
367030, г. Махачкала, ул. М. Ярагского 75, e-mail: dangeo@mail.ru

Проведенное детальное исследование сейсмичности территории Дагестана за последние 50 лет показало концентрацию максимальной сейсмической активности в районе Сулакского каскада ГЭС, которая наблюдается в период заполнения водохранилищ каждой крупной ГЭС. Показано на примере Ирганайской ГЭС, что дополнительное увеличение (в сравнении с периодом относительного тектонического равновесия) динамической нагрузки инициирует всплеск сейсмической активности в этом районе, изменяет характер распределения гипоцентров. После всплеска сейсмической активности наступает период относительного сейсмического затишья этого района, другими словами инициированная сейсмичность приводит к временному уменьшению общей местной сейсмичности.

Ключевые слова: сейсмическая активность, каскады ГЭС, тектоническое равновесие, динамическая нагрузка, инициированная сейсмичность, распределение гипоцентров.

Введение

Детальное исследование сейсмичности территории Дагестана за последние 50 лет показывает концентрацию максимальной сейсмической активности в районе Сулакского каскада гидроэлектростанций (ГЭС). С начала заполнения и ввода в эксплуатацию Чиркейской ГЭС, самой крупной на Сулакском каскаде, прошло 40 лет – период, совпадающий с общим увеличением сейсмичности этого района. Каждая крупная ГЭС Сулакского каскада вносила свою лепту в увеличение сейсмичности района, инициировало ее, после начала заполнения их водохранилищ и дальнейшей эксплуатации. На рис. 1 представлены сейсмические события с $M > 2$ происшедшие на территории Дагестана и некоторой части прилегающих территорий (в координатах: от 41° до 45° СШ, и от 45° до 49° ВД). Как видно из рисунка в периоды ввода в эксплуатацию ГЭС (табл. 1) происходили значительные (Чиркейская в 1974 г., Ирганайская в 1999 г.) и локальные (Миатлинская в 1986 г., Гунибская в 2005 г.) увеличения сейсмической активности. Аналогичное увеличение сейсмической активности наблюдалось в момент заполнения водохранилищ Нурекской, Токтогульской и Чарвакской ГЭС.

Согласно [Адушкин, Турунтаев, 2005] вероятность проявления наведенной сейсмичности возрастает с увеличением высоты плотины. Так, для плотин высотой более 10 метров наведенную сейсмичность вызывали только 0,63% из них, плотин высотой более 90 метров – 10%, а для плотин высотой более 140 метров – уже 21%. По всей вероятности, накопление огромной массы воды приводит к изменению гидростатического давления в породах, снижению сил трения на контактах земных блоков. Крупные водохранилища могут вызывать не только слабые, но даже сильные «наведенные» землетрясения. Поскольку высоты плотин Чиркейской и Ирганайской превышают 100 м, а высоты Миатлинской, Гоцатлинской, Гунибской и

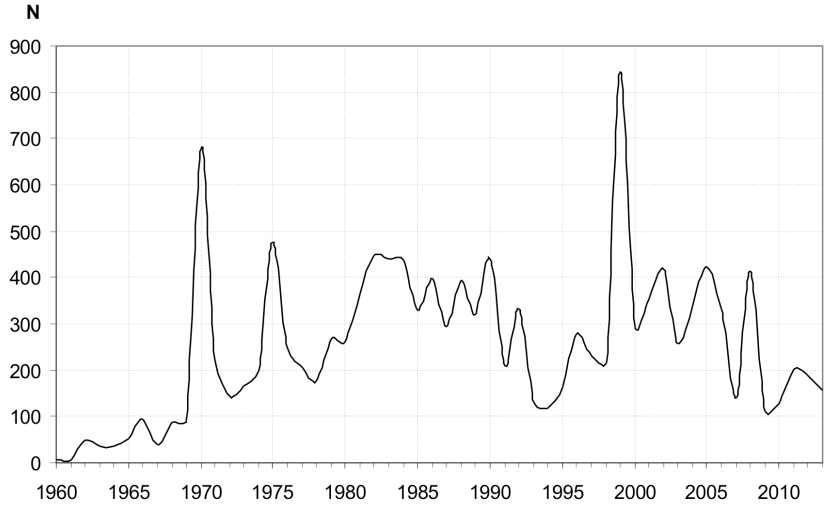

Рис. 1. Сейсмические события в Дагестане в 1960–2013 гг. (M>2).

Гергебильской плотин близки к 90 м и как следствие представляют научный и практический интерес для изучения процесса механизма техногенных землетрясений в районе Сулакского каскада ГЭС.

Таблица 1.

Плотины Сулакского каскада ГЭС

ГЭС	Высота Плотины м.	Объем полный млн.куб.м.	Объем полезный млн.куб.м.	Ввод в эксплуатацию год
Чиркейская	232,5	2780	1320	1974
Ирганайская	111	705	397	1998
Миатлинская	86,5	47	22	1986
Гунибская	73	10,6	0,89	2005
Гергебильская	70	0,1	*	1940
Гоцатлинская	68	48	*	строится
Чирюртовская	37,5	*	*	1961

Район Сулакского каскада ГЭС

Река Сулак располагается на северо-восточном уступе Кавказского горного сооружения в зоне Сулакского меридиального выступа, который является северо-западным окончанием Дагестанского клина, орографически представляющего собой интенсивно поднятый участок до 2700 м над уровнем моря, контрастно сочленяющийся с Терско-Сулакской низменностью. Она разделяет Гимринскую и Салатаускую антиклинали, образующие в рельефе одноименные хребты с высотными отметками от 2000 до 3000 м и протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами, где обнажаются пласты мезозойских известняков, глин и песчаников.

Всего в бассейне реки Сулак намечается строительство 20 ГЭС, с учетом уже построенных, с суммарной мощностью 4691 МВт. Самой крупной из функционирующих гидроэлектростанций Сулакского каскада является Чиркейская. Плотина ГЭС с высотой 232,5 м преграждает путь Сулаку в Чиркейском ущелье, в зоне развития

верхнемеловых известняков и образует водохранилище с объемом 2,8 км^3. Сезонные колебания уровня воды в водохранилище достигают 35–40 м. По результатам геологических, геоморфологических, тектонических и тектонофизических исследований автор [Николаев, 1977] относит район Чиркейской ГЭС к потенциально сейсмичным участкам земной коры. В табл. 1 приведены данные о плотинах Сулакского каскада ГЭС. Из них Миатлинская и Чирюртовская, также как и Чиркейская ГЭС, расположены в зоне максимальной сейсмической активности. Районы строительства гидроэлектростанций (Чиркейская и Миатлинская) отличаются сложным геологическим строением. Гидроузлы располагаются на висячих крыльях взбросов глубинного типа, испытывающих интенсивные новейшие тектонические движения. Вследствие этого большинство створов высоконапорных плотин в сейсмических районах оказываются привязанными к наиболее тектонически-неоднородным и потенциально сейсмичным участкам земной коры. Сложные геологические условия и расчлененный рельеф не останавливают, а наоборот привлекают проектировщиков ГЭС с точки зрения экономичности строительства подобных гидроэлектростанций. Несмотря на вышесказанное, в 1963 г. было начато строительство самой крупной ГЭС Сулакского каскада – Чиркейской. В мае 1970 г. в районе строительства произошло одно из самых сильных землетрясений Кавказа с магнитудой M = 6,6 с большим количеством афтершоков. Эпицентр главного толчка находился в 20–25 км от плотины, вследствие чего в массиве горных пород и в бортах плотины образовались трещины, которые впоследствии зацементировали и скрепили анкерами. В период заполнения водохранилища, когда уровень достиг 100 м относительно нижнего бьефа плотины, в этом районе резко увеличилось количество слабых толчков. А через некоторое время, друг за другом, в разных частях окрестности водохранилища произошли ощутимые и сильные землетрясения с магнитудой M = 5,0–5,2 с интенсивностью сотрясания I = 7 баллов и выше по шкале MSK – 64, которые вызвали повреждения строений в близлежащих населенных пунктах, а гипоцентры мигрировали вниз от 3 до 16 км. По утверждению [Николаев, 1977; Rothe, 1969] одна из основных причин возникновения «плотинных» землетрясений является наличие зон разломов, способствующих проникновению воды вглубь земной коры.

Интерес к проблеме сейсмичности в районах крупных водохранилищ, а также механизмам их возникновения все еще велик, что подтверждается публикациями, вышедшими в последние годы [Нигматулаев и др., 2013; Мирзоев и др., 2009; Смирнов и др. 2013; Идармачев и др., 2012]. Наряду с этим, немаловажное значение имеет место управление процессом разрядки тектонических напряжений, искусственное инициирование роста слабой и умеренной сейсмичности, ускорение процесса подготовки сильного землетрясения и как следствие – уменьшение его магнитуды [Николаев, 1994, 1999], что крайне необходимо в районах эксплуатации крупных ГЭС.

Анализ данных и обсуждение результатов

Для анализа вариаций сейсмичности использовались каталоги землетрясений ГС РАН [Общий каталог землетрясений…, 2007; www.ceme.gsras.ru]. Было подсчитано число землетрясений с M > 2 в радиусе 50 км от центра Чиркейского водохранилища за период 1990–2013 гг. На рис. 2 показаны графики количества землетрясений за исследуемый период: кривая 1 – в радиусе 50 км от центра Чиркейского водохранилища, кривая 2 – для остальной территории Дагестана. На рисунке виден

всплеск сейсмической активности в 1999 г. Максимальное число землетрясений в 1999 г. по кривой 2 не превышает 160, в то время как число землетрясений по кривой 1 достигает 690. В другие периоды количество землетрясений на сравниваемых территориях незначительно отличаются друг от друга. Анализ данных показывает, что максимальное количество сейсмических событий приходится на период заполнения Ирганайского водохранилища, которое началось в июле 1997 г., а эксплуатация станции в 1998 г. Такое совпадение позволяет предположить, что заполнение водохранилища привело к увеличению сейсмичности в этом районе.

Теперь рассмотрим распределение гипоцентров 3033 землетрясений за 1990–2013 гг. из рассматриваемой (радиусом R = 50 км) области. Разделим их на группы: первая группа – землетрясения с гипоцентрами менее 15 км, и вторая группа – землетрясения с гипоцентрами более 15 км. Максимальное количество гипоцентров сосредоточено в пределах глубин 10 $\pm$ 5 км. Подсчет количества сейсмических событий показал, что в первой группе произошло 2138 событий, во второй – 895 событий. Можно предположить, что землетрясения, относящиеся к первой группе, подвержены проникновению воды в разломную часть земной коры, а вторая группа событий, где сложно представить проникновение воды в эти горизонты, под воздействием динамической нагрузки при эксплуатации водохранилищ в районе Сулакского каскада ГЭС. На рис. 3 показаны графики распределения количества землетрясений кривая 1 и кривая 2 до 15 км и более, соответственно. Как видно из рисунка, происходит увеличение числа землетрясений для периода времени 1999 г., причем число землетрясений с гипоцентрами более 15 км растет более интенсивно, чем для гипоцентров менее 15 км, что по всей вероятности связано с возрастающей динамической нагрузкой в районе заполнения водохранилища. На графике также видно почти синхронное повышение количества землетрясений в отдельные годы – 1992, 1996, 2002 и 2005 гг., но в значительно меньшем количестве. И число землетрясений с гипоцентрами более 15 км всегда меньше, чем до 15 км, что является

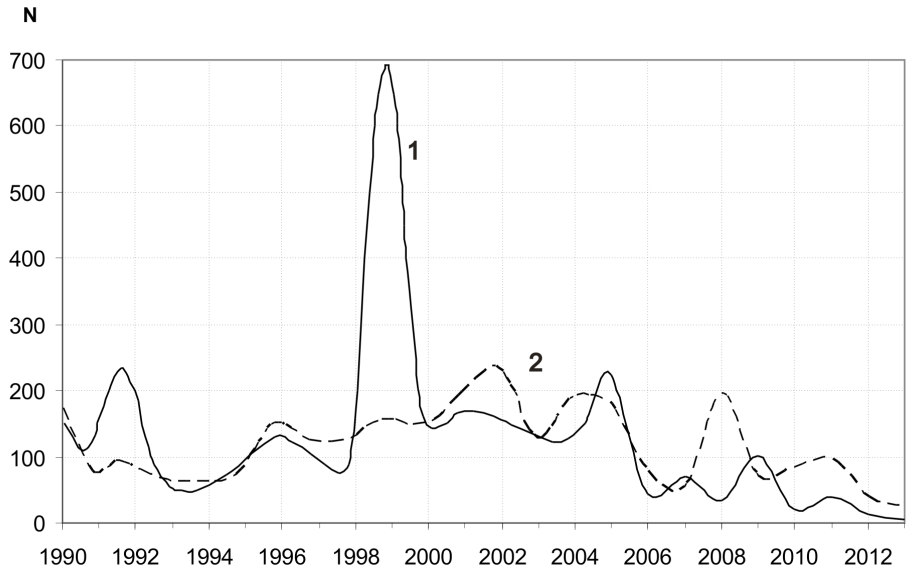

Рис. 2. Изменение сейсмической активности в 1990–2013 гг.: 1 – в районе Чиркейского водохранилища (область радиусом R = 50 км), 2 – на остальной территории Дагестана

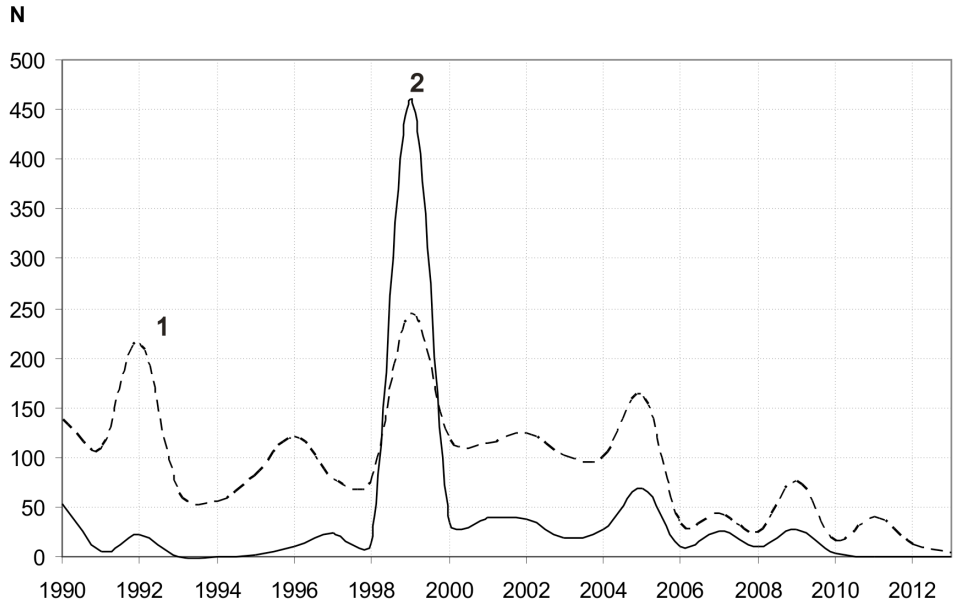

Рис. 3. Изменение сейсмической активности в районе Сулакского каскада ГЭС: 1 – с гипоцентрами до 15 км, 2 – с гипоцентрами более 15 км

доказательством верности нашего предположения о роли, возрастающей динамической нагрузки в увеличение сейсмичности в 1999 г. в рассматриваемой области.

На рис. 4 представлена структурно-тектоническая схема части Сулакского каскада ГЭС [Ирганайский гидроузел…, 1980]. Под Ирганайской котловиной проходит разлом фундамента, простирающийся вдоль русла реки Аварское Койсу. По всей вероятности существенное повышение сейсмичности в районе Сулакского каскада связано также и с проникновением воды из Ирганайского водохранилища до приведенного на рисунке разлома.

Итак, суммируя вышесказанное, можно предположить: заполнение Ирганайского водохранилища вызвало возмущение равновесного состояния земной коры в этом районе, что привело к всплеску сейсмической активности.

Для еще большей наглядности приведем распределение гипоцентров по слоям шагом в 5 км, как это сделали авторы [Левкович, Асманов, 1985], которые в своей работе для выделения сейсмофокальной области (СФО) «Дагестанский клин» использовали 1144 землетрясения за период 1970–1983 гг., происшедших в рассматриваемой нами области. На рис. 5 представлено распределение гипоцентров землетрясений за 1970–2013 гг. Кривая 1 построена по данным [Левкович, Асманов, 1985] за 1970–1983 гг. Кривая 2 по данным [Общий каталог землетрясений…, 2007] за 1990–1997 гг., в период до начала заполнения Ирганайского водохранилища. Кривая 3 построена по данным [Общий каталог землетрясений…., 2007] за 1998–2005 гг., после начала заполнения и эксплуатации Ирганайского водохранилища и кривая 4 по данным [www.ceme.gsras.ru] за 2006–2013 гг. Как видно из рисунка, кривые 1, 2 и 4 по форме кривой практически повторяют друг друга, коэффициент корреляции между рядами данных k порядка 0,9. Начала отсчета кривых 1 и 2 разделяет 20 лет, 1 и 4 более 30 лет, в тоже время распределение гипоцентров за разные промежутки времени, разные года – повторяются. Этому есть одно объяснение – из-

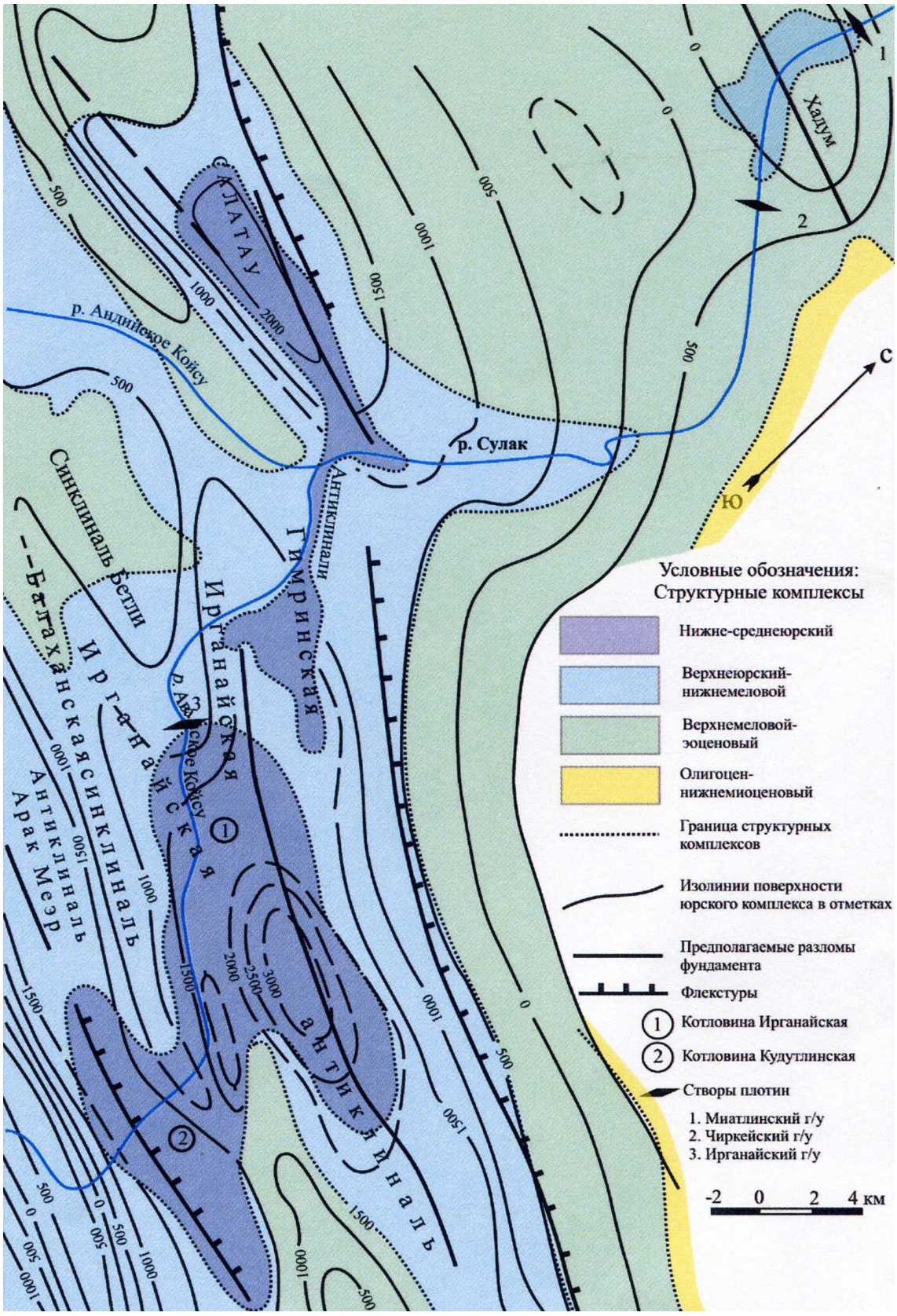

Рис. 4. Структурно – тектоническая схема части Сулакского каскада ГЭС

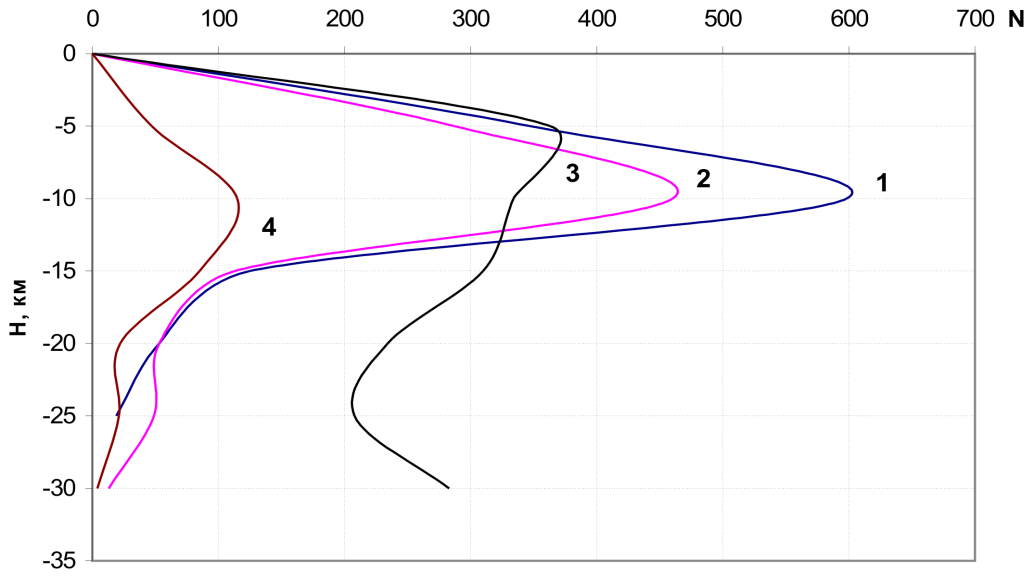

Рис.5. Распределение гипоцентров землетрясений за 1970–2013 гг.:
1 – по данным за 1970–1987 гг. [Левкович, Асманов, 1985], 2 – по данным за 1990–1997 гг.,
3 – по данным за 1998–2005 гг., 4 – по данным за 2006–2013 гг.

менение динамической нагрузки под ложем водохранилища приводит к раскрытию трещин и проникновению воды во все более новые горизонты по трещинам и разломам. Данный процесс сопровождается повышением сейсмической активности. Причем процесс идет, из года в год, по одним и тем же трещинам и разломам, что доказывается высокой корреляцией рядов данных кривых 1, 2 и 4. Это позволяет нам заключить, что регулярные изменения динамической нагрузки, т. е. сезонные изменения уровня водохранилища в результате его эксплуатации приводят к увеличению местной сейсмической активности. Коэффициент корреляции кривой 3 с кривыми 1, 2 и 4 $k \leq 0{,}6$, т. е. значительно меньше, чем между первыми рассмотренными, это говорит о том, что процесс имеет иной характер. Практически распределение гипоцентров равномерно по слоям от 5 до 30 км. Объяснение этого явления следующее: мы считаем, что в результате значительного изменения тектонического напряжения в рассматриваемой области, связанного с началом заполнения водохранилища, произошли процессы быстрого выравнивания этих напряжений вертикально по слоям, уже по другим трещинам и разломам, с повышением сейсмической активности. Дополнительное увеличение (в сравнении с периодом относительного тектонического равновесия 1990–1998 гг.) динамической нагрузки инициировало всплеск сейсмической активности в этом районе.

Анализ вариаций сейсмичности в Дагестане в 1960-2013 гг. показал, что с конца 60-х годов наблюдается общее увеличение сейсмичности рассматриваемого района (рис. 1), как указывали выше, со значительными и локальными максимумами в периоды ввода ГЭС в эксплуатацию. После периодов увеличения сейсмичности всегда следуют периоды сейсмического затишья. В период общепланетарного роста сейсмичности с $M > 4$ в 1990–1996 гг. по данным USGS [www.usgs.gov/neic/, 1973–2008], в рассматриваемом районе отмечается значительное снижение сейсмичности, и, наоборот, в период всплеска сейсмичности Сулакского каскада 1999 г.

в остальной части планеты существенное снижение сейсмической активности. Все это позволяет заключить, что вариации сейсмической активности в рассматриваемом районе имеют локальные причины, и наиболее вероятно, что это техногенные причины.

Выводы

1. Всплеск сейсмической активности в районе Сулакского каскада ГЭС в 1999 году имеет техногенные причины.

2. Заполнение Ирганайского водохранилища привело к нарушению равновесного состояния района расположения Чиркейского, Миатлинского, Чирюртовского водохранилищ. Разрядка тектонических напряжений в течение периода 1999–2005 гг. привела к резкому снижению сейсмической активности в последующие 2006–2013 гг.

Литература

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 252 с.

2. Идармачев Ш.Г. и др. Возбужденная сейсмичность в районе Чиркейского водохранилища и ее проявление в геофизических полях. // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2012. Выпуск №59. 105 с.

3. Ирганайский гидроузел на р. Аварское Койсу, Технический проект, Т II, Природные условия, Книга 3, Инженерно-геологические условия, №1292-4Т. Ленинград. 1980. 350 с.

4. Левкович Р.А., Асманов О.А. Сейсмофокальная область «Дагестанский клин»/ Сейсмичность и сейсмотектоника Восточного Предкавказья. / Труды ИГ Вып. 33. 1985. С.5–18.

5. Мирзоев К.М. и др. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. №10. С.49–68.

6. Нигматулаев С.Х., Улубиева Т.Р., Маматкулова З.С. Система сейсмического мониторинга для будущего Рангушского гидроузла и необходимые мероприятия для ее организации. // Современные методы интерпретации сейсмологических данных. Материалы 8 международной сейсмической школы. Геленджик. 15–21 сентября 2013 г. С. 219–225.

7. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности // Сб. Проблемы наведенной сейсмичности. М.: Наука, 1994. С.5–15.

8. Николаев А.В. О возможности искусственной разрядки тектонических напряжений с помощью сейсмических и электрических воздействий // Двойные технологии. 1999. №2. С.6–10.

9. Николаев Н.И. О состоянии изучения проблемы возбужденных землетрясений, связанных с инженерной деятельностью. Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М.: Наука, 1977. С. 8–21.

10. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана до 2005 года. Махачкала: Эпоха, 2007. 394 с.

11. Смирнов В.Б., Chadra R.K., Пономарев А.В., Srinagesh D. Прогностические аномалии наведенной сейсмичности в области водохранилища Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2013. №2. С.94–109.

12. Rothe J.P. Earthquakes Reservoir Loadings. 4 th. World Conf. on Earthquake Engineering Santiago. 1969, Preprints, a – 1, P. 28–38.
13. www.ceme.gsras.ru
14. www.usgs.gov/neic/

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20802

ANALYSIS OF SEISMIC ACTIVITY IN THE AREA OF THE SULAK CASCADE HPP

© 2016 I.A. Aliev, Sc. Candidate (Phys.-math.), V.I. Cherkashin, Sc. Doctor (Geol.-Min.), M.A. Musaev

Institute of Geology, DSC RAS, Russia, 367030, 75, Makhachkala, M. Yaragski st.,
e-mail: dangeo@mail.ru

Conducted a detailed study of seismicity of the territory of Dagestan over the past 50 years showed a maximum concentration of seismic activity in the area Sulak cascade that occurs during filling of reservoirs each large hydro. It is shown, for example Irganaysk HPP that additional increase (in comparison with the period of relative tectonic equilibrium) dynamic load initiates the burst of seismic activity in the area, changes the nature of the distribution of hypocenters. After a burst of seismic activity there is a period of relative seismic calm of the area, in other words triggered seismicity leads to a temporary reduction of the total local seismicity.

Keywords: seismic activity, HPP cascades, tectonic balance, dynamic loading, initiated seismicity, distribution of hypocenters.