УДК 551.3:550.3 (575.1)

Результаты обработки записей колебаний плотин и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана при слабых землетрясениях

© 2020 г. Л.А. Хамидов¹, А.Х. Ибрагимов¹, И.М. Алимухамедов², Х.Л. Хамидов¹

¹ИС АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан; ²ЦПТ Мининновации РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Рассмотрены результаты обработки записей колебаний плотин и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана при слабых землетрясениях. Показано, что на объектах произведена модернизация системы сейсмометрических наблюдений. Анализируя сейсмометрические оценки, выявлено, что конструкция плотины Чарвакского водохранилища обладает нелинейным поведением, и это проявляется в различии частотного диапазона и коэффициента передачи элементов плотины. Анализом сейсмометрических данных, полученных при регистрации слабых землетрясений в нескольких измерительных пунктах плотин и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилищ, показано, что частоты колебания и отношение амплитуд скоростей колебаний к амплитудам скоростей колебаний опорного измерительного пункта сильно изменяются в зависимости от азимута к эпицентру.

Ключевые слова: сейсмические колебания, спектр, плотина, скорость, приращение, водохранилище, эксплуатация, сейсмичность, энергия.

Для цитирования: Хамидов Л.А., Ибрагимов А.Х., Алимухамедов И.М., Хамидов Х.Л. Результаты обработки записей колебаний плотин и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана при слабых землетрясениях // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 28–42. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.03

Введение

Организация и проведение цифрового сейсмометрического контроля состояния устойчивости при эксплуатации крупных водных резервуаров в мировой практике является важной задачей [Рогожин и др., 2014; Хамидов, Шукуров, 2008]. Оно связано с выполнением огромного объёма инструментальных и технологических работ. Выполненные ранее исследования позволили собрать информацию о наиболее крупных водохранилищах Восточного и Южного Узбекистана, где были зафиксированы возможные изменения уровня сейсмического риска от их эксплуатации. Проанализированы параметры сейсмичности в разные периоды: до, во время и после строительства водохранилищ [Плотникова и др., 1986; Джураев и др., 2004; Тимбеков и др., 2006; Хамидов и др., 2019]. Для получения более точных сейсмометрических данных о механизмах колебаний горных массивов в зонах водохранилищ проведено совершенствование системы сейсмического мониторинга в зонах ряда крупных водохранилищ Узбекистана. Исследованиями, прове-

было отмечено этими авторами, «интерес к изучению особенностей проявления этих землетрясений связан с решением проблемы влияния

дёнными Л.М. Плотниковой, В.И. Махмудовой, М.Г. Фленовой, Н.М. Джураевым, И.Х. Тимбековым и др. [Плотникова и др., 1986; Джура-

ев и др., 2004; Тимбеков и др., 2006], практически началась реализация основы сейсмического

мониторинга в зонах водохранилищ. Эти иссле-

дования базировались в основном на аналоговых системах регистрации землетрясений. После

завершения строительства и начала эксплуата-

ции крупного Чарвакского водохранилища в его

ближней зоне произошло два сильных земле-

трясения. 13 февраля 1977 г. в 15^h33^m произошло

землетрясение с интенсивностью *I*=5 баллов по

шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965] и магни-

тудой М=3.6 в районе Чарвакского водохрани-

лища. Месяц спустя, 15 марта, в 14^h07^m произо-

шёл второй, более сильный, толчок с I=5 баллов

по шкале MSK-64 и магнитудой *М*=3.9. В работах Л.М. Плотниковой, М.Г. Фленовой и В.И. Мах-

мудовой это землетрясение получило назва-

ние «Денапское» [Плотникова и др., 1986]. Как

водохранилища на сейсмичность района и с вопросами сейсмостойкости уникального гидротехнического сооружения — высокой Чарвакской плотины ...».

Инженерно-сейсмометрическая служба, основанная на устаревшей, частично аналоговой аппаратуре, работала в основном на Чарвакском (Ташкентский вилоят), Андижанском (Андижанский вилоят), Гиссаракском (Кашкадарьинский вилоят) и Тупалангском (Сурхандарьинский вилоят) водохранилищах. С 2006 г. началось совершенствование существующей цифровой системы инженерно-сейсмометрических наблюдений на Чарвакском водохранилище, а с 2017 г. – в зоне Андижанского водохранилища. С этого же времени организована система цифрового мониторинга с современной базой обработки сейсмометрической информации [*Хамидов*] *и др.*, 2019]. Представление результатов обработки записей колебаний плотин и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилищ Узбекистана при несильных землетрясениях является основной целью данной работы.

Водохранилище Чарвак находится на реке Чирчик, несколько ниже по течению от места слияния рек Пскем и Чаткал, между отрогами Угамского и Чаткальского хребтов Западного Тянь-Шаня (рис. 1).

Водохранилище образовано каменно-насыпной плотиной Чарвакской ГЭС высотой 168 *м*. Уровень водохранилища значительно понижается в летний период времени, так как его вода используется для задач ирригации и поливного земледелия в долине Чирчик [*Хамидов и др.*, 2019].



Рис. 1. Географическое расположение Чарвакского и Андижанского водохранилищ и ГЭС [Водохранилища ..., 2020]

Объём водохранилища составляет 2 км³, площадь водной поверхности — более 37 км², протяжённость береговой линии — около 100 км. Питание водохранилища обеспечивается узловой зоной примыкания Чаткальской, Пскемской и Коксуйской рек Приташкентского геодинамического полигона Чаткальских гор. От створа плотины практически начинается, совмещаясь с рекой Угам, река Чирчик, которая является основным источником пресной воды всей орошаемой и городской зоны Ташкентской долины. Зона по сейсмичности оценена 8—9-балльной по шкале MSK-64 [Плотникова и др., 1986; Хамидов и др., 2019].

Бетонная плотина Андижанского водохранилища расположена в Андижанском вилояте Восточного Узбекистана на реке Карадарья (рис. 1). По конструкции она относится к массивноконтрфорсной плотине. Высота плотины — 115 *м*, длина по гребню — около 900 *м*, ширина по основанию — 110 *м* [Джураев и др., 2007]. Основанием плотины служат скальные породы — сланцы Рг и известняки, песчаники и др. мелового возраста. Территория по сейсмичности отнесена к 9-балльной зоне [Джураев и др., 2007; Артиков и др., 2010; Артиков и др., 2012].

Методы исследования и исходные данные

Методика исследования основывается на способах оценки локальной сейсмичности, методах цифровой регистрации сейсмических волн, математических методах расчёта собственных частот колебаний плотин и способах обработки многолетних данных изменения волновых полей в зонах крупных водохранилищ Узбекистана, связанных с землетрясениями. В районах расположения большинства водохранилищ Узбекистана отсутствовали систематические сейсмометрические наблюдения за продолжительный период. Они проводились эпизодично, преследуя производственные цели для отдельных водохранилищ. Например, для оценки устойчивости насыпной плотины Чарвакского гидроузла и бетонной плотины Андижанского водохранилища были поставлены специализированные локальные автоматизированные системы сейсмометрических наблюдений. Контроль сейсмичности в зонах водохранилищ проводился в целях сейсмического микрорайонирования зоны строительства и эксплуатации [Плотникова и др., 1986; *Джураев и др.*, 2004; *Тимбеков и др.*, 2006]. Судить о сейсмичности региона в период до 2006 г. можно только по данным либо региональных сейсмических сетей, либо служб других организаций, охватывающих эти районы. Апробация усовершенствованной системы мониторинга за сейсмичностью проведена определением волновых форм колебания береговых склонов, тела плотины и основания водохранилищ во время землетрясений.

Исследования проведены в соответствии с государственными нормативными документами Республики Узбекистан об обеспечении геодинамической и сейсмической безопасности водохранилищ. Использованы результаты организации инженерно-сейсмометрических наблюдений в период эксплуатации водохранилищ, выполненных до 2007 г., в соответствии с требованиями СНиП-II-7-81 (плотины, относящиеся к сооружениям 1 класса капитальности и расположенные в зоне высокой сейсмичности – 8–9 баллов) [Строительство ..., 1982]. Нами с 2007 г. по настоящее время выполнены исследования в соответствии с требованиями ШНК 2.06.11-04, пункта 1.12, для сооружений I-II классов, где указано обязательное включение в состав исследований организацию инструментальных наблюдений за поведением сооружений, их оснований и береговых склонов при динамических воздействиях (землетрясения, взрывы и др.) с требованиями обязательного Приложения 1 (стр. 92, ШНК 2.06.11-04) [Градостроительные ..., 2006].

Обработка записей колебания плотины и береговых склонов Чарвакского и Андижанского водохранилища при слабых землетрясениях проведена, основываясь на сейсмометрических данных, полученных за последние четыре года. На сейсмограммах измерялись максимальные амплитуды скорости колебаний -A_{max} (мм/с), соответствующие им периоды колебаний и длительность колебаний. Произведён расчёт относительного изменения интенсивности колебаний: $\delta_i = A_{\max(i)} / A_{\max}$ (здесь *i* – номер измерительного пункта). Метод регистрации землетрясений малых энергий использован для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с разными физико-механическими свойствами крупнообломочных массивов. Всего произведены измерения на 12 пунктах регистрации в теле Чарвакской плотины и на 16 пунктах Андижанской плотины. Зарегистрировано 51 землетрясение на расстояниях от 20 до 500 км.

Определение сейсмических свойств мелкообломочных и крупнообломочных массивов в зоне Чарвакской плотины, как экспериментального материала при разных нагрузках и объёмах воды, выполнялось несколькими методами: записью слабых далёких землетрясений; изучением спектральных характеристик грунтов; анализом микросейсм методом Накамуры (HVSR) [*Nakamura*, 1989]. Для обработки данных использовались программы JSESAME и GEOPSY [*Geopsy project*]. Метод регистрации землетрясений с малой энергией использован для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с разными физико-механическими свойствами крупнообломочных массивов. При установке новой системы на Чарвакском и Андижанском водохранилищах определены постоянные частотные характеристики всех сейсмических каналов.

В 2006–2011 гг. сейсмометрические наблюдения Чарвакского водохранилища были обновлены путём организации цифровой записи колебаний плотины и береговых склонов. В этот период на теле плотины действовали 18 пунктов трёхкомпонентной регистрации (рис. 2). Измерительные пункты (ИП) оборудованы сейсмографами для записи местных и близких землетрясений в зависимости от фона помех 1-го рода. Диапазон периодов полосы пропускания – 0.2–1.2 с, амплитудно-частотная характеристика каналов соответствует главной части спектра сейсмических волн слабых близких и местных землетрясений [Ибрагимов, Хамидов, 2013].

Обсуждение результатов

Плотина Чарвакского водохранилища. На рис. 3 приведены спектрограммы записи землетрясения на гребне и у основания Чарвакской плотины. На гребне в основном преобладают высокочастотные составляющие колебаний, что вероятно обусловлено резонансными явлениями.

На рис. 4 показано сопоставление величины скорости смещения на различных пунктах регистрации. Отношение величин пиковых амплитуд в разных точках водохранилища может отличаться в 12 раз.



Рис. 2. Измерительные пункты и места расположения сейсмических станций на плотине Чарвакского водохранилища.

1, 2 – измерительные пункты, оборудованные трёхкомпонентными сейсмометрами; 3 – изометрическая высота; 4 – центр обработки автоматизированной системы сейсмометрических наблюдений объекта; 5 – блоксхема АЦП и системы регистрации сейсмических колебаний



Рис. 3. Спектрограмма землетрясения на пункте регистрации № 4 – гребень плотины (слева), и на пункте регистрации № 8 – основание плотины (справа). Сверху вниз: компоненты EW, NS, Z. Цветом обозначена амплитуда колебаний



Рис. 4. Сопоставление амплитуд сейсмограмм в разных точках Чарвакской плотины. Слева – компонента NS, справа – EW

Сейсмометрические исследования показали, что конструкция обладает нелинейным поведением, это проявляется в различии частотного диапазона и коэффициента передачи элементов плотины. Изучение особенностей проявления сейсмичности в связи с эксплуатацией объекта для сейсмоэкологического контроля требует длительного непрерывного наблюдения с накоплением сейсмостатистики не только по сильным, но и, в основном, по слабым землетрясениям менее 10 энергетического класса. Такие крупные объекты, как Чарвакское и Андижанское водохранилища, при эксплуатации оказывают влияние на окружающую геологическую среду, изменяют напряжённое состояние и характер сейсмических проявлений [Плотникова и др., 1986; Хамидов и др., 2019; Ибрагимов, Хамидов, 2013]. Только лишь в 2019 г. в радиусе $R \le 50 \ \kappa m$ от створа Чарвакского водохранилища наблюдались более 60 землетрясений с энергетическим классом K от 2.5 до 10.5 (табл. 1).

Не меньшее количество слабых землетрясений ежегодно наблюдается в непосредственной близости ($R \le 15 \ \kappa m$) от створа Андижанского водохранилища. Квартальная частота этих землетрясений на указанных радиусах R при одинаковых интервалах энергетических классов Kв ближней зоне Андижанского водохранилища в три-четыре раза выше, чем в Чарвакской зоне (табл. 1).

Зарегистрированные с наиболее высокой точностью частоты колебаний и амплитуды скоростей дают возможность оценить параметры колебания гребня или тела плотин Чарвакского и Андижанского водохранилищ при слабых землетрясениях.

При оценке динамических характеристик на гребне плотины и береговых склонах Чарвакского водохранилища проводился анализ сейсмометрических измерений методом Накамуры [Mucciarelli, Gallipoli, 2001; Nakamura et al., 2000; Turnbull, 2008]. Этот метод основан на получении отношений спектров горизонтальных компонент микросейсмических колебаний к спектру их вертикальной компоненты (отношения H/V), которые представляют собой передаточную функцию разреза грунтов на всю толщу относительно несвязного геологического материала инженерного фундамента, представляющую аналог амплитудно-частотной характеристики [Acerra et al., 2004; Ditommaso et al., 2012]. В табл. 2 показаны основные значения, полученные в пунктах сейсмических измерений плотины Чарвакского водохранилища.

Таблица 1. Список слабых землетрясений, зарегистрированных с наиболее высокой точностью частот колебаний и амплитуд скоростей на плотине и прибрежных склонах Чарвакского и Андижанского водохранилищ в 2019 г.

No	Дата,	Время,	Коорди	инаты гипс	K	<i>R</i> ,						
J ¶≚	дд.мм.гггг	чч:мм:сс	φ, °N	λ, °N	һ, км		КМ					
Чарвакское водохранилище												
1	26.01.2019	12:28:05	41.70	70.18	15	9.8	13.64					
2	24.06.2019	00:19:41	42.11	70.37	17	9.4	50.38					
3	30.08.2019	08:44:40	41.91	70.39	15	10.3	41.56					
4	06.11.2019	15:56:06	41.23	70.44	15	11.6	50.87					
5	12.11.2019	23:53:17	41.32	70.02	27	10.1	36.70					
6	18.11.2019	16:54:02	41.52	70.57	30	10.1	47.18					
		Андиж	санское вод	дохранилии	<i>ų</i> e							
1	11.01.2019	11:24:47	40.69	73.13	6	10.5	9.84					
2	24.03.2019	23:42:26	40.64	73.05	23	9.1	14.67					
3	27.03.2019	18:06:57	40.84	73.17	25	9.0	10.86					
4	08.04.2019	07:37:08	40.87	73.00	5	9.0	13.00					
5	10.05.2019	23:00:29	40.87	72.98	29	11.2	13.94					
6	09.06.2019	04:51:50	40.82	73.17	13	9.0	9.40					
7	06.08.2019	09:59:29	40.71	73.20	19	9.6	12.28					

Таблица 2. Значения сейсмометрических измерений в 12 пунктах плотины Чарвакского водохранилища (землетрясение № 4 из табл. 1)

№ пункта	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	18	20
Отношение амплитуд колебаний (вдоль/поперёк)	0.57	1.30	1.10	1.08	1.89	1.23	1.48	1.04	1.39	1.04	1.04	4.84
Коэффициент усиления колебаний	1.17	3.40	7.94	6.75	4.15	2.68	3.02	1.94	2.61	4.43	5.14	1.01

РОССИЙСКИЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2020. Т. 2. № 4

Плотина Андижанского водохранилища. В 2018 г. в рамках инновационного проекта «Создание цифровой сейсмической системы на плотине Андижанского водохранилища для мониторинга его состояния и прогноза возможных природных и техногенных катастроф» была запущена новая усовершенствованная цифровая система сейсмического мониторинга. В составе аппаратуры имеются сейсмометры СМ-3, установленные в соответствующих боксах и камерах на теле плотины (рис. 5).

Сейсмометрические измерения на гребне Андижанской плотины производились с применением широкополосных трёхкомпонентных цифровых сейсмометров CMG-6TD производства Guralp, Великобритания. Измерения микросейсм проведены в 16 пунктах регистрации по 30 *мин* (рис. 6). Основным методом анализа полученных данных во всех пунктах наблюдений является спектральный анализ записей микросейсмических колебаний. На рис. 7 приведены спектрограммы записи микросейсмических колебаний на плотине Андижанского водохранилища. Чётко прослеживаются основные моды колебаний.

значения сейсмометрических Основные измерений (табл. 3) и графики спектральновременного анализа для большинства измерительных пунктов Андижанской системы мониторинга (рис. 6) показали следующее – по спектрам выявлено, что на горизонтальных компонентах присутствуют моды (гармоники) на частотах от 4.0 до 4.7 Ги. Для пункта регистрации № 14 наблюдается самая высокая частота собственных колебаний – 5.3 Гц. Наибольшие отношения амплитуд колебаний поперёк/вдоль гребня плотины прослеживаются для точек от 10-го до 16-го пунктов в пределах значений от 9.5 до 13.9, тогда как для точек от 1-го до 9-го пунктов значения отношений амплитуд – в пределах от 1.1 до 7.0. Наибольший коэффициент усиления колебаний (20.1) показывает центральная часть плотины.



Рис. 5. Схема действующей с 2018 г. системы сейсмического мониторинга на 32-секционной плотине Андижанского водохранилища с указанием расположения постаментов (боксов) на теле плотины и соответствующих компонент подключённых каналов. На гребне плотины показаны 16 пунктов измерений методом *H*/*V*.

1 — подключённые сейсмометры СМ-3; 2 — неподключённые сейсмометры — СМ-3 и ОСП-2 (нет связи); 3 — временно установленный акселерометр CGM-STCDE; 4 — Х-компонента; 5 — Ү-компонента; 6 — Z-компонента

№ пункта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Собственная частота f_0	4.7	4.3	4.2	4.7	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1	4.6	5.3	4.6	5.1
Отношение амплитуд колебаний (вдоль/поперёк)	2.5	1.1	1.5	2.1	7.0	5.2	5.8	4.3	2.5	10.7	13.9	10.6	9.5	10.8	12.9	9.7
Коэффициент затухания поперёк	0.22	0.25	0.38	0.38	0.25	0.70	0.48	0.26	1.72	0.25	0.19	0.22	0.47	0.25	0.20	0.25
Коэффициент затухания вдоль	0.25	0.30	2.47	0.74	0.99	1.39	1.69	1.31	0.42	6.22	0.99	0.31	1.00	0.29	0.23	0.22
Коэффициент усиления колебаний	5.6	8.3	7.9	8.3	10.4	9.5	9.6	8.6	20.1	9.4	9.4	9.9	8.3	10.9	8.0	9.8

Таблица 3. Основные значения сейсмометрических измерений в 16 пунктах на гребне плотины Андижанского водохранилища



Рис. 6. Спектры отношений (*H*/*V*) записей микросейсмических колебаний для 16 пунктов регистрации на гребне Андижанской плотины

РОССИЙСКИЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2020. Т. 2. № 4

Контрфорсные плотины, во избежание образования трещин вследствие температурных колебаний, разрезаются по длине на короткие секции, швы между которыми перекрываются водонепроницаемыми уплотнениями. В связи с этим разные элементы конструкции в зависимости от нагрузки обладают собственными периодами колебаний.

Следующей задачей было изучение сильных движений и приращения балльности на плотине Андижан и естественном грунте. Для этого были временно установлены два однотипных широкополосных акселерометра CMG-5TDE. Первый прибор был расположен на сейсмостанции «Кампиррават», которая входит в национальную сейсмическую сеть Республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга при МЧС РУз. Второй прибор был поставлен на гребне плотины в верхнем этаже операторского отсека (рис. 5). В табл. 4 указаны сравнительные характеристики акселерограмм землетрясений, записанных этими двумя однотипными акселерометрами, установленными в грунте и на гребне плотины. По результатам расчётов выявлено, что интенсивность сейсмических колебаний на гребне железобетонной плотины меньше, чем на опорном грунте, на величину в среднем 0.74 балла по шкале МШИЗ-18 [*ГОСТ*..., 2019].



Таблица 4. Сравнительные характеристики землетрясений, полученных по записям двух однотипных акселерометров CMG-5TDE

N⁰	Название региона	Дата, дд.мм.гггг	Время, чч:мм:сс	Магнитуда [<i>Search</i> , 2020]	Компо- нента	Приращения балльности относительно опорного пункта
1	Северный Синьцзян, Китай	08.08.2017	23:27:55	<i>Mw</i> =6.3	EW NS Z	-0.77 -1.05 -0.54
2	Таджикистан–Синьцзян, граница	15.08.2017	22:49:42	<i>mb</i> =4.6	EW NS Z	-1.84 -1.64 -1.49
3	Афганистан–Таджикистан, граница	18.08.2017	19:53:12	<i>mb</i> =4.3	EW NS Z	-0.31 -0.93 -0.71

Очередной задачей для авторов было установить, на какой высотной отметке плотины проявляются максимальные амплитуды скоростей от сейсмических событий. Для выяснения этого были обработаны записи нескольких сильных землетрясений (табл. 5) на трёх разных высотных уровнях плотины по вертикали, в трёх отдельных секциях (датчики СМ-3). Результаты по пяти землетрясениям из табл. 5 приводятся в виде графиков на рис. 8 и 9.

Таблица 5. Каталог землетрясений из [Search ..., 2020], для которых выявлены отношения амплитулы скоростей

амплитуды екоростей											
N⁰	Дата, дд.мм.гггг	Время, <i>чч:мм:сс</i>	Коорди	наты гип	оцентра		Регион				
			φ, °N	λ, °N	h, км	Магнитуда					
1	25.12.2017	21:02:21.2	39.44	73.65	10	mb=4.8	Таджикистан				
2	27.12.2017	13:56:59.0	38.89	72.60	30	mb = 5.0	Таджикистан				
3	29.12.2017	12:40:49.9	39.38	71.55	30	mb=4.5	Таджикистан				
4	29.12.2017	14:59:52.8	36.66	71.28	221	mb=4.5	Гиндукуш, Афганистан				
5	31.01.2018	07:06:59.7	36.55	70.87	189	Mw = 6.1	Гиндукуш, Афганистан				



Рис. 8. Отношения амплитуд сейсмограмм к уровням высот по EW-компонентам (запад-восток)

РОССИЙСКИЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2020. Т. 2. № 4



Рис. 9. Отношения амплитуд сейсмограмм к уровням высот по NS-компонентам (север-юг)

Из приведённого графического материала (рис. 8, 9) следует заключить, что тело плотины испытывает максимальные горизонтальные колебания ближе к средним высотным отметкам плотины (по высоте).

Выводы

Сейсмометрические оценки показали, что конструкции плотин Чарвакского и Андижанского водохранилищ обладают нелинейным поведением, и это проявляется в различии частотного диапазона и коэффициента передачи элементов плотин. Установлено, что на гребне Чарвакской плотины значения скоростей смещений по сравнению со скоростями смещений основания в зависимости от их высоты могут возрастать до 12 раз. Предложена и реализована методика обработки результатов цифровой регистрации сейсмических волн во время землетрясений в зонах водохранилищ с учётом собственных частот колебаний.

Максимальные горизонтальные колебания фиксируются на средних высотных отметках тела обеих плотин. Интенсивность сейсмических колебаний на гребне железобетонной плотины Андижанского водохранилища меньше, чем на опорном грунте («Кампиррават»), на величину в среднем 0.7 балла по шкале МШИЗ-18 [*ГОСТ* ..., 2019].

В настоящее время реализованные параметры системы сейсмического мониторинга позволяют одновременно наблюдать местные и удалённые землетрясения, а также пуск и остановку агрегатов ГЭС, собственные колебания плотины.

Исследования поддержаны Министерством инновационного развития РУз и Академии наук РУз в рамках Госпрограмм фундаментальных и прикладных исследований на 2017–2020 гг. грантами № ФА-Ф-8-008 и № ПЗ-2017091115.

Литература

Артиков Т.У., Абдуллабеков К.Н., Ибрагимов Р.Н., Ибрагимов Р.С. Унифицированный комплекс карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана // Доклады АН РУз. – 2010. – № 1. – С. 53–61.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. – Ташкент, 2012. – 254 с.

Водохранилища Узбекистана // База знаний [сайт]. – URL: http://cawater-info.net/bk/1-1-1-3-uz.htm. Дата обращения 13.07.2020.

ГОСТ Р 34511–2018. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – Введ. 2019-09-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.

Градостроительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. Гидротехнические сооружения. ШНК 2.06.11-04. Издание официальное. – Ташкент: Государственный комитет Республики Узбекистана по архитектуре и строительству, 2006. – 103 с.

Джураев Н.М., Зияудинов Ф.Ф., Джураев А., Нурмухамедов К.Ш. Об инженерно-сейсмогеологических условиях территории строительства Тупалангского водохранилища // Проблемы оценки сейсмической опасности, риска и прогноз землетрясений (Проблемы сейсмологии в Узбекистане). – Ташкент: ИС АН РУз, 2004. – № 1. – С. 436–446.

Джураев Н.М., Зияудинов Ф.Ф., Туйчиева М.А. О характере поведения бетонной плотины Андижанского водохранилища по материалам инженерносейсмометрических наблюдений за период 1995– 1996 гг. // Проблемы оценки сейсмической опасности, риска и прогноз землетрясений (Проблемы сейсмологии в Узбекистане). – Ташкент: ИС АН РУЗ, 2007. – № 4. – С. 73–80.

Ибрагимов А.Х., Хамидов Х.Л. Инженерно-сейсмометрические наблюдения в плотине Чарвакского водохранилища // Современная техника и технологии в научных исследованиях. Сборник трудов Пятой Международной молодёжной конференции. – Бишкек: НС РАН, 2013. – С. 206–208.

Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.

Плотникова Л.М., Махмудова В.И., Карнаухова О.В. Методика и результаты определения значимых факторов режима эксплуатации Чарвакского водохранилища, определяющих сейсмичность района // Сейсмогеодинамика области перехода от орогена Тянь-Шаня к Туранской плите. – Ташкент: Фан, 1986. – С. 87–102.

Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Современное состояние сейсмических наблюдений в районах размещения ответственных промышленных объектов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 280–284.

Строительство в сейсмических районах. Норма проектирования (СН и П-II-7-81). – М.: Стройиздат, 1982. – 49 с.

Тимбеков И.Х., Джураев Н.М., Туйчиева М.А. О достижениях комплексных инженерно-сейсмологических исследований, проведённых в районе предстоящего строительства гидротехнических сооружений в сейсмоактивных зонах Узбекистана // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. – Ташкент: «Янги авлод», 2006. – № 3. – С. 54–63.

Хамидов Л.А., Ибрагимов А.Х., Алимухамедов И.М., Хамидов Х.Л. Возможности совершенствования системы мониторинга сейсмичности в зонах Чарвакского и Андижанского водохранилищ // Проблемы сейсмологии. – Ташкент, 2019. – № 1. – С. 51–60.

Хамидов Л.А., Шукуров М.А. Локальная сейсмичность зоны деформационного влияния Гиссаракского водохранилища // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Третьей Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 211–216.

Acerra C., Havenith H.B., Zacharopoulos S. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. – European Commission, 2004. – № European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME.

Ditommaso R., Mucciarelli M.M., Parolai S., Picozzi M. Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2012. –V. 10, Is. 4. – P. 1221–1235.

Geopsy project [site]. - URL: http://www.geopsy.org/

Mucciarelli M., Gallipoli M.R. A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. – 2001. – V. 42, N 3–4. – P. 255–266.

Nakamura Y.A. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro tremor on the ground surface // Quarterly Report of RTRI. -1989. - V. 30, N 1. - P. 25–33.

Nakamura Y.A., Gurler E.D., Saita J., Rovelli A., Donati S. Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor // Proceeding of12th World

Conference on Earthquake Engineering. – Auckland, New Zealand, 2000. – N 2660. – P. 1–8.

Search for earthquakes // European-Mediterranean Seismological Centre [site]. – Arpajon, France: CSEM EMSC, 2020. – URL: https://www.emsc-csem.org/ Earthquake/?filter=yes

Turnbull M. Relative seismic shaking vulnerability microzonation using an adaptation of the Nakamura horizontal to vertical spectral ratio method // Earth System Science Data. -2008. - V. 117, S 2. - P. 879-895.

Сведения об авторах

Хамидов Лутфулла Абдуллаевич, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб. Института сейсмологии имени Г.А. Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан (ИС АН РУз), г. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: 0000-0002-8084-1648. E-mail: hamidov l@mail.ru

Ибрагимов Алишер Хайдарович, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. ИС АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: 0000-0002-7190-0116. E-mail: alisher1957@mail.ru

Алимухамедов Илхом Мизратович, канд. геол.-мин. наук, зав. лаб. Центра передовых технологий Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (ЦПТ Мининновации РУз), г. Ташкент, Республика Узбекистан. E-mail: ilhom75@mail.ru

Хамидов Хайрулла Лутфуллаевич, ст. науч. сотр. ИС АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: 0000-0003-3210-6662. E-mail: hayrulla_classic@mail.ru

The processing results of the vibration records from the dams and coastal slopes of the Charvak and Andijan water reservoirs of Uzbekistan during the weak earthquakes

© 2020 L.A. Khamidov¹, A.Kh. Ibragimov¹, I.M. Alimukhamedov², Kh.L. Khamidov¹

¹IS AS RUz, Tashkent, Uzbekistan; ²CAT of the Innovation ministry RUz, Tashkent, Uzbekistan

Abstract The article discusses the processing results of the vibration records from the dams and coastal slopes of the Charvak and Andijan water reservoirs of Uzbekistan during the weak earthquakes. It is shown, that the seismic monitoring systems were upgraded at the investigated objects. Analyzing seismic estimates, revealed, that the construction of the Charvak reservoir dam has a non-linear behavior, and it is manifested in the differences of the frequency range and transmission coefficient of the dam elements. According to the analysis of seismic data, obtained during the registration of weak earthquakes at the several measuring points of dams and coastal slopes of the Charvak and Andijan reservoirs, the vibration frequencies and the ratio of the vibration velocity amplitudes to the vibration velocity amplitudes of the reference station are varies greatly depending on the azimuth to the epicenter.

Keywords Seismic vibrations, spectrum, dam, speed, amplification, reservoir, exploitation, seismicity, energy.

For citation Khamidov, L.A., Ibragimov, A.Kh., Alimukhamedov, I.M., & Khamidov, Kh.L. (2020). [The processing results of the vibration records from the dams and coastal slopes of the Charvak and Andijan water reservoirs of Uzbekistan during the weak earthquakes]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(4), 28-42. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.03

References

Acerra, C., Havenith, H.B., & Zacharopoulos, S. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation (No. European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME). European Commission.

Artikov, T.U., Abdullabekov, K.N., Ibragimov, R.N., & Ibragimov, R.S. (2010). [Unified map complex of general seismic zoning of the territory of Uzbekistan]. *Doklady AN RUz* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan], *1*, 53-61. (In Russ.).

Artikov, T.U., Ibragimov, R.S., & Ziyaudinov, F.F. (2012). *Seysmicheskaya opasnost' territorii Uzbekistana* [Seismic hazard of the territory of Uzbekistan]. Tashkent, Uzbekistan. 254 p. (In Russ.).

CSEM EMSC. (2020). European-Mediterranean Seismological Centre. Search for earthquakes. Retrieved from https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes

Ditommaso, R., Mucciarelli, M.M., Parolai, S., & Picozzi, M. (2012). Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *10*(4), 1221-1235.

Dzhuraev, N.M., Ziyaudinov, F.F., & Tuychieva, M.A. (2007). [About the nature of the behavior of the con-

In Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy otsenki seismicheskoi opasnosti i snizheniia posledstvii zemletriasenii". Problemy seysmologii v Uzbekistane. № 4
[Proceeding of the International Conference "Problems of Seismic Hazard Assessment and Mitigation of Earthquake Consequences". Problems of seismology in Uzbekistan. № 4] (pp. 73-80). Tashkent, Uzbekistan. (In Russ.).
Geopsy project. (2020). Retrieved from http://www.geopsy.org/GOST R 34511-2018. (2018). [State Standard 34511-2018.

crete dam of the Andijan reservoir based on engineering seismometric observations for the period 1995-1996].

Earthquakes. Seismic intensity scale]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 23 p. (In Russ.).

Ibragimov, A.Kh., & Khamidov, H.L. (2013). [Seismometric engineering observations in the dam of the Charvak reservoir]. In Sovremennaya tekhnika i tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh. Sbornik trudov 5. Mezhdunarodnoy molodezhnoy Konferentsii. 24-25 aprelya 2013 g. Nauchnaya stantsiya RAN. Bishkek [Proceedings of the 5th International Youth Conference "Modern equipment and technologies in scientific research". April 24-25, 2013] (pp. 206-208). Bishkek, Kyrgyzstan: NS RAS Publ. (In Russ.).

Juraev, N.M., Ziyaudinov, F.F., Juraev, A., & Nurmukhamedov, K.Sh. (2004). [On the engineering-seismicgeological conditions of the territory of the construction of the Tupalang reservoir]. In *Materialy Mezhdunarodnoi* konferentsii "Problemy otsenki seismicheskoi opasnosti i snizheniia posledstvii zemletriasenii". Problemy seysmologii v Uzbekistane. \mathbb{N} 4 [Proceeding of the International Conference "Problems of Seismic Hazard Assessment and Mitigation of Earthquake Consequences". Problems of seismology in Uzbekistan. \mathbb{N} 4] (pp. 436-446). Tashkent, Uzbekistan. (In Russ.).

Khamidov, L.A., & Shukurov, M.A. (2008). [Local seismicity of a zone of deformation influence of the Gissarak water basin]. In *Materialy III Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the III International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 211-216). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Khamidov, L.A., Ibragimov, A.Kh., Alimukhamedov, I.M., & Khamidov, H.L. (2019). [Opportunities for improving the system for monitoring seismicity in the zones of the Charvak and Andijan reservoirs]. Problemy seysmologii [Problems of Seismology], *1*, 51-60. (In Russ.).

Medvedev, S.V. Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaia shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-*64 [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).

Mucciarelli, M., & Gallipoli, M.R. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42(3-4), 255-266.

Nakamura, Y.A. (1989). Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micro tremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30(1), 25-33.

Nakamura, Y.A., Gurler, E.D., Saita, J., Rovelli, A., & Donati, S. (2000). Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor. In *Proceeding*, *12th WCEE* 2000 in Auckland, NZ, 2660.

Plotnikova, L.M., Makhmudova, V.I., & Karnaukhova, O.V. (1986). [Methods and results of determining significant factors of the operating mode of the Charvak reservoir, which determine the seismicity of the region]. In *Seysmogeodinamika oblasti perekhoda ot orogena Tyan'-Shanya k Turanskoy plite* [Seismogeodynamics of

the transition from the Tien Shan orogen to the Turan plate.] (pp. 87-102). Tashkent, Uzbekistan: Fan Publ. (In Russ.).

Reservoirs in Uzbekistan. (2020). Knowledge Base. Retrieved from http://cawater-info.net/bk/1-1-1-3-uz.htm

Rogozhin, E.A., Kapustyan, N.K., & Antonovskaya, G.N. (2014). [Current state of seismic observations in areas where industrial facilities are availiable]. In *Materialy IX Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the IX International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 280-284). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

SHNK 2.06.11-04. (2006). *Izdaniye ofitsial'noye. Gosudarstvennyy Komitet Respubliki Uzbekistana po arkhitekture i stroitel'stvu* [Town-planning norms and rules. Construction in seismic areas. Waterworks. ShNK 2.06.11-04. Official publication]. Tashkent, Uzbekistan: "State Committee of the Republic of Uzbekistan on architecture and construction" Publ., 103 p. (In Russ.).

SNiP-II-7-81. (1982). [Construction in seismic areas. Design Norm (State Standard P-II-7-81)]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 49 p. (In Russ.).

Timbekov, I.Kh., Dzhuraev, N.M., & Tuychieva, M.A. (2006). [On the achievements of comprehensive engineering and seismological studies conducted in the area of the upcoming construction of hydraulic structures in the seismically active zones of Uzbekistan]. In *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy otsenki seismicheskoi opasnosti i snizheniia posledstvii zemletriasenii"*. *Problemy seysmologii v Uzbekistane.* N_{2} 3 [Proceeding of the International Conference "Problems of Seismic Hazard Assessment and Mitigation of Earthquake Consequences". Problems of seismology in Uzbekistan. N_{2} 3] (pp. 54-63). Tashkent, Uzbekistan: "Yangi Avlod" Publ. (In Russ.).

Turnbull, M. (2008). Relative seismic shaking vulnerability microzonation using an adaptation of the Nakamura horizontal to vertical spectral ratio method. *Earth System Science Data*, *117*(S2), 879-895.

Information about authors

Khamidov Lutfulla Abdullaevich, Dr., Head of the Laboratory, Institute of Seismology named after G.A. Mavlyanov of the Academy of Sciences Republic of Uzbekistan (IS AS RUz), Tashkent, Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-8084-1648. E-mail: hamidov_l@mail.ru

Ibragimov Alisher Khaidarovich, PhD, Head of the Laboratory, Institute of Seismology named after G.A. Mavlyanov of the Academy of Sciences Republic of Uzbekistan (IS AS RUz), Tashkent, Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-7190-0116. E-mail: alisher1957@mail.ru

Alimukhamedov Ilkhom Mizratovich, PhD, Head of the Laboratory, Centerfor advanced technologies under the Ministry of innovative development of the Republic of Uzbekistan (CAT of the Innovation ministry RUz), Tashkent, Uzbekistan. E-mail: ilhom75@mail.ru

Khamidov Khairulla Lutfullaevich, Senior Researcher of the IS AS RUz, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: 0000-0003-3210-6662. E-mail: hayrulla_classic@mail.ru