

УДК 550.348

Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС)

© 2019 г. А.В. Лисейкин¹, В.С. Селезнев¹, З.А. Адилев²,
Ting-Yu Hsu³, V. Arygianni³

¹СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ДФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала, Россия;
³Taiwan Tech, Taipei, Taiwan

Аннотация. Предлагается способ мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций по данным непрерывных сейсмических наблюдений. Объектом исследования является крупнейшая в России арочная плотина Чиркейской ГЭС, расположенная на Кавказе. На первоначальном этапе выполнено детальное изучение собственных колебаний плотины методом когерентного восстановления полей стоячих волн с определением как собственных частот сооружения, так и их мод. Изучены особенности сезонных изменений полного поля стоячих волн и установлены факторы, влияющие на изменения собственных частот. На следующем этапе значения собственных частот определялись по спектрам микросейсмических колебаний, зафиксированных сейсмической аппаратурой, установленной на объекте. Использовались пункты наблюдения, расположенные в областях пучностей стоячих волн. Значения собственных частот плотины Чиркейской ГЭС, в целом, уменьшаются с ростом напора. Определено, что существуют дополнительные факторы, приводящие к эффекту гистерезиса в зависимости между значениями уровня водохранилища и собственных частот, предположительно, связанные с релаксационными процессами в теле плотины и/или в системе плотина–основание после изменения напора. Предложена методика мониторинга состояния плотины, основанная на сопоставлении наблюденных значений собственных частот с прогнозными. Последние определяются по линейным зависимостям от уровня водохранилища с учётом временных сдвигов, связанных с процессами релаксации.

Ключевые слова: плотина Чиркейской ГЭС, стоячие волны, мониторинг собственных частот.

Для цитирования: Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилев З.А., Ting-Yu Hsu, Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 23–34. doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.02>

Введение

Для контроля целостности конструкций инженерных сооружений широко распространены способы мониторинга, основанные на анализе изменений во времени различных параметров поля стоячих волн (прежде всего, собственных частот). Наиболее известные работы – [Devriendt et al., 2014; Darbre et al., 2000; Ercolani et al., 2018; Jin et al., 2018; Loh, 2014; Pan et al., 2019; Proulx et al., 2001; Pereira et al., 2018; Yang, 2010]. В то же время, вариации поля стоячих волн могут быть связаны не только с появлением каких-либо дефектов в конструкции, но и с другими факторами. При исследованиях плотин гидроэлектростанций необходимо учитывать, что значения собственных частот меняются в зависимости от уровня водохранилища (далее

– УВБ). Так, в [Кузьменко и др., 2007] показано, что частоты плотин Саяно-Шушенской, Красноярской и Зейской ГЭС на первых пяти-восьми формах уменьшаются с возрастанием величины напора. Аналогичные результаты были получены для крупных плотин за рубежом [Proulx et al., 2001; Pereira et al., 2018]. Эти изменения являются сезонными и не связаны с появлением дефектов в конструкции плотин.

Анализ опубликованной литературы показал, что отсутствуют теоретические исследования, посвящённые расчёту ожидаемых изменений собственных частот при появлении дефектов в конструкциях бетонных плотин. Для понимания, какой величины могут быть эти изменения, приводится пример, полученный при расчёте конечно-элементной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС в программе SAP2000 (рис. 1).

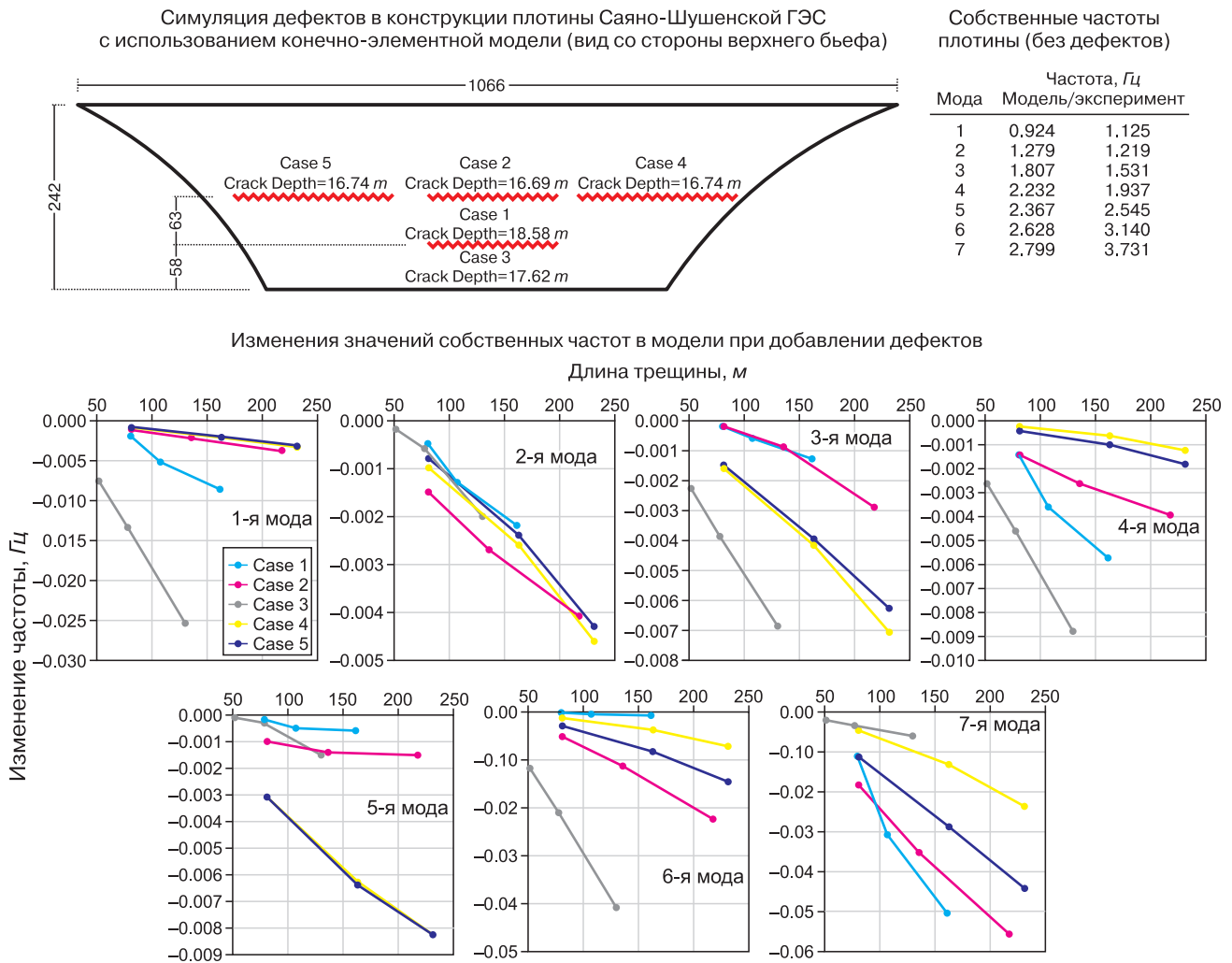


Рис. 1. Оценка изменений значений собственных частот при появлении дефектов в конечно-элементной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Каждый элемент был смоделирован как твёрдый объём из бетона с модулями упругости и плотностью, подобранными таким образом, чтобы собственные частоты модели были как можно ближе по значениям к экспериментальным, взятым из [Еманов и др., 2002]. Вода в водохранилище учитывалась как дополнительная масса, влияющая на собственную частоту плотины. Чтобы упростить сложную геометрию плотины, во-первых, модель была построена симметричной и, во-вторых, некоторым элементам в правобережной части плотины были приданы более прочные свойства материала. Плотина была разделена на шесть слоёв в продольном направлении. Массив модели состоял из 12888 элементов с восемью узлами и 847 сочленениями. Граничные условия примыканий плотины моделировались шарнирными опорами. В таблице на рис. 1 представлены собственные частоты, полученные при моделиро-

вании, и соответствующие экспериментальные значения. Вследствие упрощений собственные частоты модели и эксперимента не полностью соответствуют друг другу. Однако, поскольку основной задачей исследования была имитация именно изменений собственных частот в результате повреждений, а не точный их расчёт, построенная конечно-элементная модель представляется допустимой. Чтобы симитировать повреждение конструкции, в модель были введены пять различных трещин, каждая из которых смоделирована путём отключения соединений элементов в модели. Глубина каждой трещины составляет одну шестую от толщины плотины на соответствующей высоте. Кроме этого, были смоделированы три разных длины трещин. Из графиков, приведённых на рис. 1, видно, что ожидаемые изменения собственных частот при появлении дефектов в теле плотины составляют от 0.001 до 0.06 Гц.

Таким образом, для исключения неверной интерпретации, прежде чем проводить исследование по мониторингу состояния сооружений на основании изменения их собственных частот, необходимо, во-первых, достоверно и точно (до величин не менее 0.01 Гц) определить данные частоты и, во-вторых, тщательно изучить все факторы, на них влияющие. В силу необходимости принятия оперативных решений, следует разработать способ определения текущих значений частот (близкий к реальному времени).

Метод исследования и данные

В данной работе предлагается способ мониторинга собственных частот плотин ГЭС по данным непрерывных сейсмических наблюдений на станциях, установленных внутри плотины. В качестве примера выбрана плотина Чиркейской ГЭС (рис. 2а). Расположена на Кавказе, имеет крупнейшую в России плотину арочного типа, высотой 232 м и длиной 338 м. Расчётный напор воды – 170 м, а сезонные колебания уровня водохранилища достигают почти 40 м. В соответствии с нормативами ГЭС оснащена системой непрерывных сейсмметрических и сейсмологических наблюдений, характеристики которой приведены в [Antonovskaya et al., 2017]. В литературе практически нет данных о натуральных исследованиях изменений пара-

метров собственных колебаний этой плотины. Есть исследование, в котором при неизвестном уровне водохранилища была сделана попытка изучить собственные колебания плотины методом когерентного восстановления полей стоячих волн [Еманов и др., 2018]. Однако из-за неудачного расположения опорной точки точность построений была пониженной, и не все моды были выделены. Более полные сведения о собственных частотах и модах, выделенных при одном (максимальном) уровне водохранилища, приведены в [Лисейкин и др., 2018].

Для изучения собственных колебаний плотины на первом этапе использовался метод когерентного восстановления полей стоячих волн, позволяющий из микросейсмических колебаний, зарегистрированных в различных точках здания или сооружения, построить детальное поле стоячих волн и определить собственные частоты и моды [Еманов и др., 2002]. Измерения выполнялись по методике, описанной в [Лисейкин и др., 2018]. На рис. 2 показана схема временно реализованных наблюдений и пунктов размещения постоянной сейсмметрической системы в плотине. Временные измерения проводились дважды – при близких к минимальным и максимальным УВБ с целью определить особенности сезонных изменений параметров полей стоячих волн в теле плотины.

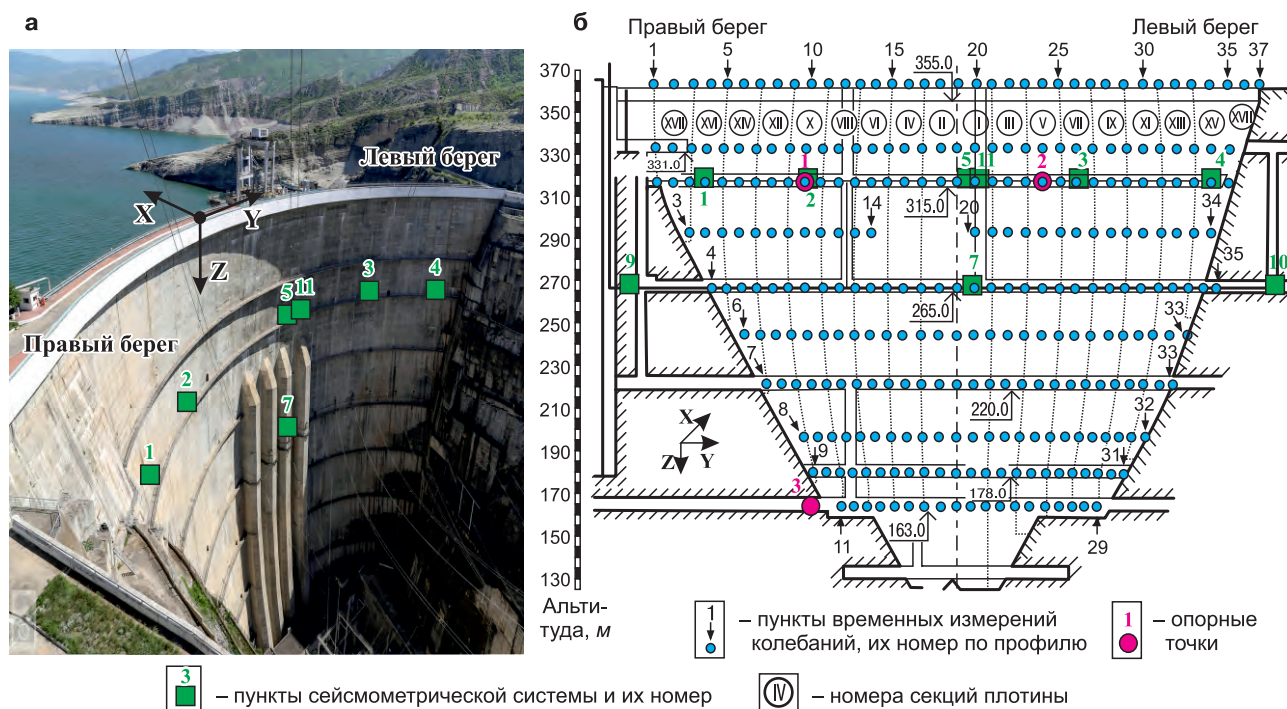


Рис. 2. Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС с пунктами постоянной сейсмметрической системы (а) и схема временно реализованных сейсмических наблюдений (б)

После проведения регистрации был получен набор непрерывных (10-минутных) разновременных записей в 287 точках наблюдения. Задача последующей цифровой обработки состояла в приведении к единому времени разновременных сейсмических записей с последующим выделением стоячих волн, сформировавшихся в сооружении. Для этого использовалась методика расчёта фильтров Винера для пересчёта колебаний из опорной точки в каждую из точек наблюдения на сооружении, подробно описанная в [Еманов и др., 2002].

С целью осуществления непрерывного мониторинга собственных частот использовались записи постоянной сейсмометрической системы, установленной в плотине. По ежедневным записям микросейсмических колебаний рассчитывались усреднённые спектры. По их локальным максимумам амплитуд определялись значения частот, соответствующих модам, определённым на первом этапе. При этом частоты определялись в точках, расположенных в пучностях стоячих волн, в соответствии с методикой [Селезнев и др., 2013]. Далее исследовались факторы, влияющие на изменения частот, но не связанные с изменением технического состояния плотины, например, меняющийся уровень водохранилища. Исключение таких факторов повысит степень достоверности результатов мониторинга технического состояния сооружения.

Результаты исследования и обсуждения

Данные, приведённые на рис. 3, показывают изменения наборов амплитудных спектров когерентных колебаний, по результатам двух экспериментальных работ – при максимальном и минимальном УВБ. Следует отметить, что в обоих случаях подавляющая часть энергии колебаний была сосредоточена на X-компоненте (амплитуды колебаний выше на порядок), направленной радиально (поперёк плотины). Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только поперечные колебания. В целом поля колебаний при разных напорах отличаются, но есть и общие черты. Так, колебания 1-й, 2-й и 4-й мод (номер моды принят количеству наблюдаемых пучностей вдоль профиля), хотя и с разными частотами и интенсивностями, повторяются при разных напорах. На частотах между 2-й и 4-й модами наблюдается ещё одно устойчивое колебание, имеющее одну пучность, которое можно классифицировать как вторичную первую моду, то есть в данном случае наблюдаются две первых моды с разными частотами колебаний.

Такое явление связано с тем, что соответствующие стоячие волны образуются в объектах, объединяющих разные секции плотины. При данных наблюдениях остальные колебания значительно менее выражены и не повторяются по форме при разных режимах наполнения водохранилища. Можно сказать, что поля стоячих волн на частотах, отличных от двух 1-х, 2-й и 4-й форм, абсолютно разные. Такое различие, на наш взгляд, может быть вызвано существенным изменением напряжённо-деформированного состояния плотины при изменении УВБ.

Из рис. 3 видно, что при снижении УВБ (с 347 до 318 м) частоты двух 1-х, 2-й и 4-й мод увеличились на 0.20–0.45 Гц. Отметим, что подобные изменения, хотя и меньшего размаха (изменения частот в 0.1–0.2 Гц), наблюдались нами при аналогичных исследованиях для плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Из рис. 4, на котором представлены схематичные изображения выделенных мод, видно, что при разных напорах их геометрическая форма практически не меняется, а меняются только частоты. Заметны лишь некоторые искажения формы 1-й моды, которые, по нашему мнению, связаны с наложением колебаний 2-й моды по частоте, близкой к 1-й. Это возможно из-за пониженной добротности колебаний.

В силу того, что колебания только четырёх мод (двух 1-х, 2-й и 4-й) повторяются с высокой степенью достоверности как при минимальном, так и при максимальном УВБ, именно эти моды можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины Чиркейской ГЭС. Остальные собственные колебания, безусловно, тоже несут в себе информацию о состоянии плотины. Но из-за изменения поля стоячих волн при смене напора, ожидается, что эти колебания будут наблюдаться лишь в ограниченных временных промежутках.

Способ изучения собственных колебаний плотины, изложенный выше, выгодно отличается от других методов в силу высокой детальности и точности построений. Однако для решения задач непрерывного и оперативного мониторинга состояния плотин такой способ не подходит ввиду временных затрат на исследование. Так, на проведение измерений без учёта доставки аппаратуры и персонала требуется два дня, и один-два дня – на выполнение цифровой обработки данных и анализ результатов. Поэтому для целей дальнейшего исследования были использованы данные непрерывной регистрации колебаний существующей сейсмометрической системы в теле плотины. Определение частот

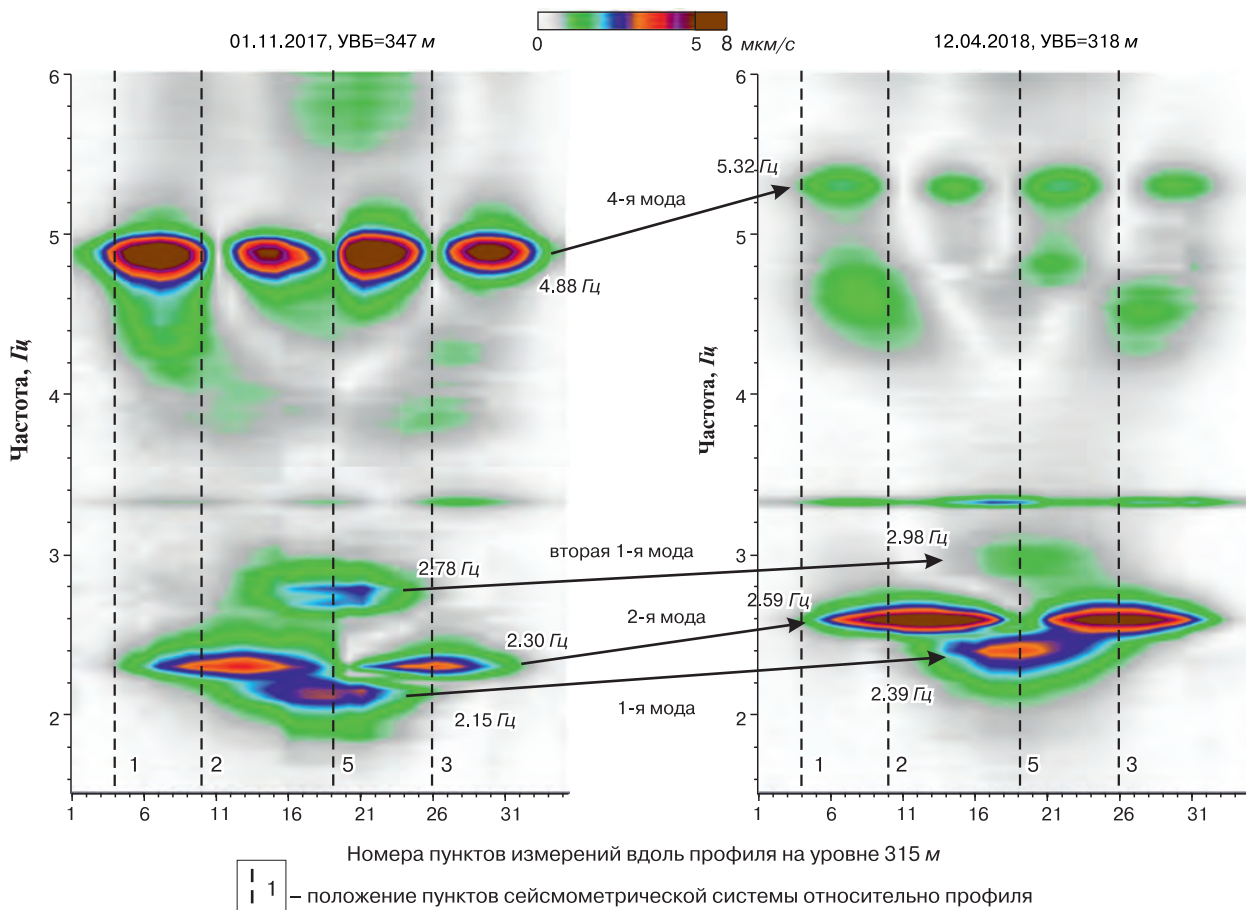


Рис. 3. Изменения низкочастотной части амплитудных спектров поперечных колебаний плотины при максимальном и минимальном уровнях водохранилища

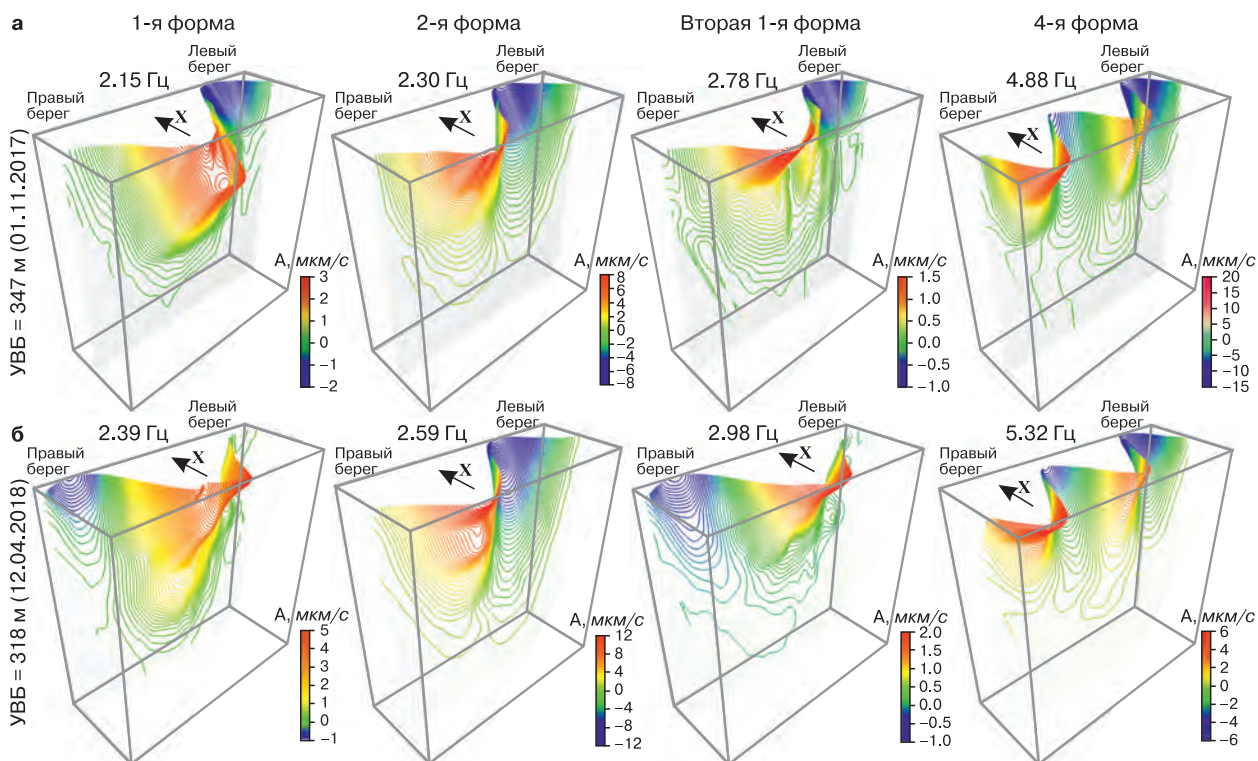


Рис. 4. Схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й мод радиальных колебаний плотины Чиркейской ГЭС при высоком (а) и низком (б) уровнях водохранилища

выполнялось по максимумам амплитудных спектров записей сейсмических шумов в точках, расположенных в пучностях каждой из мод, в соответствии с методикой [Селезнев и др., 2013]. Как видно из рис. 3 и 4, геометрические формы двух 1-х, 2-й и 4-й мод не меняются при минимальном и максимальном УВБ, а, значит, и местоположение пучностей также неизменно. Поэтому для определения собственных частот каждой из мод достаточно выбрать хотя бы одну точку наблюдения, расположенную в районе пучности соответствующей моды.

Рассмотрим особенности регистрируемых колебаний на сейсмометрической системе, расположение пунктов которой было показано на рис. 2. На рис. 5 показаны усреднённые амплитудные спектры записей поперечных колебаний плотины, полученные в пунктах № 3 и № 5 за период наблюдений с 01.10.2015 г. по 28.12.2016 года. Методика их построения состоит в вычислении наборов амплитудных спектров для фрагментов, длиной по 100 с каждый, с последующим усреднением. Длина записи для построения спектров каждый раз отличалась от нескольких часов до суток из-за выбора участков записи, при которых не менялись режимы работы гидроагрегатов, так как эти изменения (особенно моменты пусков и остановок) сопровождалась повышенными амплитудами волн-помех, наличие которых приводило к погрешностям в определении частот. Поэтому количество усреднений для каждого спектра, изображённого на рис. 5, отличалось от 72 (два часа записи) до 864 (суточная запись). Дополнительных процедур обработки сигнала кроме исключения участков с помехами и усреднения спектров не применялось.

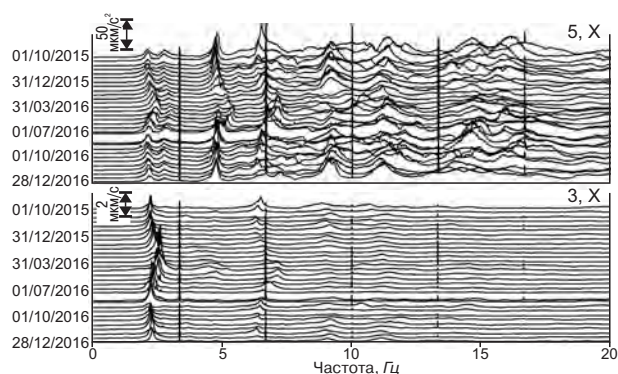


Рис. 5. Усреднённые амплитудные спектры суточных записей радиальных колебаний плотины в двух пунктах наблюдения

На рис. 5 видно, что поля колебаний в двух разных точках принципиально отличаются. Это

вызвано различным положением точек относительно узлов и пучностей стоячих волн. Например, пункт наблюдения № 5 расположен в области пучностей двух первых мод (рис. 3) и одновременно в узле второй моды, поэтому в низкочастотной части спектра (2–3 Гц) прослеживаются только два максимума колебаний. Пункт № 3 расположен в пучности второй моды, поэтому прослеживается только один максимум колебаний. Более наглядно это видно из рис. 6, на котором показаны усреднённые спектры с нормированными в узком частотном диапазоне амплитудами.

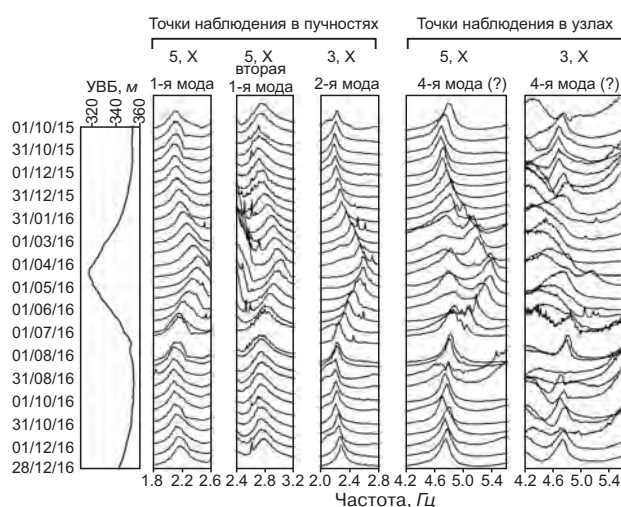


Рис. 6. Изменение уровня (УВБ) Чиркейского водохранилища и нормированные усреднённые амплитудные спектры записей радиальных колебаний плотины в двух пунктах наблюдения

На рис. 6 видно, что в пункте № 5 за весь период наблюдений прослеживаются максимумы колебаний с частотами, соответствующими двум первым модам, а в пункте № 3 – соответствующими второй моде. Заметно, что существует тесная корреляция между изменениями уровня водохранилища и частотами – с ростом УВБ частоты понижаются. Сложнее интерпретировать изменения частот 4-й моды. Проектирование положения пунктов сейсмометрической системы Чиркейской ГЭС выполнялось без учёта пространственного положения узлов и пучностей. Поэтому все имеющиеся пункты наблюдения оказались сосредоточены вблизи узлов 4-й моды (рис. 3). Это не дало возможности проследить непрерывно изменения частот данной моды (рис. 6). В 2019 г. планируется модернизация сейсмометрического комплекса в плотине Чиркейской ГЭС с добавлением новых пунктов регистрации колебаний, и в случае учёта пространственного положения пучностей 4-й моды

появится возможность исследовать изменения её частот.

Таким образом, существующая система сейсмометрических наблюдений в плотине Чиркейской ГЭС позволяет отслеживать непрерывные изменения частот двух первых и второй мод. Рассмотрим более подробно, как меняются эти частоты с течением времени и в зависимости от уровня наполнения водохранилища. На рис. 7 представлены графики названных параметров за 2016 год. С учётом разброса значений частот относительно тренда можно приблизительно определить погрешность их определения – она составляет 0.01–0.02 Гц. В целом с ростом УВБ частоты понижаются. Подобная зависимость характерна для плотин ГЭС и объясняется исследователями изменением присоединённой массы воды (чем больше масса, тем ниже собственная частота и наоборот).

Рассмотрим, какие ещё факторы, кроме присоединённой массы, могут влиять на значения частот. Для этого построим зависимости между значениями частот и УВБ (рис. 8). Из рис. 8а видно, что зависимость между значениями

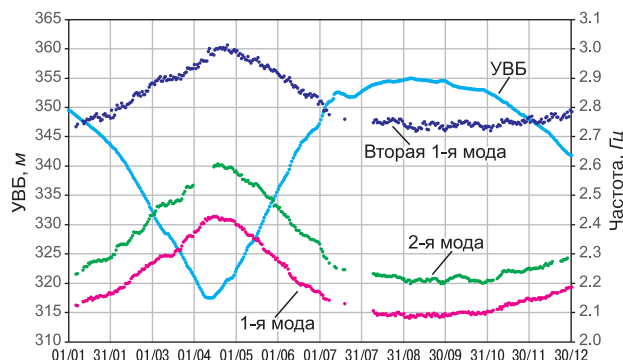


Рис. 7. Изменение уровня Чиркейского водохранилища (УВБ) и значений собственных частот плотины в 2016 г.

частот и УВБ неоднозначная. Графики имеют отличия в зависимости от режима водохранилища – его наполнения или сработки. В целом отмечается запаздывание изменений частот от хода изменений УВБ. Это приводит к образованию петель на графиках, подобных петлям гистерезиса. Аналогичный эффект был замечен нами ранее при исследованиях по мониторингу частот

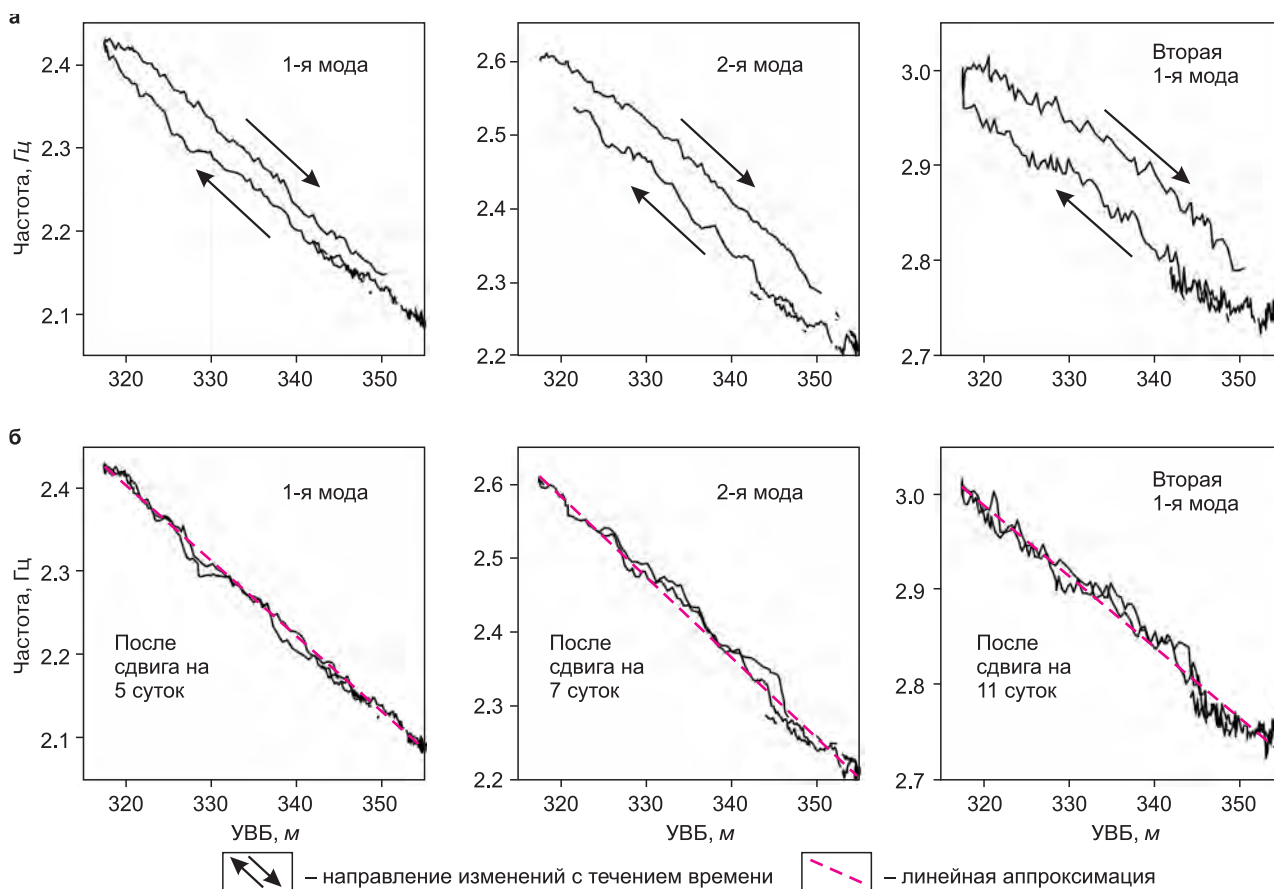


Рис. 8. Зависимости собственных частот плотины от УВБ за 2016 г.: а – единовременные зависимости; б – зависимости после временного сдвига

плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Можно предположить, что такое запаздывание связано с тем, что плотина не мгновенно реагирует на изменения уровня водохранилища, а постепенно релаксирует. Если это не учитывать, то при выполнении мониторинга собственных частот плотины может быть сделан неправильный вывод о её состоянии.

Дополнительным подтверждением гипотезы о релаксации может быть работа [Идармачев И.Ш. и др., 2019]. Приведены результаты исследований связи между сезонными изменениями уровня воды в водохранилище и вариациями кажущегося электрического сопротивления массива горных пород в скважине, расположенной на правом берегу возле плотины. Установлен факт запаздывания кажущегося сопротивления от уровня воды в водохранилище, которое составляет 12 суток. Одна из причин такого запаздывания, по мнению авторов исследования, связана с отставанием деформации горных пород от изменения уровня водохранилища.

Для оценки времени релаксации мы ввели временной сдвиг между рядами изменений УВБ и значений частот (рис. 8б). Видно, что после сдвига на 5, 7 и 11 суток для каждой из трёх собственных частот зависимости приобретают более простой и однозначный вид. Их можно приближённо аппроксимировать линейными функциями. Таким образом, введя временной сдвиг, мы учли время релаксации плотины.

Для разработки способа мониторинга собственных частот плотины были построены аппроксимирующие зависимости их от текущих значений УВБ. Для этого использовались простые зависимости вида:

$$f(t) = aH(t - \tau) + b, \quad (1)$$

где $f(t)$ – аппроксимированное значение собственной частоты в момент времени t , a и b – коэффициенты аппроксимации линейной функцией, $H(t)$ – текущие значения УВБ, τ – временной сдвиг, компенсирующий задержку изменений частот относительно изменений УВБ. Коэффициенты аппроксимации определялись методом наименьших квадратов по данным, представленным на рис. 8б. Кроме этого, были определены значения стандартного отклонения (σ) экспериментальных данных относительно линейной регрессии. Результаты определения данных параметров приведены в таблице.

Выполнять мониторинг собственных частот плотины предлагается следующим образом. В первую очередь, по усреднённым спектрам

сейсмических записей в точках, расположенных вблизи пучностей, определяются текущие значения частот двух первых и второй мод. С учётом данных об уровне водохранилища, по формуле (1) и с параметрами, приведёнными в таблице, вычисляются прогнозные значения собственных частот. Выполняется сравнение экспериментальных и прогнозных значений частот. В случае, если наблюдаемые частоты превышают прогнозные на величину более 3σ (используется правило «трёх сигм»), делается вывод об изменении технического состояния плотины и необходимости установления причин данных изменений.

Таблица. Параметры аппроксимации зависимостей собственных частот от УВБ по данным за 2016 г.

Мода	α , Гц/м·10 ³	b , Гц	τ , сут	σ , Гц
1-я	-8.996	5.279	5	0.008
2-я	-10.962	6.094	7	0.014
Вторая 1-я	-7.285	5.317	11	0.014

Пример реализации способа показан на рис. 9, где представлены прогнозные значения собственных частот от УВБ и данные их экспериментального определения. Из рисунка видно, что наблюдаемые значения расположены внутри доверительных интервалов. Это означает, что в 2017 г. техническое состояние плотины осталось стабильным (таким же, как в 2016 г.).

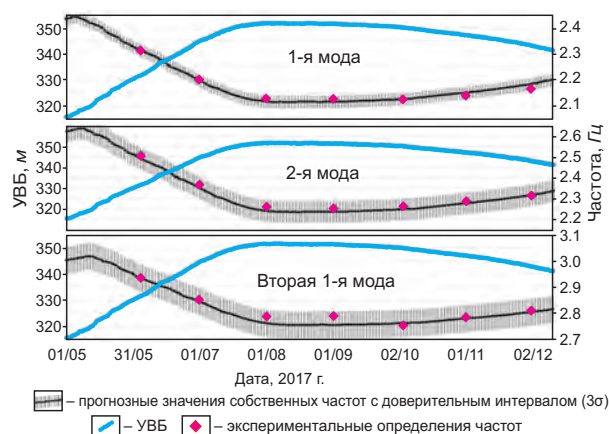


Рис. 9. Пример реализации способа мониторинга собственных частот плотины Чиркейской ГЭС

Представленные в статье подходы могут быть использованы и на других арочных и бетонных плотинах ГЭС. Другие исследователи также развивают подходы к мониторингу собственных частот плотин с целью контроля за целостностью плотины и обнаружения дефектов. Однако эта методика пока ещё является

новой и не получила повсеместного внедрения. Основная причина, по нашему мнению, связана с большими погрешностями в определении частот и с трудностями в интерпретации их изменений, которые в большей степени зависят от изменения уровня водохранилища. Все это приводит к низкой степени достоверности результатов исследований.

Большинство погрешностей можно исключить за счёт изучения собственных колебаний плотин по очень плотным системам наблюдений. Метод когерентного восстановления полей стоячих волн, использованный в работе, позволяет выполнить такие исследования с высокой точностью. За счёт возможности реализации наблюдений небольшим количеством регистрирующей аппаратуры методика достаточно технологична.

Некоторые исследователи (например, [Pereira et al., 2018]) учитывали эффект от уровня воды водохранилища путём ввода корректирующей функции, зависящей только от уровня верхнего бьефа. В нашем исследовании было установлено, что на значения собственных частот влияют не только сезонные колебания уровня воды, но и дополнительные факторы, предположительно связанные с релаксационными процессами в плотине или её основании. Эти процессы приводят к тому, что зависимости между уровнем водохранилища и частотами приобретают вид петель, подобных петлям гистерезиса. Поэтому для учёта этого эффекта в корректирующую функцию мы предлагаем ввести дополнительный параметр, описывающий задержку изменений частот относительно изменений уровня воды. Возможно такой эффект существует и для других крупных плотин ГЭС. Однако, насколько нам известно, он ещё не был изучен другими исследователями.

Следует отметить, что изменения технического состояния, связанные, например, со старением бетона или с изменением свойств основания плотины, достаточно длительные по времени. Поэтому для выявления таких изменений могут потребоваться годы или даже десятилетия экспериментальных наблюдений.

Заключение

1. Выполнены детальные исследования плотины Чиркейской ГЭС методом когерентного восстановления полей стоячих волн при максимальном и минимальном уровнях наполнения водохранилища с определением собственных частот и мод.

2. Установлено, что полное поле стоячих волн меняется при изменении УВБ, а неизменными остаются две 1-х, 2-я и 4-я моды, частоты которых в целом уменьшаются с ростом уровня водохранилища. Эти моды можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины путём периодического определения значений частот по записям сейсмической аппаратуры. Пункты существующей сейсмометрической системы расположены вблизи узлов 4-й моды, что не позволяет достоверно определять значения её частот.

3. Определено, что существуют дополнительные факторы, приводящие к эффекту гистерезиса в зависимости между значениями УВБ и собственных частот, предположительно связанные с релаксационными процессами в теле плотины и/или в системе плотина—основание после изменения уровня водохранилища. Время такой релаксации составляет от пяти до 11 суток.

4. Разработана методика мониторинга состояния плотины, основанная на сопоставлении наблюдаемых значений частот с прогнозными. Последние определяются по линейным зависимостям от УВБ с учётом временного сдвига, связанного с релаксационными процессами.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00453-19-02.

Литература

Еманов А.Ф., Бах А.А., Клецин В.И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. — 2018. — № 4 (35). — С. 28–33.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. — 2002. — Т. 43, № 2. — С. 192–207.

Идармачев И.Ш., Дещеревский А.В., Идармачев Ш.Г. Оценка связи между изменениями уровня воды в Чиркейском водохранилище и электрическим сопротивлением пород в области правобережья плотины ГЭС // Гидротехническое строительство. — 2019. — № 3. — С. 25–31.

Кузьменко А.П., Бортников П.Б., Сабуров В.С. Контроль технического состояния бетонных плотин по динамическим характеристикам их колебаний // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. — 2007. — Т. 248. — С. 64–76.

- Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А. Собственные частоты и формы колебаний арочной плотины Чиркейской ГЭС по данным метода стоячих волн // Гидротехническое строительство. — 2018. — № 11. — С. 128–133.
- Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RUS 2546056. 18.06.2013.
- Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Danilov A.V., Moshkunov A.I., Moshkunov K.A. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring // J. Seismol. — 2017. — V. 21, N 5. — P. 1039–1053.
- Devriendt C., Weijtjens W., El-Kafafy M., De Sitter G. Monitoring resonant frequencies and damping values of an offshore wind turbine in parked conditions // IET Renewable Power Generation. — 2014. — V. 8, N 4. — P. 433–441. doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0229
- Darbre G.R., De Smet C.A.M., Kraemer C. Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. — 2000. — V. 29, N 5. — P. 577–586. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(200005)29:5<577::AID-EQE924>3.0.CO;2-P
- Ercolani G.D., Felix D.H., Ortega N.F. Crack detection in prestressed concrete structures by measuring their natural frequencies // J. of Civil Structural Health Monitoring. — 2018. — V. 8, N 4. — P. 661–671. doi: 10.1007/s13349-018-0295-2
- Jin S.-S., Jung H.-J. Vibration-based damage detection using online learning algorithm for output-only structural health monitoring // Structural Health Monitoring. — 2018. — V. 17, N 4. — P. 727–746. doi: 10.1177/1475921717717310
- Loh C.H. Sensing solutions for assessing and monitoring dams // Sensor Technologies for Civil Infrastructures. — 2014. — V. 1. — P. 275–308. doi: 10.1533/9781782422433.2.275
- Pan J., Zhang Z., Wu J., Ramakrishnan K.R., Singh H.K. A novel method of vibration modes selection for improving accuracy of frequency-based damage detection // Composites Part B: Engineering. — 2019. — V. 159, N 15. — P. 437–446. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.134
- Proulx J., Paultre P., Rheault J., Robert Y. An experimental investigation of water level effects on the dynamic behaviour of a large arch dam // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. — 2001. — V. 30, N 8. — P. 1147–1166. doi: 10.1002/eqe.55
- Pereira S., Magalhaes F., Gomes J.P., Cunha A., Lemos J.V. Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir // Engineering Structures. — 2018. — V. 174, N 1. — P. 548–560. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.076
- Yang Z., Le Wang. Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies // J. of intelligent material systems and structures. — 2010. — V. 21, N 3. — P. 309–319. doi: 10.1177/1045389X09350332

Сведения об авторах

Лисейкин Алексей Владимирович, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: lexik1979@mail.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: svsv0428@mail.ru

Адилов Зарахман Ашуралиевич, зав. отд. Дагестанского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ДФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Махачкала, Россия. E-mail: adilov79@mail.ru

Ting-Yu Hsu, PhD, Ass. Professor, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taipei, Taiwan. E-mail: tyhsu@ntust.edu.tw

Arygianni Valentino, Master, Graduated Student, Taiwan Tech, Taipei, Taiwan. E-mail: arygvalent@gmail.com

Features of the monitoring of natural frequencies of hydro power plant dams (on the example of the Chirkey dam)

© 2019 A.V. Liseikin¹, V.S. Seleznev¹, Z.A. Adilov², Ting-Yu Hsu³, V. Arygianni³

¹SB GS RAS, Novosibirsk, Russia; ²DB GS RAS, Makhachkala, Russia; ³Taiwan Tech, Taipei, Taiwan

Abstract A method is proposed for monitoring the natural frequencies of hydro power plant dams using continuous seismic observation data. The object of the research is the largest in Russia arched Chirkey dam located in the Caucasus. At the initial stage, a detailed study of the natural oscillations of the dam was performed using the method of coherent restoration of the standing wave fields with the definition of both the natural frequencies of the structure and their modes. The features of seasonal changes in the total field of standing waves are studied and factors affecting changes in natural frequencies are established. At the next stage, the values of natural frequencies were determined from the spectra of microseismic oscillations recorded by seismic equipment installed on the object. Observation points located in the antinodes of standing waves were used. The values of the natural frequencies of the Chirkey dam, as a whole, decrease with increasing upstream level. It was determined that there are additional factors leading to the hysteresis effect in the relationship between the values of the upstream level and natural frequencies, presumably associated with relaxation processes in the dam body and/or in the dam-base system after the change of level. A method for monitoring the state of the dam is proposed, based on a comparison of the observed values of natural frequencies with the predicted ones. The latter are determined by linear dependencies on the upstream level, taking into account the time shifts associated with relaxation processes.

Keywords arched Chirkey dam, the standing wave fields, monitoring the natural frequencies.

For citation Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., Adilov, Z.A., Ting-Yu Hsu, & Arygianni, V. (2019). [Features of the monitoring of natural frequencies of hydro power plant dams (on the example of the Chirkey dam)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 1(1), 23-34. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.02>

References

- Antonovskaya, G.N., Kapustian, N.K., Danilov, A.V., Moshkunov, A.I., & Moshkunov, K.A. (2017). New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring. *Journal Seismology*, 21(5), 1039-1053.
- Darbre, G.R., De Smet, C.A.M., & Kraemer, C. (2000). Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(5), 577-586. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(200005)29:5<577::AID-EQE924>3.0.CO;2-P
- Devriendt, C., Weijtjens, W., El-Kafafy, M., & De Sitter, G. (2014). Monitoring resonant frequencies and damping values of an offshore wind turbine in parked conditions. *IET Renewable Power Generation*, 8(4), 433-441. doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0229
- Emanov, A.F., Bakh, A.A., & Klecin, V.I. (2018). [Standing waves in the dams of the Boguchansky and Chirkey HPP]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij* [Natural and man-made risks. Safety of buildings], 4(35), 28-33. (In Russ.).
- Emanov, A.F., Seleznev, V.S., Bakh, A.A., Gritsenko, S.A., Danilov, I.A., Kuzmenko, A.P., Saburov, V.S., & Tatkov, G.I. (2002). [Recalculation of standing waves in detailed engineering seismological studies]. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 43(2), 192-207. (In Russ.).
- Ercolani, G.D., Felix, D.H., & Ortega, N.F. (2018). Crack detection in prestressed concrete structures by measuring their natural frequencies. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, 8(4), 661-671. doi: 10.1007/s13349-018-0295-2
- Idarmachev, I.Sh., Deshcherevskij, A.V., & Idarmachev, Sh.G. (2019). [Assessment of the connection between changes in the level of water in the Chirkei water reservoir and electric resistance of rocks in the right-course of the weather plant]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], 3, 25-31. (In Russ.).
- Jin, S.-S., & Jung, H.-J. (2018). Vibration-based damage detection using online learning algorithm for output-only structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 17(4), 727-746. doi: 10.1177/1475921717717310
- Kuzmenko, A.P., Bortnikov, P.B., & Saburov, V.S. (2007). [Technical state control for concrete dams on dynamic characteristics of their oscillations]. *Izvestia Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo*

- instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneva* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.Ye. Vedeneev], 248, 64-76. (In Russ.).
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., & Adilov, Z.A. (2018). [Natural frequencies and modes of oscillations of the Chirkey HPP arch dam by standing waves method]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], 11, 128-133. (In Russ.).
- Loh, C.H. (2014). Sensing solutions for assessing and monitoring dams. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, 1, 275-308. doi: 10.1533/9781782422433.2.275
- Pan, J., Zhang, Z., Wu, J., Ramakrishnan, K.R., & Singh, H.K. (2019). A novel method of vibration modes selection for improving accuracy of frequency-based damage detection. *Composites Part B: Engineering*, 159(15), 437-446. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.134
- Pereira, S., Magalhaes, F., Gomes, J.P., Cunha, A., & Lemos, J.V. (2018). Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir. *Engineering Structures*, 174(1), 548-560. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.076
- Proulx, J., Paultre, P., Rheault, J., & Robert, Y. (2001). An experimental investigation of water level effects on the dynamic behavior of a large arch dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(8), 1147-1166. doi: 10.1002/eqe.55
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., & Alzhanov, R.Sh. (2013). [The method of organizing continuous seismometric monitoring of engineering structures and device for its implementation]. Patent RF, no. 2546056 (In Russ.).
- Yang, Z., & Le Wang. (2010). Structural damage detection by changes in natural frequencies. *Journal of intelligent material systems and structures*, 21(3), 309-319. doi: 10.1177/1045389X09350332

Information about authors

Liseikin Aleksei Vladimirovich, PhD, Leading Researcher of the Seismological branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: lexik1979@mail.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Director of the SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: svsv0428@mail.ru

Adilov Zarakhman Ashuralievich, Head of Department of the Dagestan branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (DB GS RAS), Makhachkala, Russia. E-mail: adilov79@mail.ru

Ting-Yu Hsu, PhD, Ass. Professor, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taipei, Taiwan. E-mail: tyhsu@ntust.edu.tw

Arygianni Valentino, Master, Graduated Student, Taiwan Tech, Taipei, Taiwan. E-mail: arygvalent@gmail.com