

Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам

Е. П. Золотухин¹, А. П. Кузьменко², В. С. Сабуров³,
Д. Б. Короленко⁴, В. Д. Нескородев⁵

*Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН,
Новосибирск, Россия*

e-mail: ¹zepzoloto@mail.ru, ²apkuzm@gmail.com, ³saburov58@yandex.ru,
⁴dbkoroenko@gmail.com, ⁵nvd49@mail.ru

Исследуются вопросы мониторинга технического состояния зданий и сооружений по динамическим характеристикам. Приведены результаты сейсмометрических обследований плотины ГЭС и моста, разработки системы регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния плотины Красноярской ГЭС.

Ключевые слова: автоматизированная система сейсмометрического мониторинга, регистрация землетрясений, мониторинг технического состояния, динамические характеристики плотины, микросейсмические колебания.

Оценка технического состояния зданий и сооружений — довольно сложная и многокритериальная задача. Одними из важных показателей, по которым можно диагностировать состояние строительных систем, включая гидротехнические сооружения (ГТС), как нормальное, потенциально опасное или предаварийное, являются параметры динамической реакции сооружений во время возможного сейсмического события техногенного или естественного происхождения.

В работе [1] предложен способ оценки технического состояния зданий и сооружений, основанный на анализе изменения динамических характеристик, определённых под воздействием микросейсмического фона естественного и техногенного характера, т. е. без использования специальных источников возбуждения.

Способ основан на том, что в процессе эксплуатации при изменении прочностных характеристик строительных материалов, а также условий сопряжения конструкции с основанием изменяются динамические характеристики сооружения (частоты, формы (эпюры) собственных колебаний, декремент затухания, дисперсия, пик-фактор и др.) [2]. Наиболее простым и понятным диагностическим параметром технического состояния сооружения является частота собственных колебаний по трём главным осям. По собственным частотам и эпюрам значимых форм колебаний объекта можно оценить жёсткость и прочность конструкции. Таким образом, величины частот форм собственных колебаний отображают техническое состояние сооружения в целом, интегрально.

Данный способ апробирован на более 70 объектах (плотинах, мостах, зданиях) и запатентован — патенты РФ № 2140625, № 2150684, № 2151233, № 2151234, № 2163009. Опыт проведения обследований показывает, что способ позволяет контролировать техническое состояние ответственных зданий и сооружений: мостов, плотин, туннелей, вы-

сотных зданий, стадионов, крупных промышленных объектов и других конструкций ответственного назначения.

Способ может применяться для проведения детального сейсмометрического обследования зданий и сооружений, экспресс-обследования объектов после сейсмического воздействия и постоянного контроля технического состояния с помощью автоматизированной системы мониторинга и регистрации землетрясений.

Возможности детального обследования показаны на примере плотины Красноярской ГЭС. На рис. 1 представлен амплитудный спектр ускорения колебаний плотины “по потоку” (перпендикулярно продольной оси плотины), усреднённый по всем пунктам наблюдений. Спектр колебаний имеет ярко выраженные спектральные пики, центральные частоты которых соответствуют гармоникам оборотных частот гидроагрегатов (2-я и 4-я). Выделить даже первые частоты собственных колебаний плотины по амплитудным спектрам Фурье невозможно из-за высокой плотности спектров, десять первых частот собственных поперечных колебаний находятся в диапазоне 2.5–6 Гц.

На рис. 2 представлен спектр комплексной передаточной функции ускорения колебаний плотины Красноярской ГЭС “по потоку”, усреднённый по всем пунктам наблюдений. Он имеет ярко выраженные спектральные пики, центральные частоты которых соответствуют собственным частотам поперечных колебаний плотины. По цветным картам амплитудных и фазовых спектров можно произвести идентификацию номера формы, а также определить характер деформаций (изгибные, сдвиговые, изгибно-сдвиговые).

Для определения упругих характеристик системы плотина—основание по ряду собственных частот использована замещающая модель колебаний плотины. Спектр частот форм собственных сдвиговых колебаний плотины “по потоку” аппроксимирован рядом собственных частот поперечных колебаний балки с жёстко закреплёнными концами, лежащей на упругом полупространстве:

$$p_i = \sqrt{\lambda^2 a + b},$$

где

$$a = \frac{GFk'}{4\pi^2 L^2 m}, \quad b = \frac{k_{sh\parallel}}{4\pi^2 m},$$

GFk' — жёсткость поперечного сечения тела плотины по отношению к поперечному сдвигу, тс; m — погонная масса плотины с учётом присоединенной массы воды,

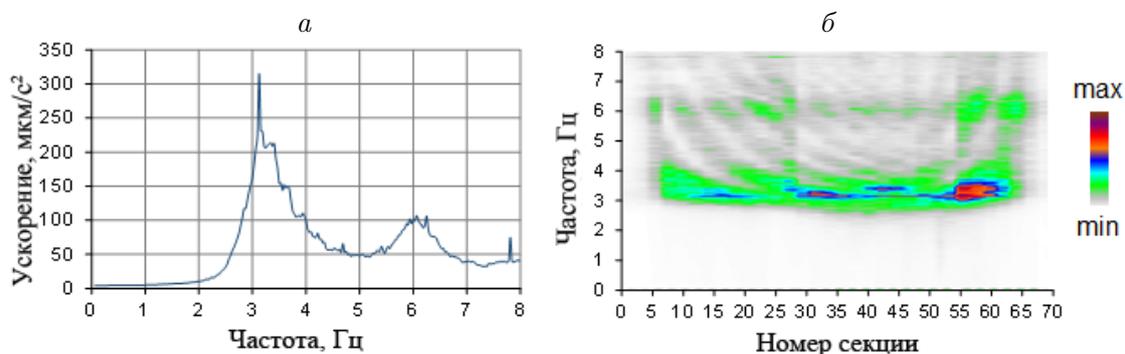


Рис. 1. Амплитудный спектр ускорения колебаний плотины Красноярской ГЭС “по потоку”: *a* — линейный спектр; *б* — карта спектров ускорения

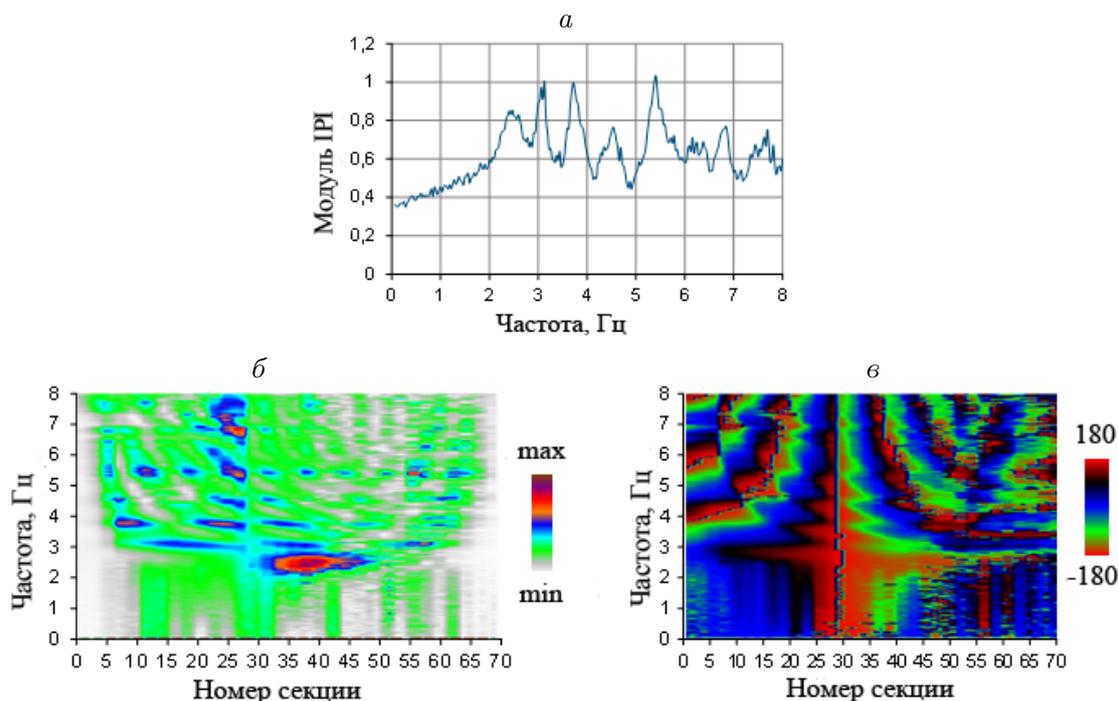


Рис. 2. Спектры комплексной передаточной функции колебаний плотины Красноярской ГЭС “по потоку”: *a* — амплитудный спектр; *б* — карта амплитудных спектров; *в* — карта фазовых спектров

$(\text{тс} \cdot \text{с}^2)/\text{м}$; $k_{sh\parallel}$ — коэффициент жёсткости основания поперечному сдвигу “по потоку” на погонный метр длины балки (плотины), $\text{тс}/\text{м}^2$; L — длина балки (эффективная длина плотины), м. В общем случае коэффициенты λ_i определяются из частотного уравнения

$$\lambda_i^2 \sin \lambda_i - 2\lambda_i \eta \cos \lambda_i - \eta^2 \sin \lambda_i = 0,$$

где $\eta = (k_{sh}L)/(GFk')$ — коэффициент жёсткости поперечному сдвигу в опорных сечениях.

Для жёстко закреплённой балки частотное уравнение примет вид $\sin \lambda_i = 0$.

Коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов при аппроксимации экспериментально полученного ряда собственных частот. С их помощью определяются конструкционная жёсткость поперечного сечения тела плотины поперечному сдвигу и коэффициент жёсткости основания поперечному сдвигу.

Результаты аппроксимации спектра собственных частот плотины “по потоку” спектром собственных сдвиговых поперечных колебаний балки, лежащей на упругом полупространстве, по результатам обследования плотины Красноярской ГЭС в апреле 2000 г. и мае 2013 г. представлены на рис. 3.

По результатам обследования плотины Красноярской ГЭС также определены скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s волн вдоль плотины с поляризацией по трём компонентам. В соответствии с методикой [3] по скоростям получены значения динамического конструкционного модуля упругости и коэффициента Пуассона тела плотины в зависимости от уровня верхнего бьефа (УВБ, уровня воды в водохранилище). Особенно эффективно способ работает при определении технического состояния мостовых сооружений типа неразрезной балки на опорах.

В качестве примера представлены данные обследования шестипролётного автодорожного сталежелезобетонного моста через протоку Байбалаковскую, проведённого в мае 2006 г. На рис. 4 показаны спектры комплексной передаточной функции вертикальных колебаний пролётного строения, которые используются для определения частот и эюр форм собственных колебаний.

Значения собственных частот однозначно определяют параметры технического состояния моста: коэффициенты жёсткости пролетов угловым перемещениям, жёсткость сечений пролётов при изгибе, жёсткость опор по отношению к вертикальному и поперечному сдвигу.

Полученные в результате использования замещающей модели в виде неразрезной балки на опорах значения упругих характеристик моста практически соответствуют значениям, полученным по фактическим значениям стрел прогибов пролётов.

Для постоянного контроля технического состояния гидротехнических сооружений специалистами КТИ ВТ СО РАН разработана и установлена на плотине Красноярской ГЭС автоматизированная система регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния [4–6]. Автоматизированная система сдана в промышленную эксплуатацию в марте 2010 г., после чего производилась периодическая регистрация стацио-

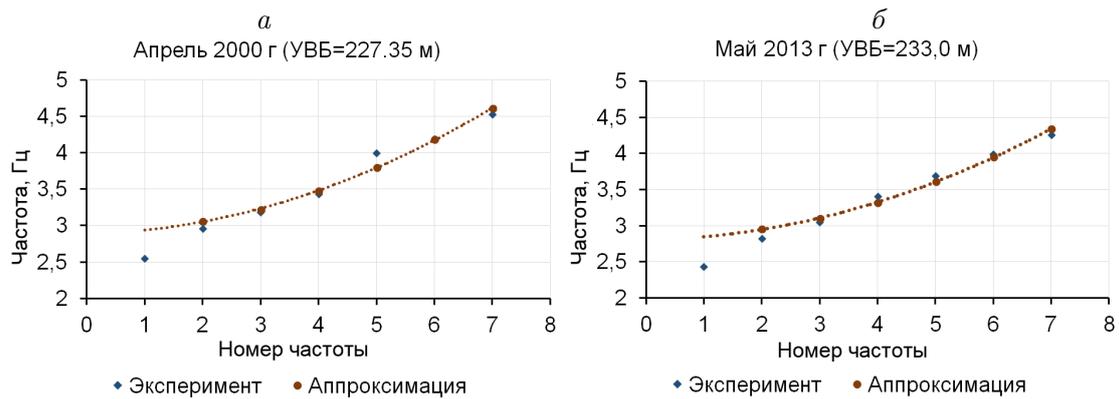


Рис. 3. Спектральные характеристики колебаний плотины Красноярской ГЭС “по потоку”: *а* — апрель 2000 г.; *б* — май 2013 г.

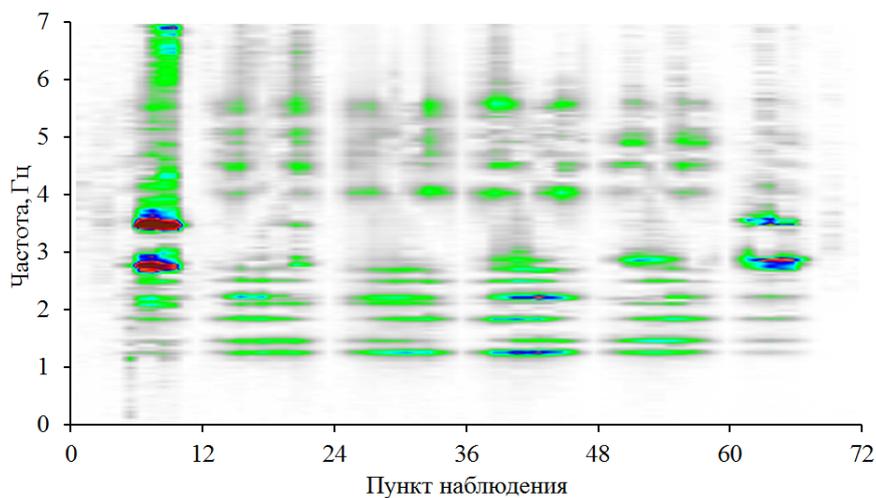


Рис. 4. Спектр вертикальных колебаний пролётных строений

нарных микроколебаний плотины в десяти пунктах наблюдения по трём направлениям колебаний сооружения: продольному, поперечному и вертикальному.

Преимуществом автоматизированной системы является совмещение в ней двух основных функций:

- автоматической регистрации сейсмических событий (землетрясений, взрывов и т. п.) с оценкой их воздействия на плотину;
- периодической регистрации микроколебаний плотины под воздействием динамических нагрузок от функционирующего на ГЭС оборудования и микросейсмического фона для мониторинга технического состояния плотины по динамическим характеристикам.

К дополнительным функциям системы относятся:

- непрерывная запись колебаний плотины для сохранения предыстории событий с последующим удалением по решению оператора, но не менее чем через 7 сут.;
- оповещение персонала ГЭС при регистрации события или неполадках в работе системы по электронной почте, локальной сети и SMS;
- ведение журнала зарегистрированных сейсмических событий и составление отчётов за месяц, квартал или год;
- ведение журнала сообщений обо всех действиях оператора и работе системы;
- визуализация текущего сигнала и спектра по всем каналам в реальном времени;
- настройка параметров профилей регистрации землетрясений и мониторинга;
- автоматизированное определение и визуализация динамических характеристик;
- анализ сезонных изменений динамических характеристик.

Для регистрации землетрясений система постоянно находится в режиме ожидания сейсмического события, т. е. происходит непрерывный анализ амплитуд колебаний плотины. Определение сейсмических событий осуществляется по алгоритму скользящего окна STA/LTA (Short Time Average over Long Time Average). За время эксплуатации системы зарегистрировано три землетрясения интенсивностью 3 балла. В качестве примера на рис. 5 приведены данные регистрации землетрясения на Красноярской ГЭС от 10.02.2010 г. (магнитуда 5.7, энерг. класс 14.2, Ермаковский р-он Красноярского края, 410 км от ГЭС) [7].

На рис. 5, *а* представлена акселерограмма землетрясения длительностью 120 с. На записи хорошо видно вступление продольных и поперечных волн сейсмического события. Изменение текущих значений дисперсии и частоты процесса колебаний во времени определено по 14 окнам (фрагментам длительностью 16 с со сдвигом 8 с) акселерограммы. На рис. 5, *б* видно увеличение энергии колебаний плотины при воздействии поперечной волны (стандартный признак землетрясения). На рис. 5, *в* видно уменьшение частоты процесса колебания плотины при вступлении сейсмических волн от землетрясения.

Для осуществления контроля состояния плотины по динамическим характеристикам необходимо выделять аналогично статическим характеристикам напряжённо-деформированного состояния сезонные (обратимые) и необратимые изменения динамических параметров в процессе эксплуатации. Сезонные изменения динамических характеристик в основном обусловлены изменением уровня верхнего бьефа водохранилища и температурным фактором. Необратимые изменения связаны обычно с изменением изгибно-сдвиговой жёсткости сооружения, упругомеханических свойств основания или условий сопряжения тела плотины с основанием. Известно [8], что увеличение напора на плотину за счёт присоединённой массы воды в водохранилище, движущейся вместе

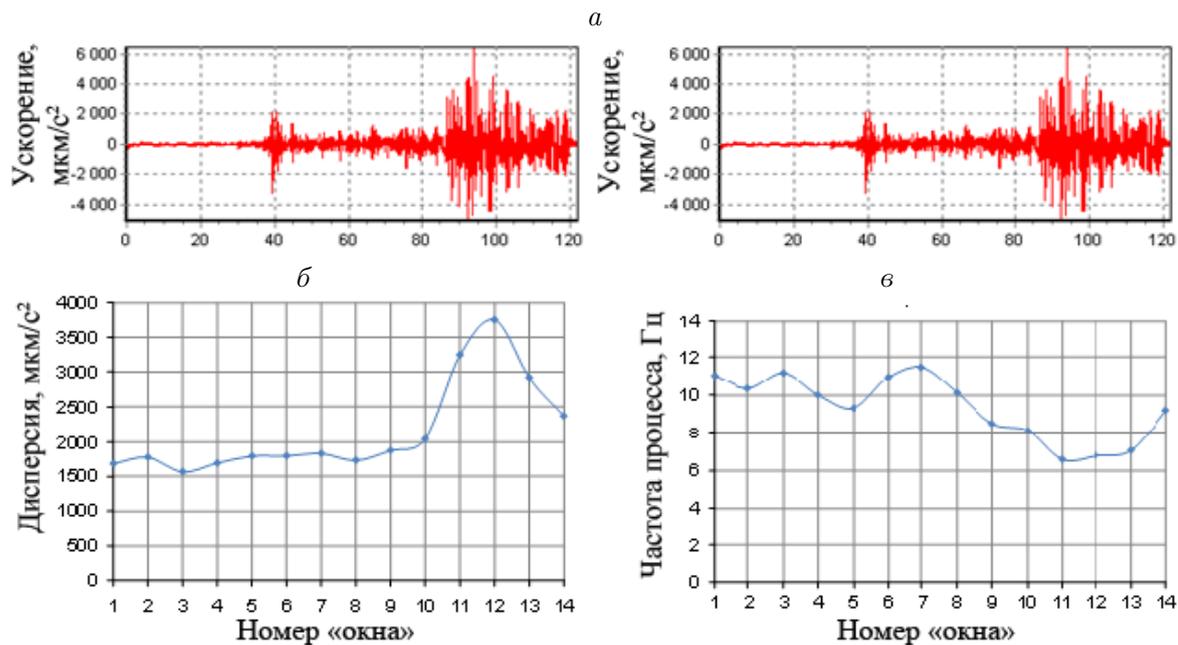


Рис. 5. Данные регистрации землетрясений: *а* — ускорение; *б* — дисперсия; *в* — частота процесса

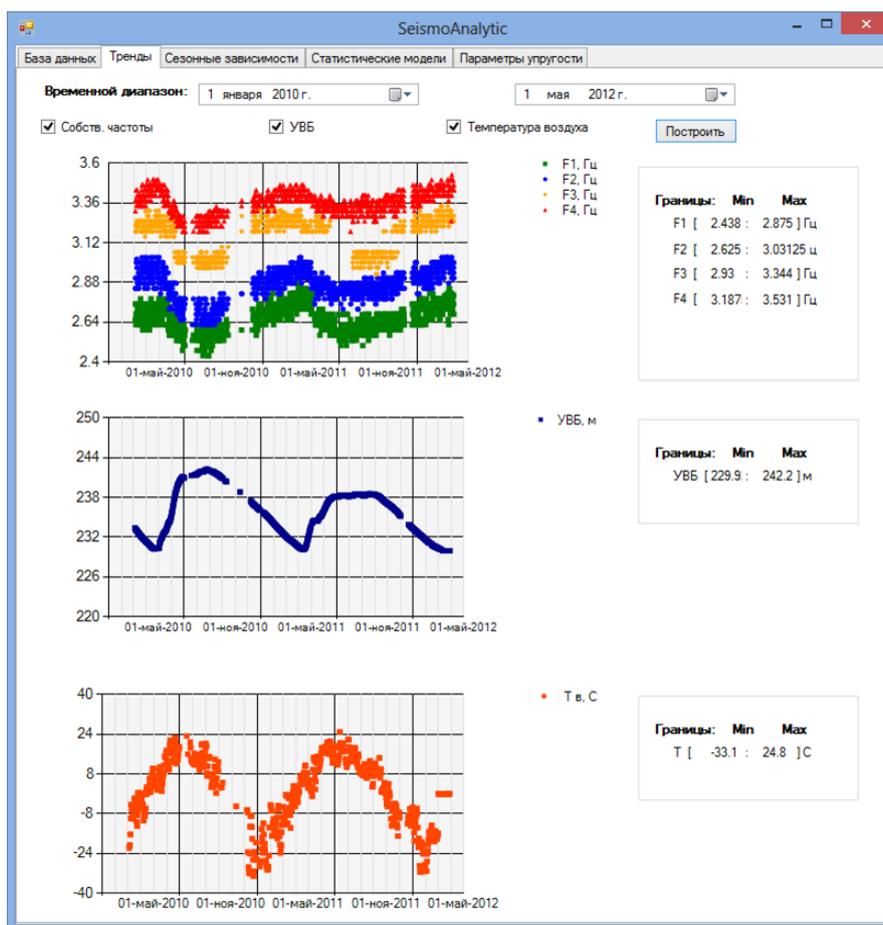


Рис. 6. Изменение первых четырёх собственных частот колебания плотины, УВБ, температуры воздуха за период март 2010 г. — март 2012 г.

с сооружением, приводит к снижению собственных частот изгибных и сдвиговых поперечных колебаний плотины. Сезонное раскрытие швов и трещин на низовых гранях гравитационных плотин ослабляет ее жёсткость и усиливает степень влияния гидростатической нагрузки.

Обработка данных мониторинга и выделение собственных частот осуществлялись с помощью специализированных программ для ЭВМ Main, “Геотон-А” и Seismoteks, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ (№ 2007611653, № 2007613742 и № 2012619757).

В результате обработки данных мониторинга впервые в РФ получена информация о сезонных изменениях первых четырёх частот собственных форм поперечных колебаний плотины за два года. Графики собственных частот, УВБ и температуры окружающего воздуха, построенные с помощью “Программы визуализации и анализа динамических характеристик плотин ГЭС” [9], представлены на рис. 6. Выделение третьей частоты было затруднено наличием гармоник второй оборотной частоты 3.125 Гц, которая мешает выделению амплитудных пиков, в связи с чем в диапазоне частот 3.125 ± 0.031 Гц сложно выделить полезные значения.

При анализе графиков собственных частот и УВБ видно, что сезонное изменение частот собственных поперечных колебаний плотины практически определяется уровнем верхнего бьефа: при минимальном УВБ частоты имеют максимальные значения, при максимальном — минимальные. Сравнение графиков собственных частот и температуры окружающего воздуха показывает запаздывание изменения собственных частот плотины при воздействии температуры из-за инерционности процессов нагревания и охлаждения плотины.

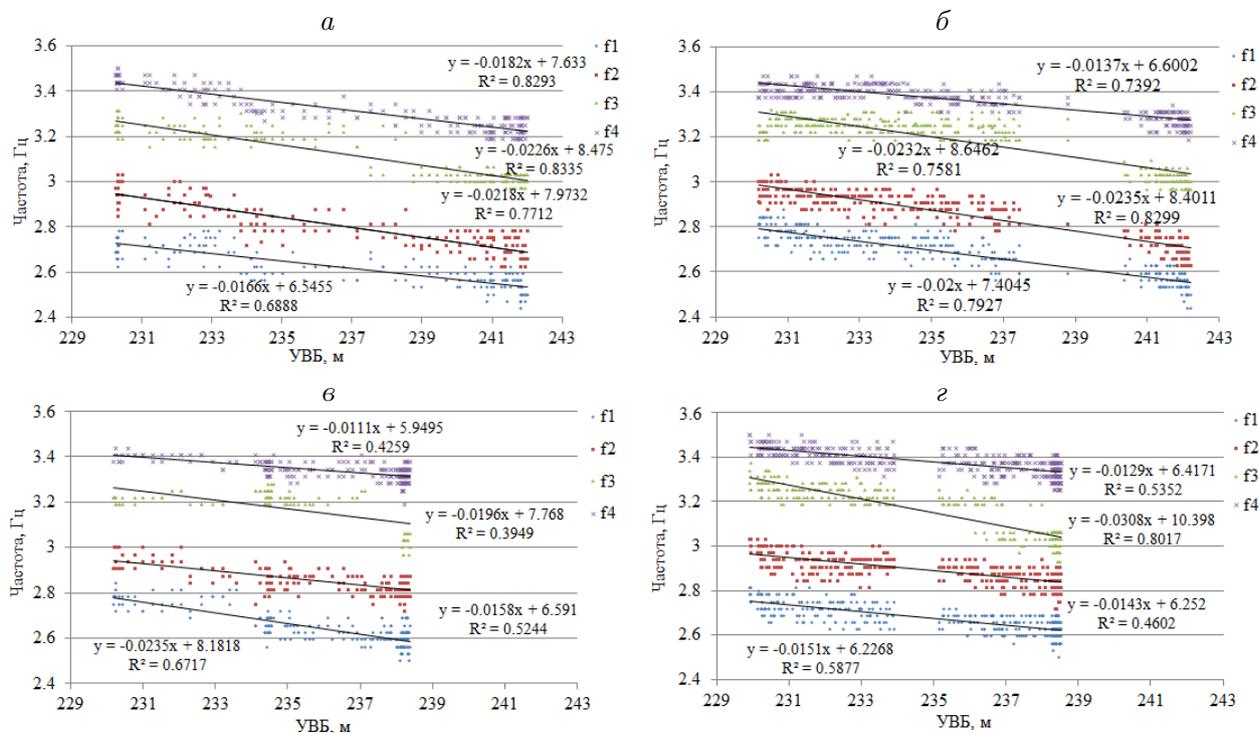


Рис. 7. Зависимость первых четырёх частот собственных форм поперечных колебаний плотины от УВБ: а — в период с 21.04.2010 по 18.08.2010; б — с 19.08.2010 по 11.04.2011; в — с 12.04.2011 по 12.08.2011; г — с 13.08.2011 по 31.03.2012

По данным значений временных рядов первых четырёх частот форм поперечных колебаний плотины Красноярской ГЭС и УВБ построены графики зависимости собственных частот от УВБ за периоды наполнения и сработки водохранилища (рис. 7). Зависимость частот от УВБ аппроксимирована линейными функциями, формулы аппроксимации представлены на графиках. При максимальных и минимальных значениях УВБ разброс значений частот несколько увеличивается, что соответствует переходному процессу от наполнения водохранилища к сработке и наоборот.

Анализ трендов динамических характеристик с учётом влияния сезонных факторов окружающей среды позволяет определять их необратимые изменения и контролировать текущее техническое состояние всего сооружения.

В заключение необходимо отметить, что использование методов и средств сейсмометрического мониторинга позволяет предупреждать возникновение чрезвычайной ситуации, своевременно и обоснованно назначать сроки и объём восстановительных работ или принимать решение о выводе сооружения из эксплуатации.

Список литературы

- [1] БАРЫШЕВ В.Г., КУЗЬМЕНКО А.П., САБУРОВ В.С. и др. Динамическое тестовое обследование плотин под воздействием эксплуатационных динамических нагрузок // Гидротехн. стр-во. 2002. № 10. С. 26–36.
- [2] САБУРОВ В.С., КУЗЬМЕНКО А.П. Обследование зданий повышенной этажности. Инж.-сейсмометр. метод. LAMBERT Academic Publishing, 2013. 175 с.
- [3] КУЗЬМЕНКО А.П., САБУРОВ В.С. Определение упругих свойств бетона плотин ГЭС по скоростям сейсмических волн // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2006. Т. 245. С. 259–269.
- [4] ЗОЛОТУХИН Е.П., КУЗЬМЕНКО А.П. Система контроля динамических характеристик плотин гидроэлектростанций по микросейсмическим колебаниям // Пробл. информатики. 2009. № 4. С. 24–33.
- [5] КУЗЬМЕНКО А.П., ВОРОВЬЁВА Д.Б., КУЗЬМИН Н.Г. Контроль динамических характеристик с помощью системы регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния плотины Красноярской ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 12–21.
- [6] ВОРОВЬЁВА Д.Б., ЗОЛОТУХИН Е.П., КУЗЬМЕНКО А.П. Автоматизированная система регистрации землетрясений и микросейсмических колебаний для мониторинга технического состояния плотин ГЭС: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614526 от 14.05.2013 г.
- [7] КУЗЬМЕНКО А.П., САБУРОВ В.С., КУЗЬМИН Н.Г., ОСЕЕВ В.Г. Определение динамических характеристик плотин под воздействием землетрясений // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 265. С. 15–25.
- [8] ШУЛЬМАН С.В. Влияние водной среды на частоты собственных колебаний массивных плотин // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Бетонные и железобетонные сооружения. Ч. II. 1996. Т. 232. С. 209–222.
- [9] ВОРОВЬЁВА Д.Б., КУЗЬМЕНКО А.П. Программа визуализации и анализа динамических характеристик плотин ГЭС: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013660328 от 30.10.2013 г.

Поступила в редакцию 29 ноября 2013 г.