

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛЯ СТОЯЧИХ ВОЛН В ПЛОТИНЕ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС

Алексей Владимирович Лисейкин

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik1979@mail.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: svsv0428@mail.ru

Зарахман Ашуралиевич Адиллов

Дагестанский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 367008, Россия, г. Махачкала, ул. Белинского, 16, зав. отделом, тел. (8722)67-02-73, e-mail: adilov79@mail.ru

Анализируются собственные колебания арочной плотины Чиркейской ГЭС, выделенные из микросейсмического фона методом когерентного восстановления полей стоячих волн. Экспериментальные работы проводились дважды – при максимальном и минимальном уровнях наполнения водохранилища. Это позволило выявить особенности сезонных изменений поля стоячих волн. Результаты могут быть использованы для мониторинга технического состояния плотины Чиркейской ГЭС.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, метод стоячих волн, собственные частоты, плотина Чиркейской ГЭС.

FEATURES OF SEASONAL CHANGES OF THE FIELD OF STANDING WAVES IN THE DAM OF THE CHIRKEY HPP

Aleksei V. Liseikin

Seismological Division of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)333-25-35, e-mail: lexik1979@mail.ru

Victor S. Seleznev

Seismological Division of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Director, phone: (383)333-20-21, e-mail: svsv0428@mail.ru

Zarahman A. Adilov

Dagestan Division of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 16, Belinsky St., Makhachkala, 367008, Russia, Head of Department, phone: (8722)67-02-73, e-mail: adilov79@mail.ru

The natural oscillations of the arch dam of the Chirkey HPP, isolated from the microseismic background by the method of coherent recovery of standing wave fields, are analyzed. Experimental work was carried out twice - at the maximum and minimum filling levels of the reservoir. This made it possible to identify the features of seasonal changes in the field of standing waves. The results can be used to monitor the technical condition of the Chirkey dam.

Key words: seismic monitoring, standing wave method, natural frequencies, dam of the Chirkey HPP.

Изучение собственных колебаний инженерных сооружений представляет существенный практический интерес в части контроля их технического состояния. Широко распространены способы мониторинга, основанные на слежении за изменением характеристик собственных колебаний во времени. Предполагается, что такие изменения, как появление трещин, ослабленных зон, смена напряженно-деформированного состояния, приводят к изменению параметров поля стоячих волн и, в частности, к изменению значений собственных частот и форм колебаний сооружения.

Плотина Чиркейской ГЭС, являясь самой крупной арочной плотиной России, к тому же расположенной в зоне высокой сейсмической активности, представляет особый интерес. Немаловажным является и тот факт, что возраст данного сооружения достаточно большой (более 50 лет с начала строительства), и уже могут проявляться разнообразные эффекты, связанные со старением строительных материалов, изменением свойств основания плотины и др. Вместе с тем, анализ опубликованной литературы показывает, что другими авторами не проводилось детальных исследований собственных колебаний этой плотины. Лишь в работе [1] по результатам экспериментов, выполненных в 1996 г., были сделаны попытки изучить собственные колебания плотины Чиркейской ГЭС – выделен набор частот, которые, предположительно, могут быть собственными. При этом вопрос идентификации форм для каждой из частот остался открытым.

При исследованиях плотин гидроэлектростанций необходимо учитывать, что значения собственных частот меняются в зависимости от уровня водохранилища. Так, в работе [2] показано, что частоты плотин Саяно-Шушенской, Красноярской и Зейской ГЭС на формах с 1-й по 5-8-ю уменьшаются с возрастанием величины напора. Эти изменения являются сезонными и не связаны с появлением дефектов в конструкции плотин. Для Чиркейской ГЭС таких исследований раньше не проводилось.

В Сибирском отделении ФИЦ ЕГС РАН разработан метод когерентного восстановления полей стоячих волн, позволяющий из микросейсмических колебаний, зарегистрированных в различных точках здания или сооружения, с использованием опорных точек построить детальное поле стоячих волн и определить собственные частоты и формы колебаний объекта [3, 4]. В настоящей работе анализируются собственные колебания арочной плотины Чиркейской ГЭС, полученные этим методом. Экспериментальные работы проводились дважды – при максимальном (результаты опубликованы в работе [5]) и минималь-

ном уровнях наполнения водохранилища (далее – УВБ). Кроме этого, был сделан предварительный анализ изменений значений собственных частот во времени. Это позволило не только детально изучить поле стоячих волн, формирующихся в теле плотины, но и выявить особенности их сезонных изменений. Результаты исследования могут представлять большой интерес для специалистов, занимающихся мониторингом технического состояния плотины Чиркейской ГЭС, а также для проектирования мест установки сейсмометрической аппаратуры [6].

Измерение микросейсмических колебаний выполнялось при помощи автономных трехкомпонентных сейсмостанций «Байкал-АСН» (собственная разработка ФИЦ ЕГС РАН). В качестве сейсмоприемников использовались велосиметры типа GS-20DX. Частотный диапазон регистрируемых колебаний – 1-60 Гц, частота дискретизации 200 Гц. Для выравнивания АЧХ сейсмоприемников в области низких частот использовался хорошо зарекомендовавший себя при сейсмологических исследованиях метод низкочастотной деконволюции цифровой записи короткопериодного сейсмометра [7]. Регистрация проводилась сериями последовательных измерений колебаний 6-ю единицами аппаратуры, одна из которых постоянно находилась в опорной точке. Длительность записи каждого измерения – 10 минут, всего были выполнены регистрации в 287 различных точках, размещенных по 10 профилям на разных уровнях, проходящим или по галереям внутри плотины или по балконам (рис. 1).

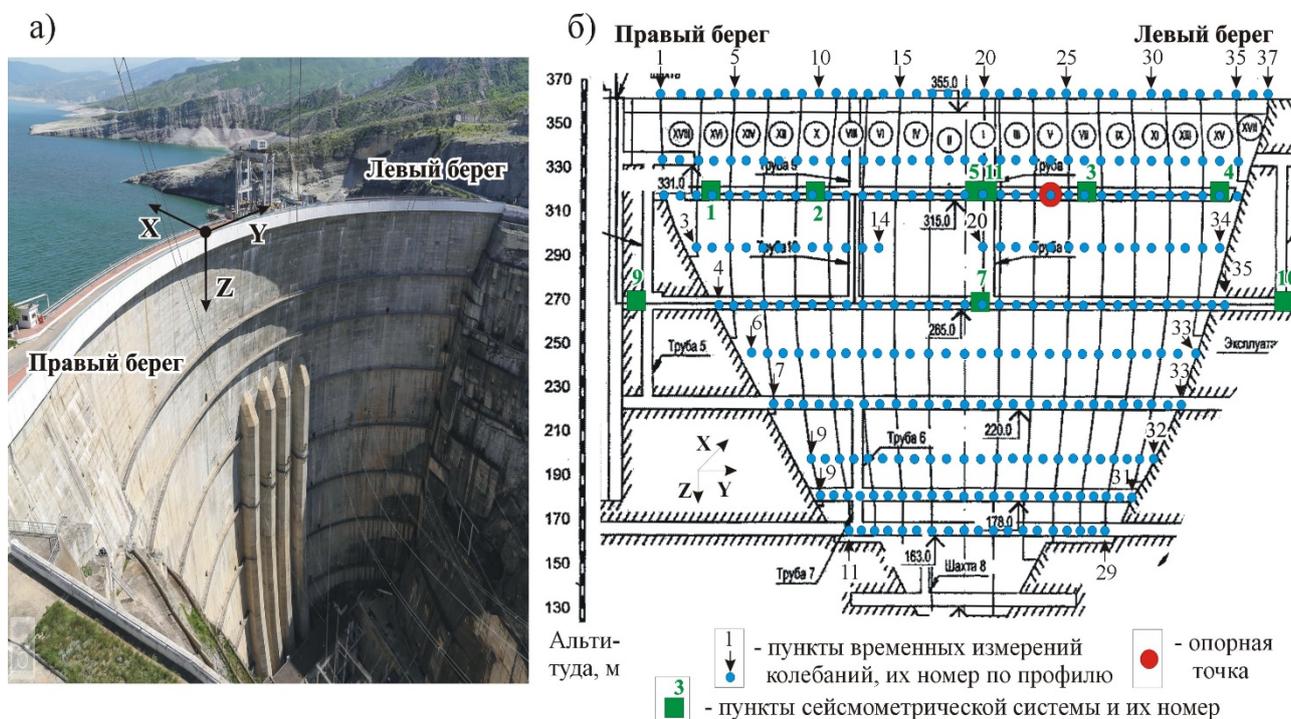


Рис. 1. Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС (а) и реализованная схема сейсмических наблюдений (б)

Ориентация приборов осуществлялась таким образом: X-канал направлен в радиальном относительно плотины направлении, Y – в тангенциальном, Z – в вертикальном. Измерения проводились дважды, в течение двух-трех дней каждое. При этом основная часть измерений проведена 01.11.2017 [5] и 12.04.2018 с уровнями водохранилища (УВБ) 347 м и 318 м, соответственно. Последнее уточнение связано с тем, что, как известно, собственные частоты плотин зависят не только от величины напора, но и от текущего режима – наполнения или сработки водохранилища. Например, в работе [8] по результатам многолетних наблюдений показано, что собственные частоты плотины Саяно-Шушенской ГЭС меняются в пределах 0,1-0,2 Гц, эти изменения сезонные и в большей степени зависят от УВБ. Последующие исследования [9] показали, что существуют дополнительные факторы, которые также влияют на текущие значения собственных частот плотины. Как мы увидим далее, подобные эффекты проявляются и для плотины Чиркейской ГЭС, что необходимо учитывать при мониторинге технического состояния данного сооружения.

После проведения регистрации была выполнена цифровая обработка данных для пересчета разновременных колебаний в одновременные согласно методике [3]. Отметим, что для этого используются фильтры Винера, которые пропускают стоячие волны, являющиеся когерентными, и отфильтровывают некогерентные сигналы, к которым относятся бегущие волны-помехи. Кроме этого, в методе когерентного восстановления полей стоячих волн имеются средства, позволяющие оценивать погрешность получаемых в результате пересчета амплитуд стоячих волн, которая тем меньше, чем большее время регистрации в каждой точке. В данном случае, при длительности регистрации 10 минут, погрешности восстановления амплитуд не превышали 3-5%, как и на большинстве подобных объектов.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают изменения амплитудных спектров когерентных колебаний по результатам двух экспериментальных работ – при максимальном и минимальном УВБ вдоль профиля, проходящего в галерее плотины на уровне 315 м. Отметим, что в обоих случаях подавляющая часть энергии колебаний сосредоточена на X-компоненте, направленной поперек плотины. Заметно, что в поле колебаний есть как общее, так и различие. Так, колебания 1-й, 2-й и 4-й форм (номер формы принят равным количеству наблюдаемых пучностей вдоль профиля), хотя и с разными частотами и интенсивностями, повторяются при максимальном и минимальном уровнях наполнения водохранилища. Кроме этого, на частотах 2,78 Гц и 2,98 Гц отмечается колебание с одной пучностью, которое можно классифицировать, как вторую 1-ю форму. Остальные колебания менее выражены и не повторяются по форме при разных уровнях наполнения водохранилища. Можно сказать, 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 напряженно-деформированного состояния плотины при изменении УВБ.

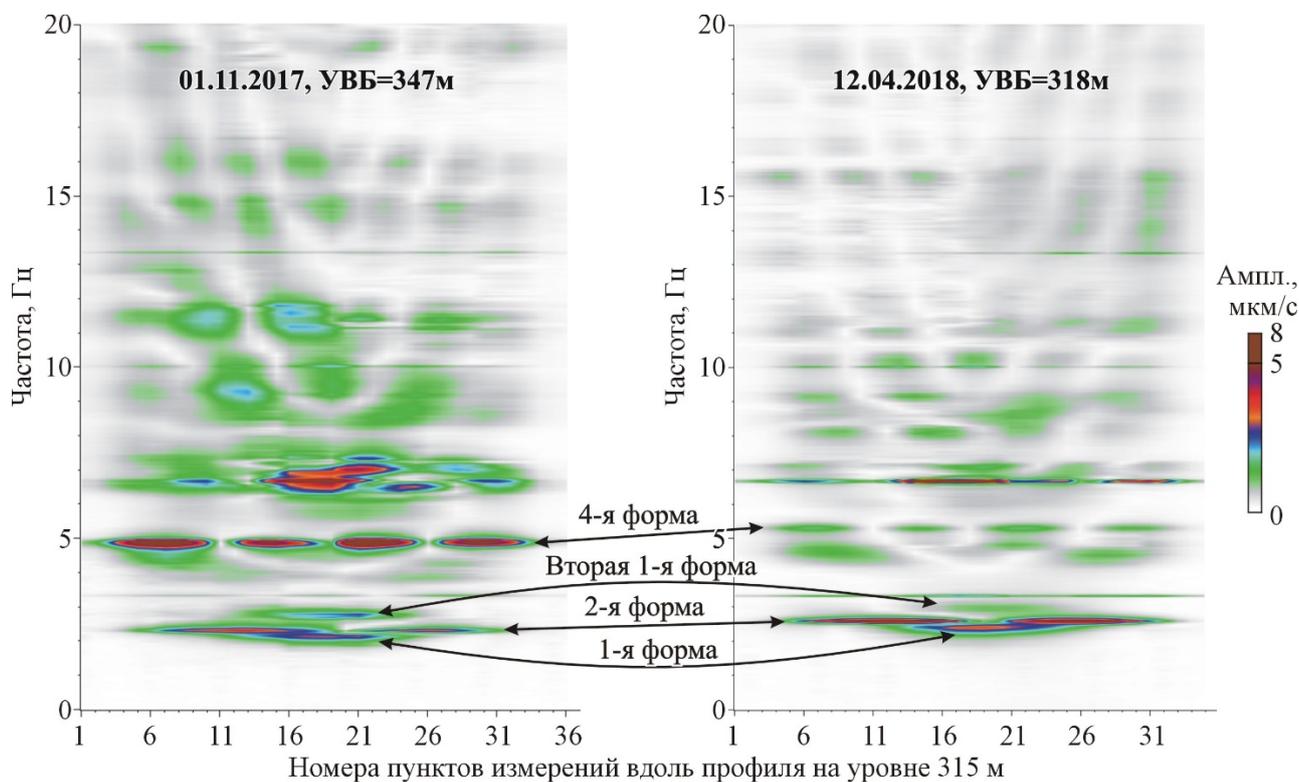


Рис. 2. Изменения амплитудных спектров поперечных колебаний плотины при максимальном и минимальном уровнях водохранилища

Из рис. 3, на котором представлены схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й форм собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС, видно, что при максимальном и минимальном УВБ они практически не меняются, а меняются только частоты. Заметны лишь некоторые искажения формы 1-й моды, которые, предположительно, связаны с затягиванием колебаний 2-й моды, по частоте близкой к 1-й. Это возможно из-за пониженной добротности колебаний и наблюдалось нами на многих других исследованных зданиях и сооружениях.

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

Был проведен анализ ежедневных изменений выделенных собственных частот плотины Чиркейской ГЭС за 2016 год, которые определялись по усредненным спектрам микросейсмических колебаний, зарегистрированных в теле плотины существующей сейсмометрической системой. При этом частоты определялись по данным с точек наблюдений, расположенных в пучностях стоячих волн, в соответствии с методикой, описанной в работе [6]. Для двух 1-х мод –

это данные с точки № 5, а для 2-й – с точки № 3 (см. рис. 1). К сожалению, пункты наблюдения расположены таким образом, что они оказались преимущественно вблизи узлов 4-й моды. Это не позволило достоверно определять значения соответствующей собственной частоты. Возможно, после модернизации сейсмометрическая система будет дополнена пунктами наблюдения в пучности 4-й формы и это станет возможным.

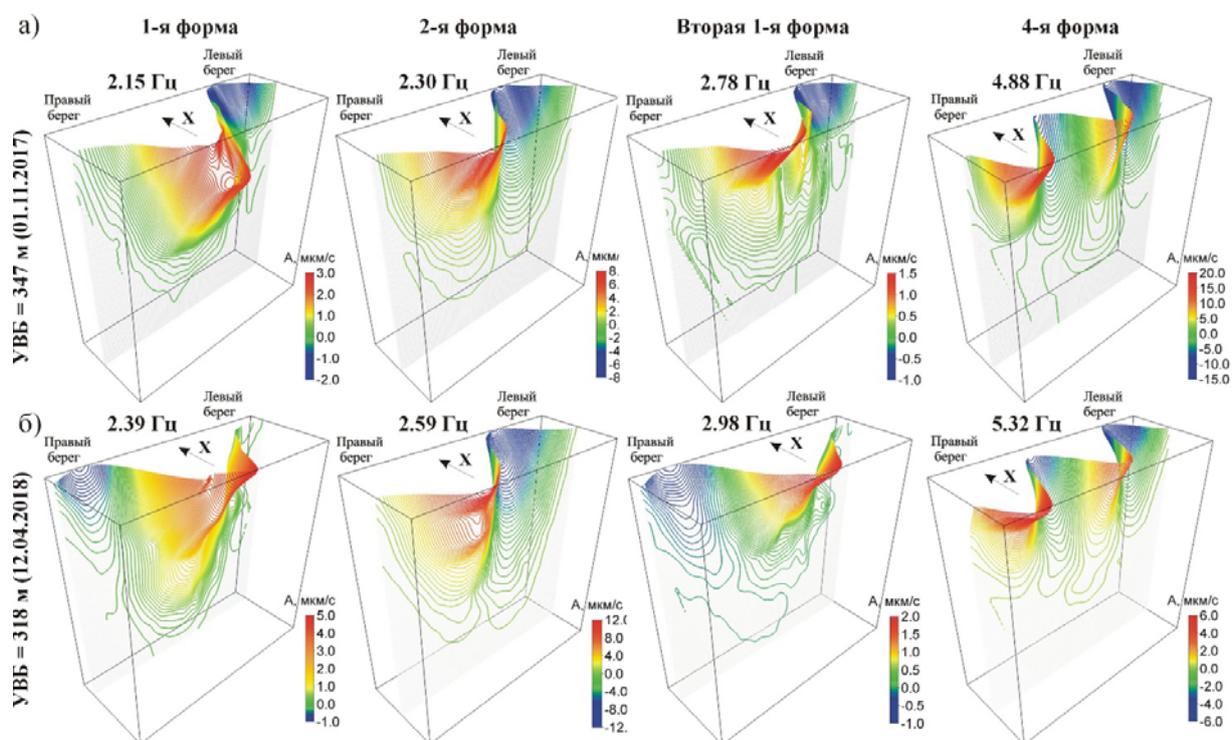


Рис. 3. Схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й форм поперечных колебаний плотины Чиркейской ГЭС при высоком (а) и низком (б) УВБ

Как видно из рис. 4, а, где представлены ряды изменения за годовой период уровня водохранилища и значений частот двух 1-х и 2-й форм, существует обратная корреляционная связь между изменениями УВБ и значениями частоты – с ростом уровня воды частота понижается. Вместе с тем, из рис. 4, б видно, что существует эффект гистерезиса в зависимости между УВБ и частотой, т. е. при равном УВБ, но при разных режимах сработки или наполнения водохранилища, значения частот отличаются на величину до 0,05 Гц. Аналогичный эффект был замечен нами при исследованиях по мониторингу собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС [9]. Связан он, предположительно, с процессами релаксации тела плотины (а, возможно, и всей системы плотина-основание) на изменяющееся давление воды со стороны водохранилища. Такие эффекты нужно изучать и учитывать при проведении мониторинга технического состояния плотин. В противном случае, могут быть сделаны неверные выводы относительно их технического состояния.

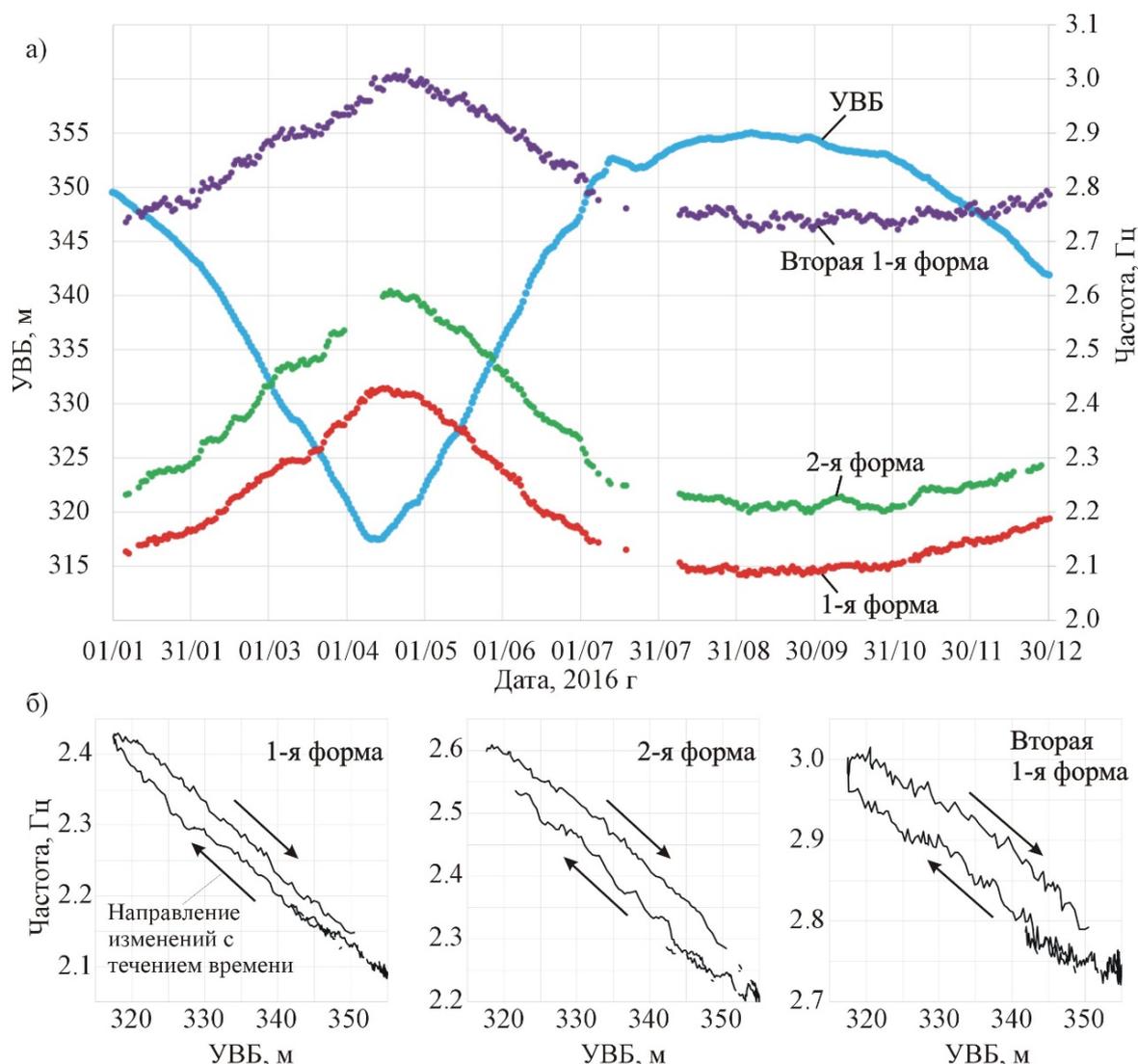


Рис. 4. Зависимости собственных частот плотины Чиркейской ГЭС от времени (а) и от уровня водохранилища (б) в 2016 году

Основные результаты, полученные при исследовании собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС, следующие:

1. Выполнены детальные исследования плотины методом когерентного восстановления полей стоячих волн при максимальном и минимальном УВБ с определением частот и форм собственных колебаний.

2. Установлено, что полное поле стоячих волн меняется при изменении УВБ, а неизменными остаются две 1-х, 2-я и 4-я формы собственных колебаний, частоты которых, в целом, уменьшаются с ростом уровня водохранилища. Данные формы можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины путем периодического определения значений частот по записям сейсмической аппаратуры.

3. Определено, что существуют дополнительные факторы, приводящие к эффекту гистерезиса в зависимости между значениями УВБ и собственными

частотами, предположительно, связанные с релаксационными процессами в теле плотины или в системе плотина-основание после изменения напора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Результаты динамических испытаний плотины Чиркейской ГЭС методом собственных малоамплитудных колебаний / А.И. Савич, В.И. Бронштейн, В.Г. Бовенко, М.Е. Грошев, А.Н. Гашин, М.М. Ильин // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта. – 2000. – Вып. 159. – С. 373 -382.
2. 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.
3. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах, С.А. Гриценко, И.А. Данилов, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Г.И. Татьков // Геология и геофизика. – 2002. – Т.43. – № 2. – С. 192-207.
4. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20-24.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилев З.А. Собственные частоты и формы колебаний арочной плотины Чиркейской ГЭС по данным метода стоячих волн // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 12. – С. 2-7.
6. Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, Р.Ш. Альжанов, П.В. Громыко: патент на изобретение RUS 2546056 от 18.06.2013.
7. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. – 2001. – Т.42. – № 5. – С. 852 -863.
8. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Кречетов Д.В. О мониторинге состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе совместного анализа изменений ее собственных частот и уровня водохранилища // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 2. – № 2. – С. 58–62.
9. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Кречетов Д.В. О мониторинге технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по изменениям ее собственных частот // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Десятая научно-технич. конф.: сб. докладов и выступлений (Санкт-Петербург, 20-22 октября, 2016 г.). – СПб: Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2017. – С. 55-60.

© А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, З. А. Адилев, 2019