

О ВОЗМОЖНОСТИ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Иван Васильевич Коковкин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер-геофизик, тел. +7 (913) 921-74-85, e-mail: titanoks1@yandex.ru

Павел Владимирович Громыко

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. +7 (993) 022-35-30, e-mail: gromykov@mail.ru

Алексей Александрович Брыксин

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. +7 (913) 914-92-68, e-mail: fater.gs@gmail.com

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, д.г.-м.н., директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, тел. +7 (383) 333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Инженерные здания и сооружения являются объектами повышенной ответственности. При определенных условиях здания и сооружения подвержены негативным воздействиям, вызванным влиянием на них различных естественных (активация разломов, землетрясения, размывание, промерзание и т.п.) и техногенных факторов. Ввиду этого, при эксплуатации необходимо как контроль технического состояния объекта, так и действующих на него динамических воздействий, возможно несущих опасность как для конструкции в целом, так и для ее частей. Основой для развития метода контроля являются результаты исследования, посвященного изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В данной работе показаны первые результаты регистрации и анализа полученных сейсмических материалов с сейсмостанций вблизи Новосибирской ГЭС и на удалении от нее порядка 16 км. Из зарегистрированных сейсмических колебаний выделены сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия от работающего оборудования Новосибирской ГЭС. Показана возможность отслеживания изменения режимов работы гидроагрегатов на достаточном удалении от самого объекта. Показано преобразование полученного сигнала методом вычитания помех для улучшения соотношения сигнал/шум.

Ключевые слова: Новосибирская ГЭС, техногенные воздействия, сейсмический мониторинг, обратная частота, лопастная частота, коэффициент корреляции, гидроагрегат

POSSIBILITIES OF REMOTE MONITORING OF THE NOVOSIBIRSK HPP HYDRAULIC UNITS OPERATION ACCORDING TO SEISMOLOGICAL OBSERVATIONS

Ivan V. Kokovkin

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., geophysicist, tel.: +7 (913)921-74-85, e-mail: titanoks1@yandex.ru

Pavel V. Gromyko

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., researcher, tel.: +7 (993)022-35-30, e-mail: gromykopv@mail.ru

Alexey A. Bryksin

Seismological Department of GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave, senior researcher, tel.: +7 (913)914-92-68, e-mail: fater.gs@gmail.com

Victor S. Seleznev

Seismological Department of FRC GS RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Dr. Sc., director GS SB RAS, tel.: +7 (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Engineering buildings and structures are objects of increased responsibility. Under certain conditions, buildings and structures are subjects to negative impacts caused by various environmental factors (activation of faults, earthquakes, erosion, freezing, etc.) and technological factors. During operation, it is necessary to control the technical condition of the object and the existing dynamic effects, possibly danger, for the structure and for its parts. The basis for the development of the control method is the results of research devoted to the study of the dynamic effects arising in the dams and the structures hydroelectric power station. This paper shows the results of the analysis of the obtained seismic materials from seismic stations near the Novosibirsk hydroelectric power station and at a distance of about 16 km from it. From the recorded seismic vibrations, signals were identified, the sources of which are the technogenic effects of the operating equipment of the Novosibirsk hydroelectric power station. The possibility of tracking changes in operating modes of hydraulic units at a great distance from the object itself is shown. Shown is the transformation of the received signal by the noise subtraction method to improve the signal-to-noise ratio.

Keywords: Novosibirsk hydroelectric power station, technogenic impacts, seismic monitoring, turnover frequency, blade frequency, correlation coefficient, hydraulic unit

Данная работа посвящена развитию метода инженерно-сейсмического мониторинга, разработанного в ФИЦ ЕГС РАН [1], и основана на результатах исследований по изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В ряде работ [2-5] показана возможность мониторинга технического состояния сооружения ГЭС, основанная на слежении за изменением его собственных частот, и показан способ осуществления дистанционного контроля над вибрационным состоянием промышленного оборудования по данным, полученным с сейсмических станций, удаленных от гидроэлектростанций на несколько километров.

В данном исследовании показан подход для отслеживания работы промышленного оборудования Новосибирской гидроэлектростанции (далее НГЭС) на гораздо большем удалении.

Для анализа были использованы трехкомпонентные сейсмические записи, полученные на сейсмостанции «Ключи» (далее Ключи), которая расположена в посёлке Каменушка, в 16 км от гидроэлектростанции НГЭС. Для регистрации сигнала использован регистратор «Байкал-8» и сейсмоприемник «GD-4.5», установленный на десятиметровую трубу скважины со следующей ориентацией осей: Z – вертикально, N – север и E – восток. Полученные данные сопоставлялись с результатами регистрации сейсмической станции НГЭС (NHES) Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН, расположенной вблизи от Новосибирской ГЭС (500 м). Станция «NHES» оснащена трехкомпонентным широкополосным высокочувствительным сейсмометром «Guralp CMG-3EPCD». Ориентация осей соответствует станции Ключи. Схема расположения сейсмостанций и НГЭС представлена на рис. 1.

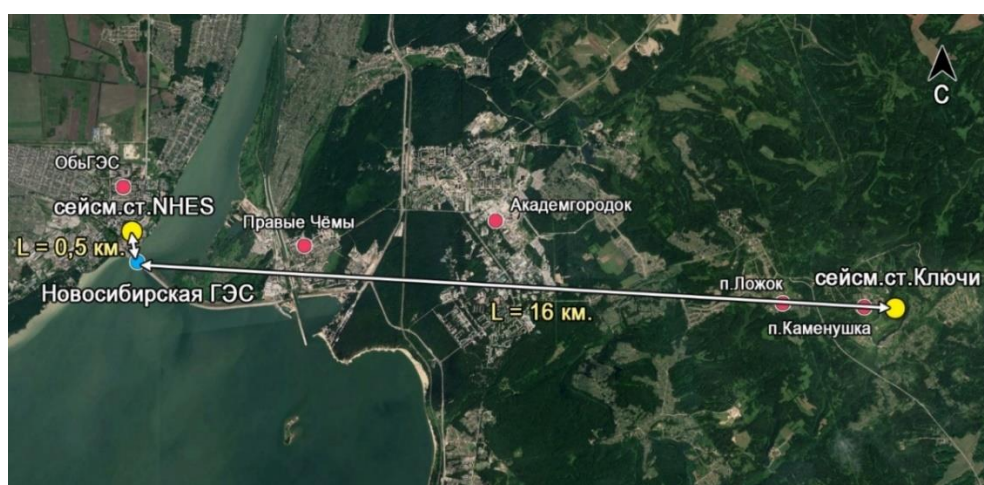


Рис. 1. Схема расположения сейсмостанций

В качестве изучаемого сигнала рассматривались колебания на лопастной частоте семи гидроагрегатов НГЭС мощностью 70 МВт, включающих в себя вертикальные поворотно-лопастные турбины ПЛ 30-В-800 и гидрогенераторы СВ 1343/140-96 УХЛ4. Формально лопастная частота рассчитывается как произведение количества лопастей на рабочем колесе турбины на оборотную частоту вращения ротора. Обратная частота является результатом деления частоты переменного тока в сети (50 Гц), на число полюсов гидрогенератора (48 единиц), и составляет порядка 1.04 Гц. При учете, что турбина включает в себя пять лопастей, лопастная частота равна 5.21 Гц.

Для обработки зарегистрированных данных использовано программное обеспечение «Spectrum», разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данное программное обеспечение позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы, позволяя определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A_{\omega}(t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (1)$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 250$ с, шаг окна 50 сек).

На рис. 2 представлены спектры сигналов, зарегистрированных на сейсмостанциях НГЭС и Ключи. Из рисунка видно, что в спектрах присутствует монохроматический сигнал с частотой 5.2 Гц. На станции НГЭС, ввиду её малой удаленности, исследуемый сигнал имеет наиболее высокие значения. Также в спектре видны кратные для оборотной (1.04 Гц) частоты.

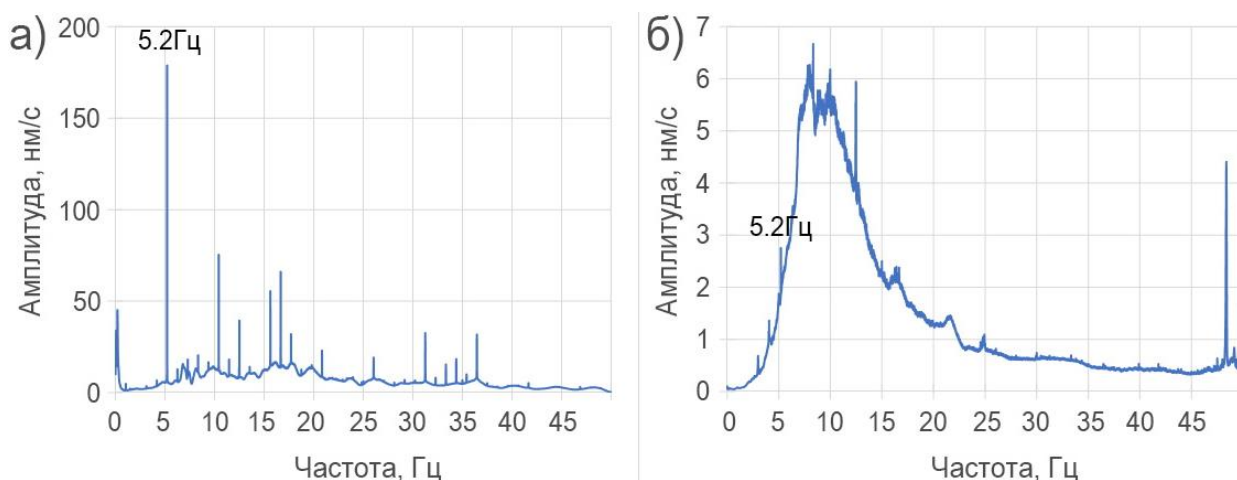


Рис. 2. Графики усредненного спектра сейсмической записи зарегистрированной на (а) сейсмостанции НГЭС и на (б) сейсмостанции Ключи. Z-компонента

На текущем спектре с записи удаленной станции Ключи исследуемая частота сигнала проявлялась только на вертикальной компоненте и имела сравнительно низкие значения. Для сопоставления данных, зарегистрированных удаленной и приближенной к Новосибирской ГЭС сейсмостанциями, был выбран период с 15 по 22 января 2021 года. В данный период на текущих спектрограммах записей наблюдались скачкообразные изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, вызванные изменением работы оборудования на НГЭС (рис. 3).

На рис. 4 представлены графики изменения амплитуд Z-компоненты колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные с записей сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый), в период с 15 по 22 января 2021 г. Наблюдается хорошая корреляция между сигналами с двух станций, несмотря на отличие по амплитуде более чем в 40 раз. Следовательно, можно сделать вывод, что даже на расстоянии 16 км возможно отслеживать режимы работы оборудования на ГЭС.

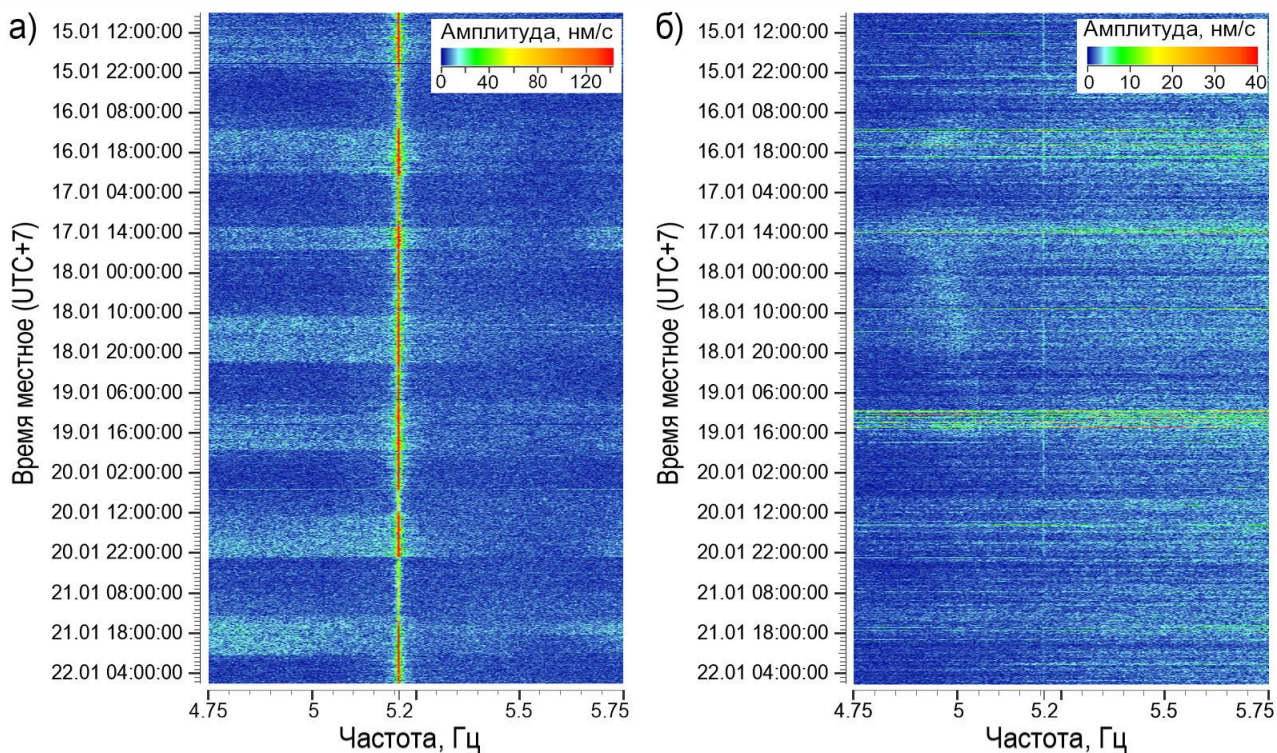


Рис. 3. Спектрограммы сигналов по сейсмостанции НГЭС (а) и сейсмостанции Ключи (б) с 15 по 22.01.2021 г в вырезке с 4.75 до 5.75 Гц. Z-компонента



Рис. 4. Графики изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

Была проведена оценка схожести полученных сигналов. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона, определяемый следующими параметрами:

Пусть $(X_1, \dots, X_n), (Y_1, \dots, Y_n)$ – набор значений двух факторов на выборке объёма n .

Выборочный коэффициент корреляции (т.е. коэффициент корреляции, определяемый по выборке) равен:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_j}{n}$.

Применив формулу (2) к данным, отображенным на рис. 4, было получено значение $r=0.7859$. Результат не дает однозначной связи между двумя рядами данных. Это может быть связано как с неоднородностью среды между двумя точками наблюдения, так и с возникающими помехами техногенного и естественного происхождения.

Следующим шагом была предпринята попытка отфильтровать основной сигнал от существующих фоновых помех.

Известно, что колебания, несущие информацию о работе оборудования, имеют высокую добротность и сосредоточены в области частоты 5.2 Гц. Исходя из этого было сделано следующее предположение: если вычесть из амплитуды колебаний на частоте исследуемого сигнала (5.2 Гц), амплитуду соседнего фона (например, амплитуду колебаний на частоте 5.1 Гц, которая содержит информацию только о локальных микросейсмах), возможно улучшить соотношение сигнал/помеха.

На рис. 5 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц с 15 по 22 января 2021 г. Синим цветом представлены графики изменения значения колебаний, зарегистрированных на станции НГЭС, оранжевым – на станции Ключи. Полученное значение коэффициента корреляции (2) возросло до значения $r=0.83846$. Получен результат, подкрепляющий вышеописанную гипотезу.

С другой стороны, если рассматривать не весь временной интервал, а в среднем сутки, то коэффициенты меняются. На рис. 6 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц за 16 и 17 января 2021 г. Видно, что полученные значения коэффициентов несколько различаются: в период за 16 января 2021 г значение $r=0.92091$, а за 17 января 2021 г значение $r=0.82336$.

Возможно, что полученные коэффициенты корреляции зависят от колебаний на оборотной частоте 1.04 Гц, которая ведет себя нелинейно относительно колебаний на лопастной частоте. На рис. 7 изображены графики изменения амплитуд колебаний на лопастной (а) и оборотной частоте (б). На графиках хорошо видно, что максимальное значение коэффициента $r=0.92091$ было получено в то время, когда колебания на оборотной частоте почти не менялись (интервал 1). А более низкие значения $r=0.82336$ отвечают моменту резкого роста амплитуд на оборотной частоте (интервал 2).

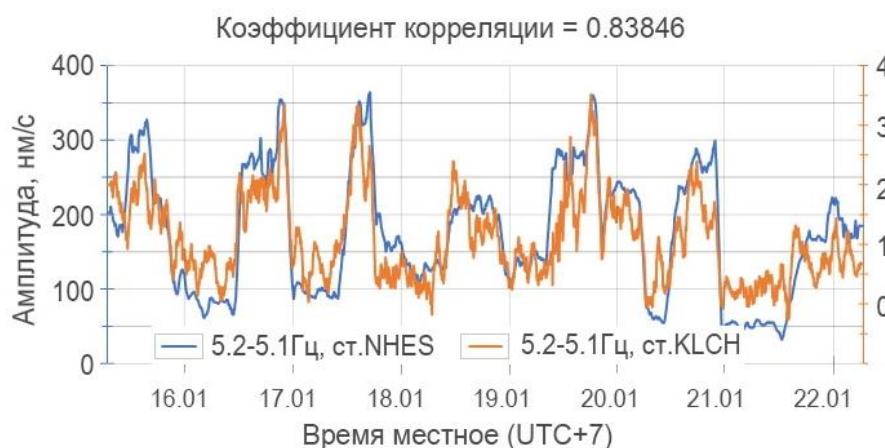


Рис. 5. График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

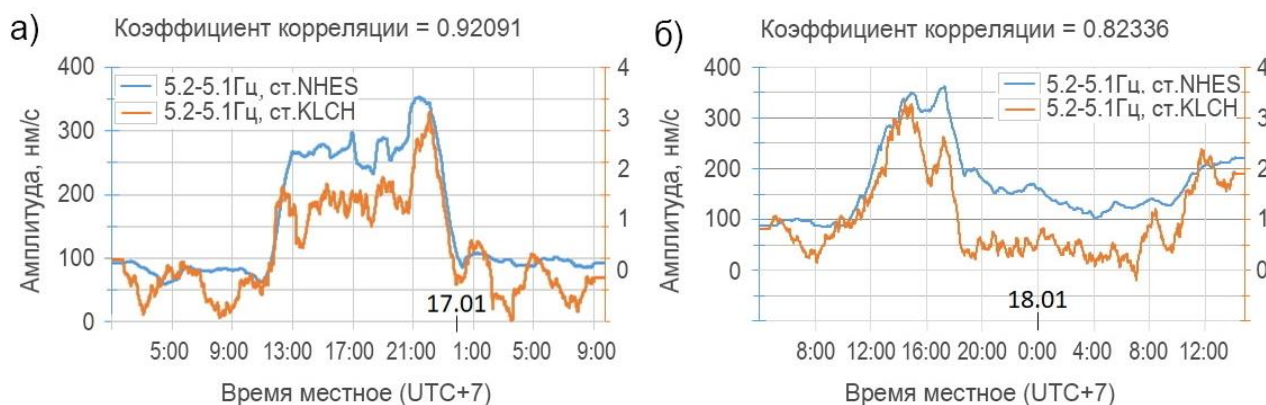


Рис. 6. График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) 16(а) и 17(б) января 2021 г. Z-компонента

Заключение

В результате проведенного исследования показана возможность отслеживания режимов работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС на удалении 16 км от источника, несмотря на достаточный уровень помех.

Показан способ математического преобразования сейсмической записи для улучшения соотношения сигнал/помеха, основанный на разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на выделенной частоте относительно фона. Данный способ требует как доработки, так и дополнительной апробации, ввиду полученных различных значений коэффициентов корреляции в различные временные промежутки.

Для дальнейшего анализа необходима информация о работе оборудования с гидроэлектростанции.

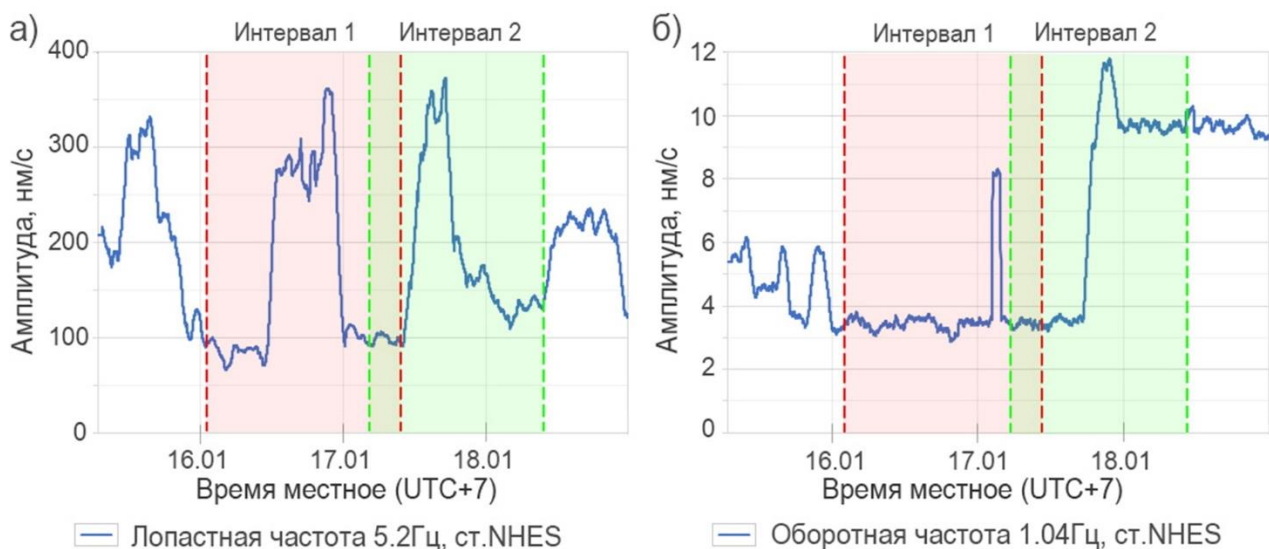


Рис. 7. График изменения амплитуд колебаний на лопастной 5.2 Гц (а) и оборотной частоте 1.04 Гц (б), полученные на сейсмостанции НГЭС. Z-компонента

Авторы выражают благодарность коллегам из Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН за содействие и предоставленные материалы.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: Патент на изобретение РФ, № 2461847 // Бюл. № 26. 20.09.2012.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А., Ting-Yu H., Argyianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. 2019. – Т. 1. № 1. – С. 23-34.
3. 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. Приложение на CD-диске: доклады и выступления на секциях конференции: [Электронный ресурс]. 2017. – С. 55-60.
4. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. Методика дистанционного контроля над состоянием оборудования и сооружений гидроэлектростанций по данным сейсмических наблюдений // Гидроэлектростанции в XXI веке. Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. – 2016. – С. 80-87.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. О мониторинге оборудования и сооружений крупных ГЭС на основе данных сейсмических наблюдений //

REFERENCES

1. Seleznev V.S., Liseykin A.V., Bryksin A.A. Sposob nepreryvnogo monitoringa fizicheskogo sostoyaniya zdaniy i/ili sooruzheniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya: Patent na izobreteniyе RF. № 2461847 // Byul. № 26. 20.09.2012
2. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A., Ting-Yu H., Arygianni V. Osobennosti monitoringa sobstvennykh chastot plotin gidroelektrostantsiy (na primere Chirkeyskey GES) // Rossiyskiy seysmologicheskiy zhurnal. 2019. – T. 1. № 1. – S. 23-34.
3. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Krechetov D.V. O monitoringe tekhnicheskogo sostoyaniya plotiny Sayano-Shushenskoy GES po izmeneniyam eye sobstvennykh chastot // Hidroenergetika. Gidrotekhnika. Novyye razrabotki i tekhnologii. Prilozheniye na CD-diske: doklady i vystupleniya na sektsiyakh konferentsii: [Elektronnyy resurs]. 2017. – S. 55-60.
4. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Gromyko P.V., Krechetov D.V. Metodika distantsionnogo kontrolya nad sostoyaniyem oborudovaniya i sooruzheniy gidroelektrostantsiy po dannym seysmicheskikh nablyudeniy // Hidroelektrostantsii v XXI veke. Sbornik materialov III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh. spetsialistov. aspirantov i studentov. – 2016. – S. 80-87.
5. Liseykin A.V., Seleznev V.S., Gromyko P.V., Krechetov D.V. O monitoringe oborudovaniya i sooruzheniy krupnykh GES na osnove dannykh seysmicheskikh nablyudeniy // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy XI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. – 2016. – S. 181-185.

© *И. В. Коковкин, П. В. Громько, А. А. Брыксин, В.С. Селезнев, 2021*