

## Влияние температуры на изменение частот стоячих волн сооружений по данным сейсмических наблюдений

*П. В. Громыко<sup>1\*</sup>, В. С. Селезнев<sup>1</sup>, А. В. Лисейкин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сейсмологический филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: GromykoPV@mail.ru

**Аннотация.** Здания и сооружения являются объектами повышенной ответственности. При определенных условиях они подвержены негативным воздействиям, вызванным влиянием на них различных естественных и техногенных факторов. Ввиду этого, при эксплуатации необходимо как контроль технического состояния объекта, так и влияющих на него динамических воздействий, возможно несущих опасность как для конструкции в целом, так и для ее частей. В СЕФ ФИЦ ЕГС РАН был разработан способ непрерывного мониторинга физического состояния сооружений, позволяющий определять значения собственных частот сооружений, используя записи непрерывно регистрирующей сейсмостанции и, в случае обнаружения значительных отклонений их от первоначальных значений, делать выводы о причинах изменения динамического состояния сооружения. В данном исследовании будут показаны результаты подобных работ в рамках инфраструктуры Академгородка города Новосибирска, где представлены результаты наблюдений частот собственных колебаний нескольких жилых домов. В процессе наблюдений выявлено влияние на них внешней температуры - рост температуры окружающей среды приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к уменьшению значений. Наибольшее изменение частоты собственных колебаний зданий происходит в летнее время, при температурах более 30 градусов С°, когда появляется большой контраст между дневной и ночной температурами.

**Ключевые слова:** частота собственных колебаний, мониторинг зданий, температурное воздействие

## Seasonal influence of temperature on changes in the frequencies of standing waves of structures according to seismic observations

*P. V. Gromyko<sup>1\*</sup>, V. S. Seleznev<sup>1</sup>, A. V. Liseikin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Seismological Department of Federal Research Center of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: GromykoPV@mail.ru

**Abstract.** Buildings and structures are objects of increased responsibility. Under certain conditions, they are subject to negative impacts caused by the impact of various natural and man-made factors on them. It is necessary to monitor both the technical condition of the object and the dynamic influences acting on it, possibly carrying danger both for the structure and for its parts. SEF USGS RAS has developed a method for continuous monitoring of the physical condition of structures, which allows determining the values of natural frequencies of structures from records of a continuously recording seismic station and, if significant deviations from their initial values are detected, drawing conclusions about the condition of structures. reasons for changing the dynamic state of the structure. This study will show the results of such work within the framework of the infrastructure of the Akademgorodok of Novosibirsk, where the results of observations of the natural oscillation

frequencies of several residential buildings are presented. During the observations, the influence of external temperature on them was revealed - an increase in ambient temperature leads to an increase in the values of the frequency of natural oscillations, and a decrease in temperature leads to a decrease in values. The greatest change in the frequency of natural vibrations of buildings occurs in summer, at temperatures above 30 degrees C<sup>0</sup>, when there is a great contrast between daytime and nighttime temperatures.

**Keywords:** natural oscillation frequency, monitoring of buildings, temperature impact

### *Введение*

Любые сооружения подвержены внешним воздействиям, вызванным изменением природных условий, влиянием естественных и техногенных факторов. К естественным воздействиям можно отнести деформации грунтового основания сооружения, движения земной коры, изменение сезонно-климатических условий, изменения физико-химического состояния конструкции сооружения и прилегающих пород, сейсмические воздействия и т.п. Техногенные факторы – следствие деятельности человека: вибрация, создаваемая работой массивных систем гидроузлов, водосбросов и техники, также может привести к появлению конструктивных дефектов. На сегодняшний день, для определения дефектов и контроля их возникновения одним из самых распространенных и эффективных инструментов является использование различных систем мониторинга.

В работах [1,2,3,4] приведены основные типы статического (влияние ветра, температуры, деформации, напряжения и т.д.), динамического (вибрации оборудования, окружающей среды и т.д.), визуального мониторинга инженерных сооружений. Одним из основных видов мониторинга состояния целостности сооружений является вибрационный метод, который подразумевает использование стороннего источника возбуждения колебаний (вибратора) и создание резонанса в конструкциях сооружения.

В работах [5,6,7,8,9] предложены варианты мониторинга инженерных сооружений, основанные на накоплении и выделении из сигнала собственных колебаний, предложены различные подходы к интерпретации и обработке материала.

На сегодняшний день в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН разрабатываются методы непрерывного мониторинга физического состояния сооружений, позволяющие определять значения собственных частот сооружений, используя записи непрерывно регистрирующей сейсмостанции. Данная работа основана на результатах подобных исследований, проведенных на крупных плотинах. В результате применения метода [10] на Саяно-Шушенской и Бурейской ГЭС были выделены сезонные изменения частот собственных колебаний [11,12,13]. В данном исследовании будут показаны результаты применения данного способа мониторинга в рамках инфраструктуры города Новосибирска. Будет показано, что при изменении температуры среды также меняются собственные частоты сооружений.

### *Методы и материалы*

Основная задача исследования - оценка влияния температуры на собственные колебания зданий, расположенных в городе Новосибирске. Исследуемые

объекты представляют собой многоэтажные здания, на верхних этажах которых установлены пункты наблюдения (рис. 1). Каждый пункт наблюдения состоит из трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-4.5, GD-10) и автономного сейсмического регистратора («Байкал-7», «Байкал-8»).

Регистраторы устанавливаются в точках измерений, в непосредственной близости от сейсмических датчиков. Запись производится в непрерывном режиме с постоянной передачей данных на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН или стартопном режиме (по таймеру или критериям).

Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников, следующие: X – направлены вдоль узкой части сооружения, Y – вдоль длинной части сооружений, Z - вертикально.

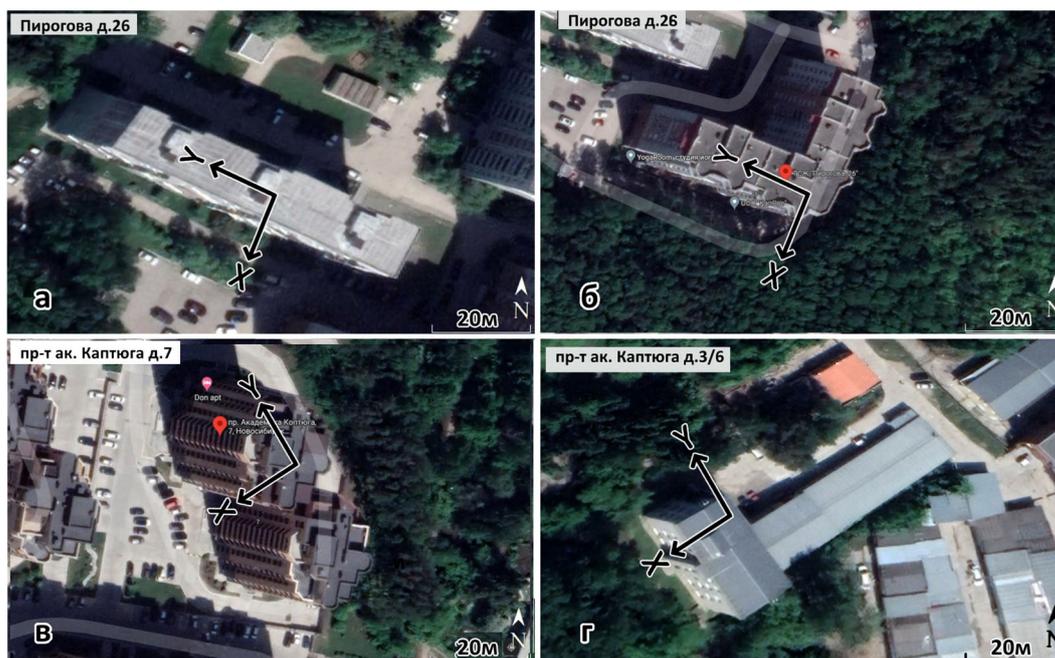


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений и их ориентация: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 22 (а), ул. Пирогова, д. 28 (б), проспект академика Коптюга, д. 7 (в), проспект академика Коптюга, д. 3/6 (г)

Для обработки зарегистрированных данных использован метод построения спектрограмм, разработанный в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данный метод позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектрограммы, которые позволяют определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи сигнал от источника определенной частоты (пример спектрограммы изображен на рис. 2). Для получения количественных оценок, строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

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

где  $f(\tau)$  – зарегистрированный сейсмический сигнал,  $\omega$  – частота, для которой строится график,  $t$  – текущее время,  $T$  – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно  $T = 100$  с, шаг окна 100 с).

### Результаты

Ранее было проведено исследование здания по адресу ул. Пирогова 28 методом стоячих волн [14], результатом которого стало определение частот его собственных колебаний. В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяются 4 собственных частоты, отвечающих по порядку с 1-й по 4-ю формам колебаний конструкции (Гц): 1.91; 2.10; 3.19; 5.93, в направлении Y (вдоль здания) в колебаниях здания выделяются 2 собственные частоты: 2.50 Гц и 7.25 Гц.

На рис. 2 представлены результаты обработки данных, зарегистрированных в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова, д. 28, в летний период (с 29.05.2021 по 09.06.2021). Видно, что с течением времени значения собственных частот сооружения меняются. Если изменение частоты в зимний период, как вариант, можно связать с присоединённой массой снега, аналогично [11,12,13], то в летний период этот фактор исключается. На рис. 2.а приведены усредненные спектры X-компонент записи, зарегистрированной на пункте наблюдения в период с 29.05.2021 по 09.06.2021.

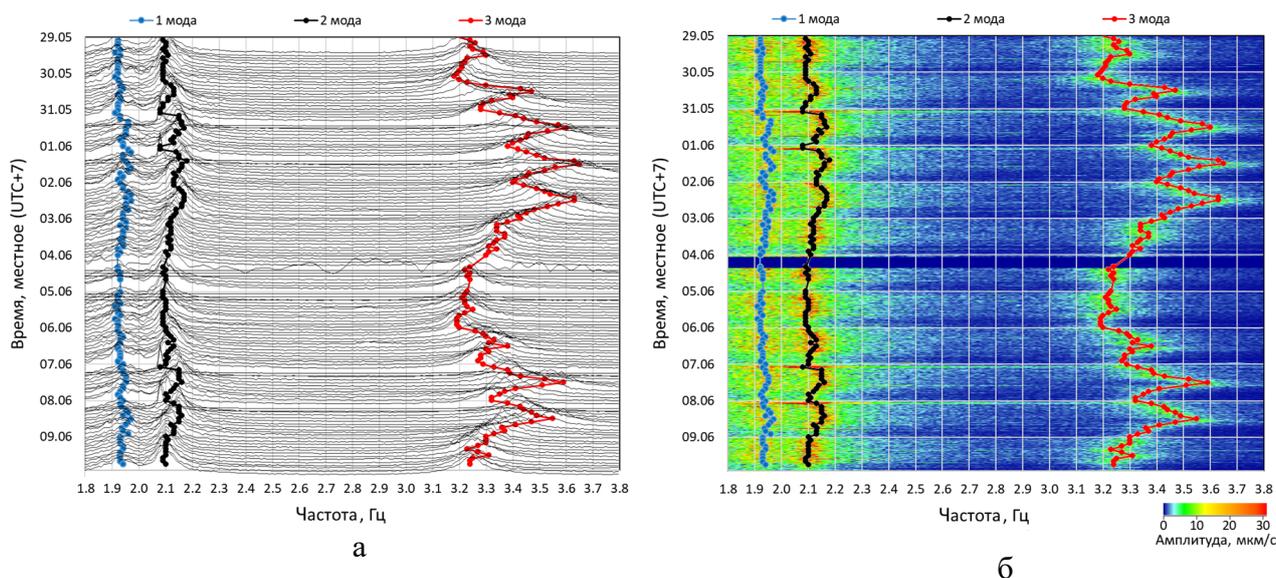


Рис. 2. Усредненные спектры (а), спектрограмма (б) и изменение собственных частот X-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период (с 29.05.2021 по 09.06.2021)

На рисунке хорошо видны изменения первых трех мод с течением времени. Значения частот этих мод из усредненных спектров, для наглядности, нанесены на спектрограмму, где видна их полная корреляция (рис. 2.б).

Полученные изменения значений собственных частот сравнивались с изменением температуры в данный период времени. В качестве данных о температуре выбраны показания метеостанции, установленной в сооружении Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. Также была проведена оценка схожести полученных собственных колебаний здания и изменений температуры. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона:

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

где  $(X_1, \dots, X_n)$ ,  $(Y_1, \dots, Y_n)$  – набор значений двух факторов на выборке объёма  $n$ ,  $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$ ,  $\bar{Y} = \sum_{j=1}^n \frac{Y_j}{n}$ .

Применив формулу (2), были получены следующие значения: для 1-й моды колебаний значение  $r=0.5873$ ; для 2-й моды колебаний значение  $r=0.7965$ ; для 3-й моды колебаний значение  $r=0.8083$  (рис. 3).

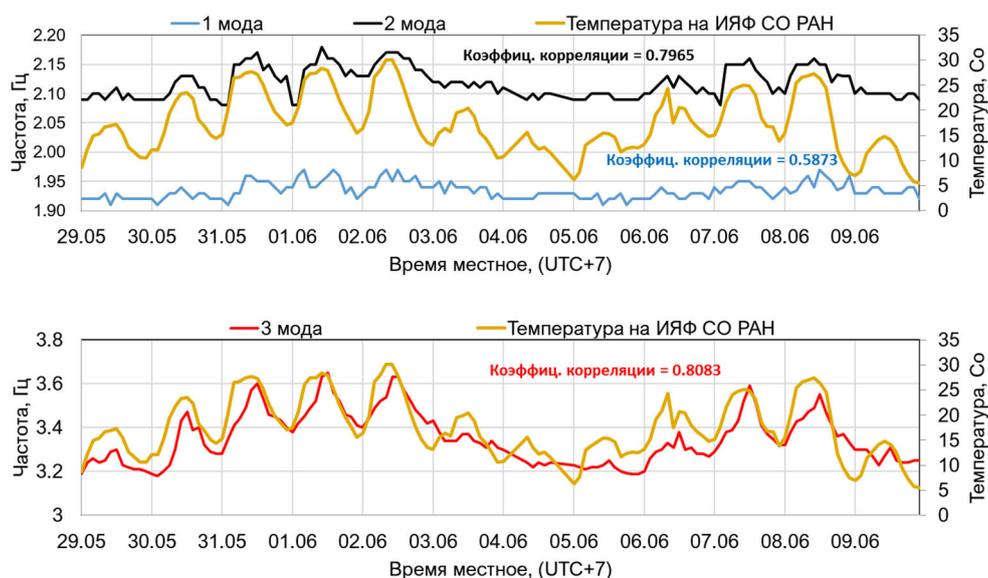


Рис. 3. Изменение температуры и значений первых 3х мод собственных частот X-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений, в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период (с 29.05.2021 по 09.06.2021)

Вероятно, низкие значения коэффициента связаны с тем, что температура окружающей среды меняется гораздо активнее, чем материал исследуемого сооружения. Но можно однозначно утверждать, что температура среды значительно влияет на изменение значений частот собственных колебаний. Причем рост температуры окружающей среды приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к уменьшению значений.

Вышеописанный анализ был проведен для всех исследованных сооружений. В период с 03.09.2021 по 20.09.2021 работали только 3 пункта наблюдений (сбой работы регистратора в доме на ул. Пирогова, д. 28), расположенные в 10-ти этажном жилом доме на ул. Пирогова, д. 22, в 16-этажном жилом доме на пр-те Ак. Коптюга, д. 7, и в 4-х этажном производственном сооружении на проспекте Ак. Коптюга, д. 3/6.

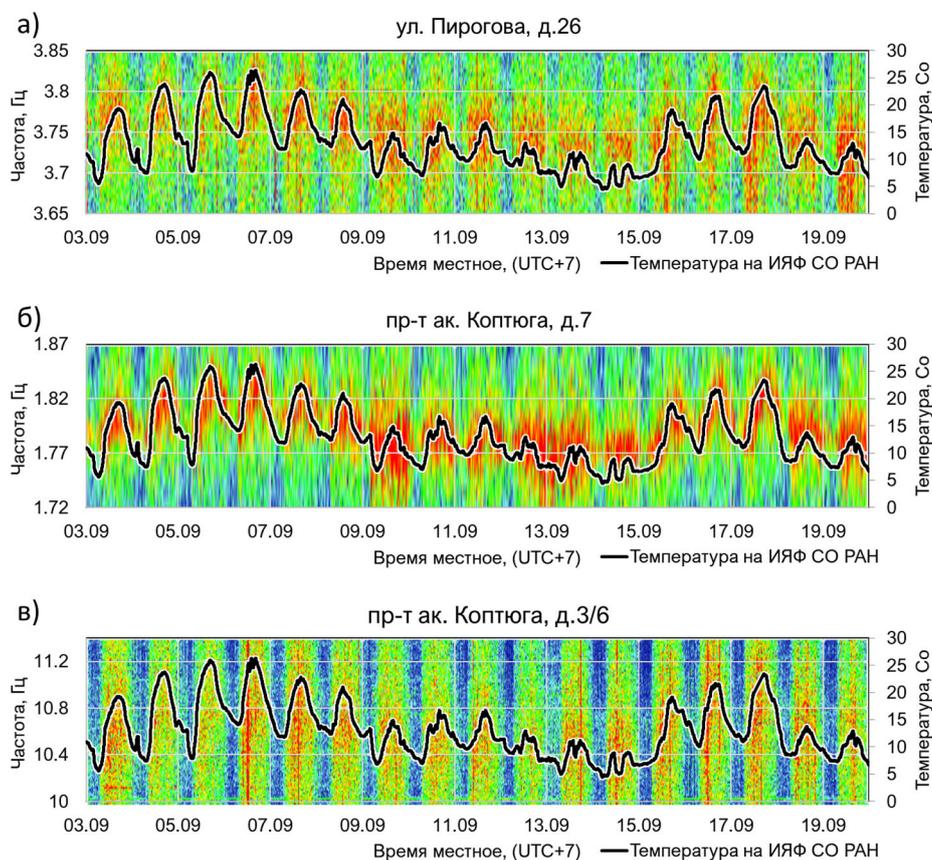


Рис. 4. Изменение температуры и значений 3 моды собственных частот Х-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пунктах наблюдений в верхней части 10-этажного дома (а), 16-этажного дома (б), 4-этажного сооружения (в) в осенний период (с 03.09.2021 по 20.09.2021)

На рис. 4 представлены спектрограммы и графики изменения температуры для 3-х пунктов наблюдений. Следует заметить, что для данных объектов обследования методом стоячих волн не проводились. Ввиду этого, трудно сказать к какому типу собственных колебаний (продольные/поперечные) относятся данные колебания, но предварительно (до проведения обследования методом стоячих волн), мы предполагаем, что данные частоты отвечают 3-м низшим модам собственных колебаний. Тем не менее, на рисунках хорошо видно, что по показаниям для всех типов домов прослеживается корреляция изменений значений данных частот собственных колебаний с температурой окружающей среды.

## ***Обсуждение***

Как можно видеть из результатов проведенных работ, сезонное влияние температуры на изменение частот стоячих волн сооружений достаточно велико – изменение частоты первых мод колебаний доходит до 10% для высокоэтажных сооружений (ул. Каптюга, д.7 см. рис 4.б). Эффект довольно важен и требует оценки его влияния на сооружения со стороны инженерных организаций, поскольку на сегодняшний день в общепринятых документах типа СНиП и ГОСТ отсутствует учет влияния температуры на собственные частоты, как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации сооружений.

В ходе работ было замечено, что влияние температур оказывает существенное влияние на изменение частот при их резкой смене (день-ночь). Не до конца понятно насколько сильно меняются частоты в зимний период, а также существует ли влияние на показанный эффект различные типов фундамента (свайный, бетонный, насыпной и т.д.). Для решения этих вопросов планируется провести дополнительные исследования.

## ***Заключение***

По полученным результатам анализа данных с различных типов домов в различные временные периоды, можно утверждать, что изменение температуры окружающей среды приводит к изменению значения собственных частот колебаний. Причем рост температуры окружающей среды приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к уменьшению значений.

Наиболее хорошая корреляция наблюдается на пункте наблюдений на 16-этажном жилом доме на проспекте Ак. Коптюга, д. 7, и наиболее плохая в 4-этажном производственном сооружении на проспекте Ак. Коптюга, д. 3/6 (рис. 7). Таким образом, высотные здания сильнее подвержены влиянию температуры, но это утверждение требует проведения дополнительных исследований и набора статистических данных.

## ***Благодарности***

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) 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. Limongelli M.P., Çelebi M. Seismic structural health monitoring: from theory to successful applications. – Springer tracts in civil engineering. – Springer. – 2019. – 447 p.
2. Bukenya P., Moyo P., Beushausen H. et al. Health monitoring of concrete dams: a literature review // J Civil Struct Health Monit. – 2014. – №4. – P.235–244.
3. Annamdas V.G.M., Bhalla S., Soh C.K. Applications of structural health monitoring technology in Asia // Struct. Health Monit. – 2017. – №16(3). – P.324–346.

4. Reynders E. System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison. // Arch Computat Methods Eng. – 2012. – №19. – P.51–124.
5. Chun-Xu Qu, Da-Peng Mei, Ting-Hua Yi, Hong-Nan Li Spurious mode distinguish by modal response contribution index in eigensystem realization algorithm. // The Structural Design of Tall and Special Buildings. – 2017. – Vol.27 – №12. – e1491.
6. Oliveira G., Magalhães F., Cunha A., Caetano E. Continuous dynamic monitoring of an onshore wind turbine // Engineering Structures. – 2018. – Vol.164. – P.22-39.
7. Furtado A., Rodrigues H., Arêde A., Varum H. (2017). Modal identification of infill masonry walls with different characteristics // Engineering Structures. – 2017. – Vol.145. – P.118-134.
8. Abdulamit A., Demetriu S., Aldea A., Neagu C., Gaftoi D. Ambient Vibration Tests at Some Buttress Dams in Romania // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 199. – P.2196-2201.
9. Santos N., Colaço A., Alves C.P., Calçada R. Experimental analysis of track-ground vibrations on a stretch of the Portuguese railway network // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2016. – Vol.90. – P.358-380.
10. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления // Изобретения (патенты). 2012. № 26 (II ч.). С.364-365. - Пат. 2461847 RU. - МПК G01V1/28, G01M7/02.
11. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А., Ting-Yu H., Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы (Республика Молдова. 9-13 сент. 2019 г.). – Обнинск, 2019. – С. 60.
12. 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-техническая конференция. Приложение на CD-диске: доклады и выступления на секциях конференции. (Санкт-Петербург. 20-22 окт. 2016 г.). – Санкт-Петербург, 2017. – С.55-60.
13. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Адилов З.А., Кречетов Д.В. Мониторинг состояния плотин гидроэлектростанций на основе анализа изменений собственных частот // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. (Петропавловск-Камчатский. 29 сент.-5 окт. 2019 г.). – Обнинск, 2019. – С.480-484.
14. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях. // Геология и геофизика. – 2002. – Т.43. – №2. – С.192-207.

© П. В. Громыко, В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, 2022