

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES,  
BUILDINGS AND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5>

**ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Научная статья

**Коковкин И.В.<sup>1,\*</sup>, Селезнев В.С.<sup>2</sup>, Пархоменко Е.Э.<sup>3</sup>, Уколов Д.А.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0009-0003-5689-1025;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-2366-550X;

<sup>3</sup>ORCID : 0000-0003-3103-3414;

<sup>1,2,3,4</sup>Единая геофизическая служба Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (titanoks1[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В работе рассматривается методика диагностики структурной целостности крупных гидротехнических сооружений, таких как Саяно-Шушенская ГЭС, путем анализа изменений их частот собственных колебаний. Описывается применение сейсморегистраторов, расположенных на расстоянии нескольких километров от изучаемого объекта, для регистрации микросейсмических колебаний и их последующего преобразования в спектрограммы. Особое внимание уделяется влиянию внешних факторов, таких как уровень наполнения водохранилища и температура окружающей среды, на динамические характеристики плотины. На основе данных, собранных в период с 2016 по 2024 годы, анализируются зависимости частот третьей и четвертой мод колебаний от воздействия водной массы и температуры. Показано, что уровень наполнения плотины оказывает обратное влияние на собственные частоты, тогда как температурный эффект демонстрирует неоднозначные зависимости, требующие дальнейшего изучения. Результаты подчеркивают необходимость учета множества факторов, включая промокание бетона и ремонтные работы, для точной интерпретации изменений частот и выявления потенциальных дефектов.

**Ключевые слова:** Саяно-Шушенская ГЭС, частоты собственных колебаний, сейсмический мониторинг, уровень водохранилища, температурные воздействия, трещинообразование.

**REMOTE STUDY OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP DAM BASED ON ANALYSIS OF NATURAL  
OSCILLATION FREQUENCIES**

Research article

**Kokovkin I.V.<sup>1,\*</sup>, Seleznev V.S.<sup>2</sup>, Parkhomenko Y.E.<sup>3</sup>, Ukolov D.A.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0009-0003-5689-1025;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-2366-550X;

<sup>3</sup>ORCID : 0000-0003-3103-3414;

<sup>1,2,3,4</sup>Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

\* Corresponding author (titanoks1[at]yandex.ru)

**Abstract**

The work examines a method for diagnosing the structural integrity of large hydraulic structures, such as the Sayano-Shushenskaya HPP Dam, by analysing changes in their natural oscillation frequencies. It describes the use of seismographs located several kilometres away from the studied object to record microseismic vibrations and their subsequent conversion into spectrograms. Particular attention is paid to the influence of external factors, such as the reservoir filling level and ambient temperature, on the dynamic characteristics of the dam. Based on data collected between 2016 and 2024, the dependencies of the third and fourth modes of vibration on the influence of water mass and temperature are analysed. It is shown that the dam's filling level has an inverse effect on natural oscillations, while the temperature effect demonstrates ambiguous dependencies that require further research. The results emphasise the necessity to take into account a variety of factors, including concrete weathering and repair work, for accurate interpretation of frequency changes and identification of potential defects.

**Keywords:** Sayano-Shushenskaya HPP, Dam natural oscillations, seismic monitoring, reservoir level, temperature effects, crack formation.

**Введение**

Поддержание функциональности зданий и сооружений напрямую связано с диагностикой их структурной целостности. В условиях прогрессирующего старения конструкционных материалов значимость данной задачи существенно возрастает. Особую озабоченность вызывает тот факт, что значительная часть критически важных сооружений по всему миру представлена бетонными конструкциями, чей проектный срок службы уже подходит к концу [1]. Базовым методом диагностики структурных нарушений является визуальный осмотр. В настоящий момент с этой же целью применяются беспилотные летательные аппараты [2], способные выявить и даже определить местоположение нарушения [3]. Однако в аспекте выявления скрытых дефектов существует вероятность, что повреждения могут остаться незамеченными. Кроме того, при внушительных габаритах конструкции процесс обследования значительно усложняется, требуя комплексного подхода.

В то же время, если к изучаемому сооружению отсутствует непосредственный доступ, а сооружение является критически важным, необходимо использовать дистанционные методы исследования. Существуют различного рода дистанционные методы исследования, например, с помощью спутникового радиолокационного интерферометрического зондирования, которые довольно точно могут отслеживать перемещения плотин [4], [5] а также с использованием наземных радаров [6], [7].

Помимо этого, достаточно простыми и перспективными являются методы, основанные на анализе динамических характеристик конструкций [8], позволяющие производить диагностику изучаемого строения с помощью сейсморегистраторов, находящихся даже на расстоянии нескольких километров от объекта исследования. Основная идея такой диагностики заключается в том, что дефекты изменяют физические параметры конструкции, что, в свою очередь, влияет на ее динамические характеристики, такие как частоты собственных колебаний, возбуждаемые естественными и техногенными факторами. Таким образом, повреждение можно выявить, анализируя изменения значений собственных частот во времени, где аномально резкое отклонение частоты будет являться индикатором происходящих изменений в объекте.

### **Методы и принципы исследования**

Целью настоящей работы является изучение технического состояния крупных гидротехнических сооружений, для выявления возможных структурных нарушений. Критерием оценки служит анализ изменений частот собственных колебаний объекта. Методика исследования основана на преобразовании сейсмических записей, зарегистрированных на расстоянии в несколько километров от обследуемого объекта в спектрограммы, согласно [8]. При этом сейсмическая запись разбивается на определенные по времени участки, вычисляются спектры этих участков записи и с заданным сдвигом спектры выстраиваются в единую картину. На полученном графическом представлении хорошо выделяются монохроматические колебания с разной добротностью, показывающей насколько пик на конкретной частоте шире или уже в частотном диапазоне. Таким образом, регистрируются как собственные частоты колебания зданий и сооружений, так и сигналы от работающего оборудования точно также, как и от вибрационных источников сейсмических волн. Точность определения частот связана с длиной отрезка сейсмограммы, в нашем случае она составляет 0,005 Гц, с выбираемыми отрезками по 200 с.

В качестве объекта текущего исследования выбрана Саяно-Шушенская ГЭС, являющаяся крупнейшей гидроэлектростанцией России. Она расположена на реке Енисей, на границе Красноярского края и Республики Хакасия. Безопасная эксплуатация столь значимого объекта требует обеспечения его постоянного контроля. Поэтому для отслеживания изменений частот собственных колебаний плотины СШ ГЭС, с мая 2024 года, на расстоянии 3 км от плотины была установлена сейсмологическая станция «Филиал» (ориентация осей датчика: N-север, E-восток, Z-вертикаль). Сейсмостанция осуществляет непрерывную передачу микросейсмических записей на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Частоты собственных колебаний плотины ранее уже определялись методом стоячих волн при разных уровнях наполнения водохранилища и были зарегистрированы на сейсмостанции «Черемушки», расположенной на удалении 4,4 км от самой гидростанции [9].

Количество исследований, посвященных изучению динамических характеристик плотин, значительно меньше, чем количество аналогичных исследований мостов. В работе [10] отмечается, что для уверенного обнаружения повреждения моста необходимо, чтобы собственная частота изменилась примерно на 5%. Однако значительные изменения частоты сами по себе не означают наличие повреждения, поскольку сдвиги частоты (более 5%) наблюдались из-за изменений условий окружающей среды, как для бетонных, так и для стальных мостов. Таким образом, одного лишь сдвига собственных частот может не хватить для контроля целостности, если только повреждение не находится в важном несущем элементе. Аналогичные выводы представлены в работе [11], авторы указывают, что условия окружающей среды и эксплуатации неизбежно влияют на поведение конструкции.

В статье [12], с помощью математического моделирования, показаны примеры расчета изменений собственных частот плотины СШ ГЭС при возникновении дефектов в ее конструкции, которые могут составлять величину порядка сотых долей Гц, что является довольно малым значением. Учитывая, что рассматриваемая система, объединяющая совокупность сооружений не является изолированной, то на значения частот собственных колебаний плотины могут оказывать воздействие внешние факторы, такие как температурные колебания, что требует необходимости их учета.

### **Основные результаты**

Рассмотрим возможность анализа влияния температуры окружающей среды на частоты собственных колебаний ГЭС. На рисунках 1 и 2 представлены зависимости для третьей и четвертой мод плотины, отражающие их изменение в зависимости от уровня наполнения водохранилища и температурных условий в периоды 2016–2018 и 2022–2024 годов.

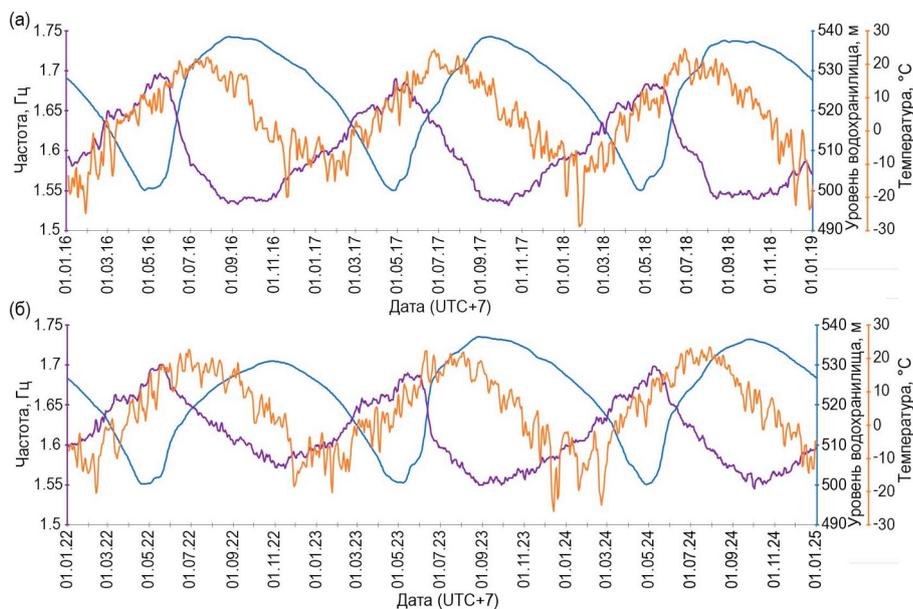


Рисунок 1 - Зависимости частот собственных колебаний плотины на примере 3-й моды (фиолетовый цвет), от уровня водохранилища (синий цвет) и температуры (оранжевый цвет), по данным за 2016-2018 годы (а), 2022-2024 годы (б), Е-компонента

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.1>

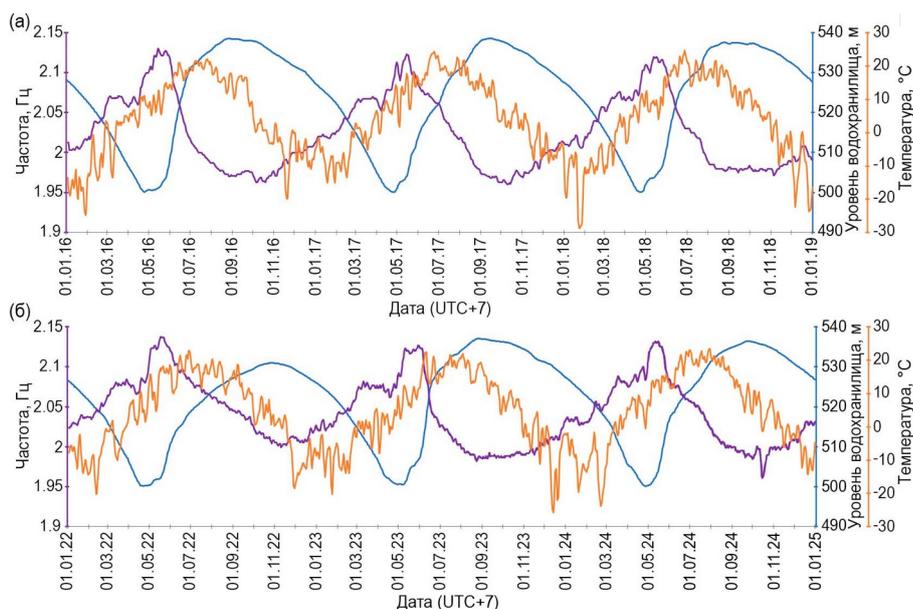


Рисунок 2 - Зависимости частот собственных колебаний плотины на примере 4-й моды (фиолетовый цвет), от уровня водохранилища (синий цвет) и температуры (оранжевый цвет), по данным за 2016-2018 годы (а), 2022-2024 годы (б), Е-компонента

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.2>

На представленных графиках наблюдается обратная зависимость между частотами собственных колебаний плотины с уровнем наполнения водохранилища, где при его предельном заполнении, частота минимальна и наоборот. Кроме того, в маловодные периоды, такие как 2022 год (см. рис. 16, 26), когда приточность реки была снижена, значения частот колебаний оказываются выше, чем в другие годы в тот же период. Многие исследователи также отмечают существенное влияние степени заполненности водохранилища на величину собственных частот. Данное наблюдение также было продемонстрировано и посредством математического моделирования в работе [13]. Схожие результаты получены другими авторами, которые провели экспериментальные исследования на лабораторной модели плотины в сочетании с численным моделированием, ими показано, что повышение уровня воды приводит к снижению собственных частот, что логично обосновывается увеличением присоединенной массы, а также к уменьшению количества мод колебаний по сравнению с условиями незаполненного водохранилища [14].

Что же касается температурного фактора влияния на собственные частоты плотины, то здесь не все так однозначно. Ранее в работах для 14-этажного кирпичного дома [15] и 22-этажного железобетонного [16] можно было

наблюдать увеличение значений частот собственных колебаний с ростом температуры и наоборот. Схожая картина зависимости частот от температуры можно наблюдаться и для бетонной плотины в работе [17], где авторы наблюдают увеличение собственных частот в теплый период, объясняя это смыканием вертикальных швов, приводящее к общему увеличению жесткости, а похолодание вызывает противоположный эффект. Но в ряде работ, исследующие мосты [18], [19], [20], отмечается обратный эффект, где частоты возрастают с понижением температуры и падают с повышением. Такой же эффект наблюдается для каменных строений [21], а также для шестизэтажного деревянного дома [22], где более высокие частоты отмечаются в условиях повышенной влажности и низкой температуры, что может быть связано с уплотнением деревянных соединений из-за разбухания древесины. В нашем же случае мы можем наблюдать как прямую, так и обратную зависимость частот, также нужно учесть, что измерения взяты с метеостанции, расположенной в нескольких километрах от плотины, а не непосредственно на ней.

Ниже проведем рассмотрение влияния на частоты собственных колебаний плотины уровня наполнения водохранилища (уровня верхнего бьефа) СШ ГЭС и температуры окружающей среды, для каждого года отдельно. Дополнительно построена первая производная функции наполнения, отражающая скорость изменения гидростатической нагрузки.

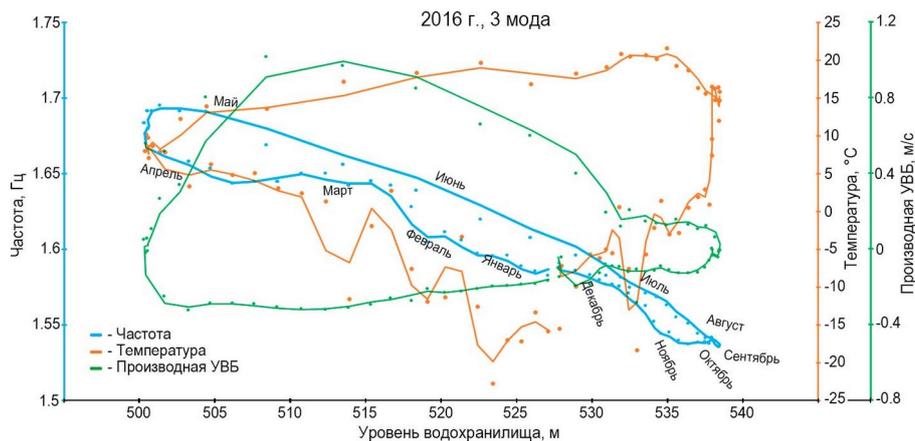


Рисунок 3 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.3>

Примечание: 2016 год, 3-я мода, E-компонента

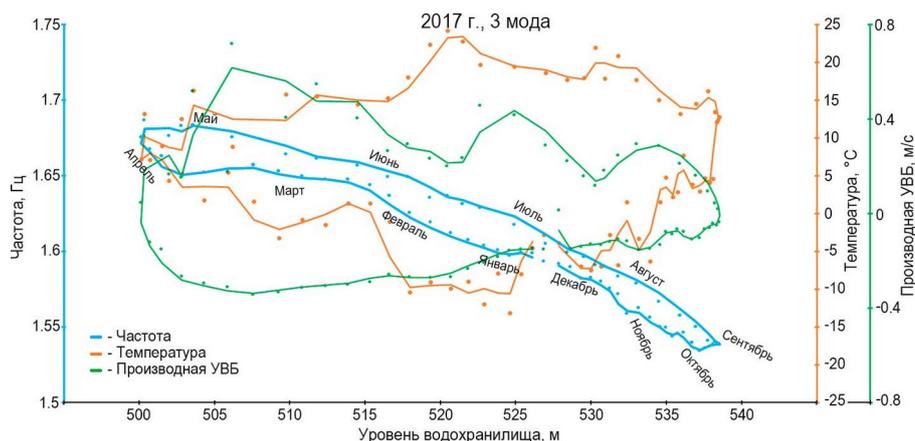


Рисунок 4 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.4>

Примечание: 2017 год, 3-я мода, E-компонента

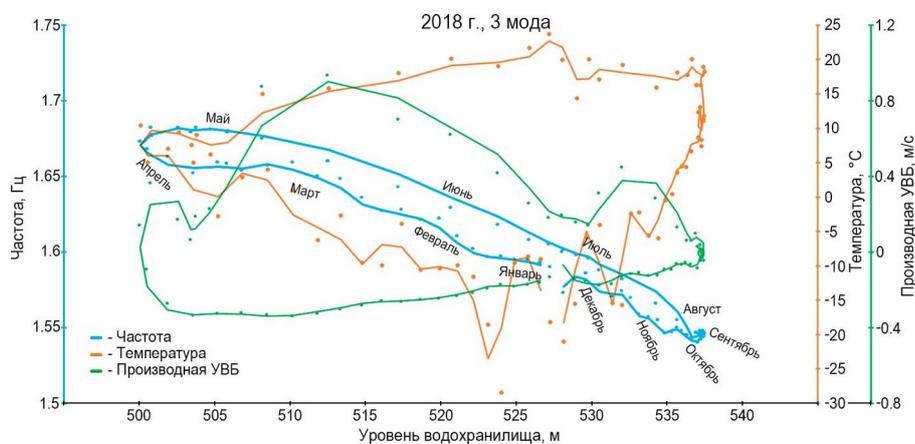


Рисунок 5 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.5>

Примечание: 2018 год, 3-я мода, E-компонента

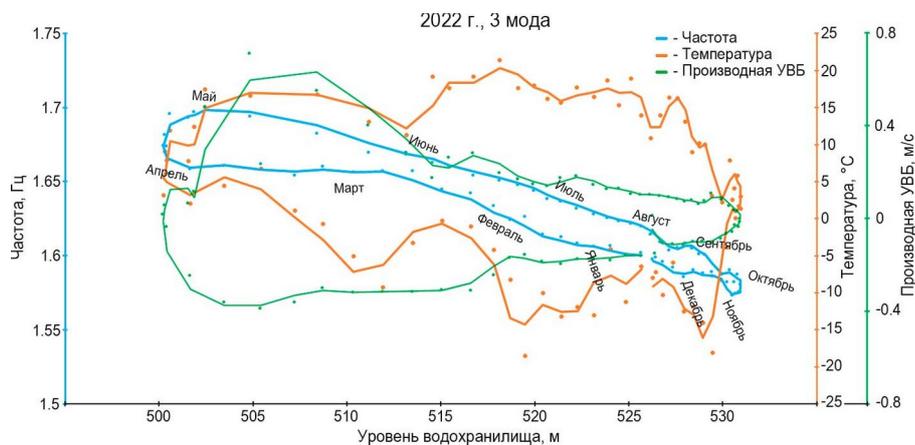


Рисунок 6 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.6>

Примечание: 2022 год, 3-я мода, E-компонента

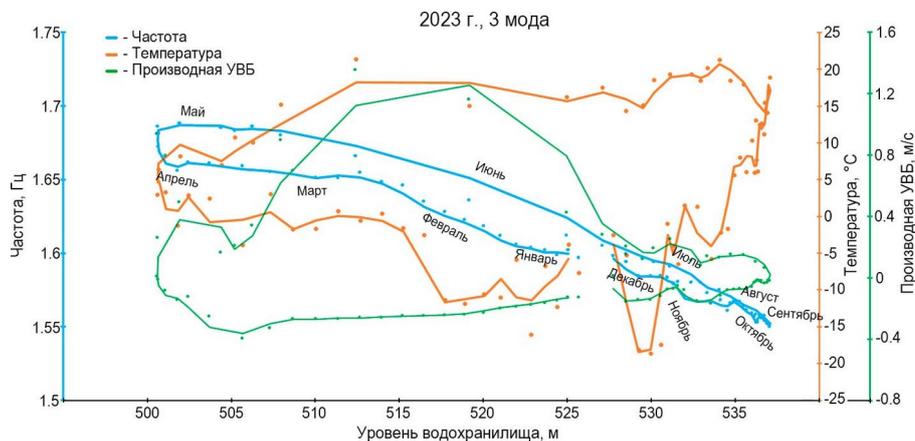


Рисунок 7 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.7>

Примечание: 2023 год, 3-я мода, E-компонента

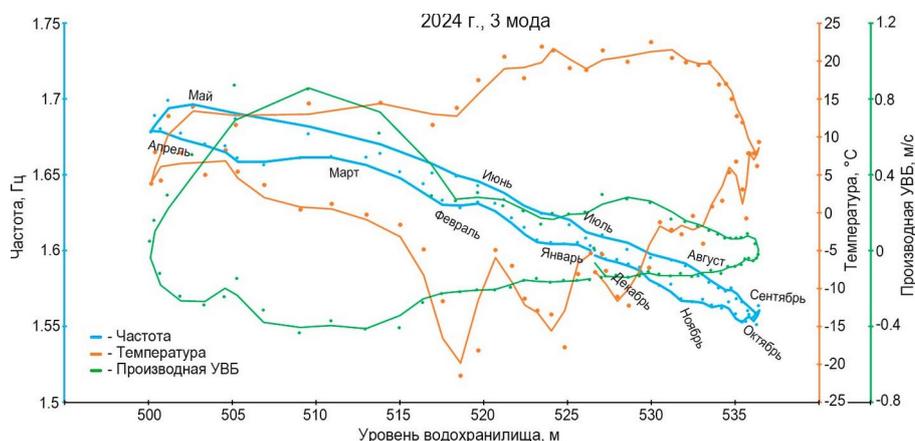


Рисунок 8 - Зависимости частот собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.5.8>

Примечание: 2024 год, 3-я мода, E-компонента

На графиках (см. рис. 3–8) видно, что при одинаковых уровнях воды в периоды заполнения и сброски (снижения уровня) водохранилища наблюдаются различные значения собственных частот, т.е. частота при одном и том же уровне водохранилища в момент наполнения меньше, чем при его сброске. На данные значения может оказывать влияние множество факторов, таких как температурный эффект и промокание бетона плотины [1]. К примеру, если рассмотреть уровень водохранилища на отметке 505 м, нижнее значение частоты соответствует апрелю, а верхнее — маю, то же самое справедливо и для температуры. Можно сказать, что с повышением температуры выросла и собственная частота плотины, но и влияние промокания бетона также может влиять на данный процесс.

Согласно имеющимся данным, факты раскрытия трещин фиксировались в периоды достижения максимальных отметок наполнения водохранилища, поэтому нас интересует не весь диапазон графиков, а только тот, где уровень воды максимален. Здесь мы можем наблюдать нетипичное поведение частоты, которое можно связать с процессом раскрытия трещин в плотине СШ ГЭС. Однако установить однозначную корреляцию на основании доступной информации не представляется возможным, поскольку за это время, производились процессы ремонта, устраняя последствия трещинообразования.

#### Закключение

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что выбранный метод дистанционного изучения обладает хорошим потенциалом для идентификации структурных нарушений в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Качество материалов, полученное с сейсмических станций, расположенных на расстоянии 3–4,4 км от водохранилища позволяют успешно выделять по ним частоты собственных колебаний плотины.

В ходе анализа установлено, что частоты третьей и четвертой мод собственных колебаний плотины демонстрируют высокую взаимную корреляцию. При этом четвертая мода является более интенсивной и, следовательно, более предпочтительной для наблюдений. Показана устойчивая обратная корреляция собственных частот с уровнем наполнения водохранилища, что объясняется присоединенной массой воды. Взаимосвязь с температурой оказалась не столь однозначной, проявляя как прямую, так и обратную корреляцию. Это может быть связано с комбинацией факторов: температурным расширением материала, изменением влажности бетона, а также возможными неучтенными локальными процессами, что требует дополнительного анализа.

Кроме того, выявлено различие в значениях частот собственных колебаний плотины при одинаковых уровнях воды в фазах заполнения и уменьшения уровня водохранилища, что указывает на нелинейность поведения конструкции.

Важным результатом является выявление аномального поведения частот в периоды максимального наполнения водохранилища, что можно связать с процессом раскрытия трещин в плотине. Однако установить однозначную корреляцию на основании доступной информации не представляется возможным. К тому же в эти периоды на самой плотине ГЭС также проводились ремонтные работы, направленные на устранение последствий трещинообразования.

Для разрешения выявленных неоднозначностей необходимо проведение дальнейшего исследования, перспективными направлениями которого являются:

1. Получение данных о температуре, непосредственно с плотины СШ ГЭС.
2. Учет дополнительных факторов, таких как ветровые и снеговые нагрузки, влажность, сейсмическая активность и пр., которые также оказывают влияние на поведение частот собственных колебаний плотины.
3. Полученные экспериментальные данные представить в виде математической модели.

### Финансирование

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00145, <https://rscf.ru/project/24-27-00145>, с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Funding

The work was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-27-00145, <https://rscf.ru/project/24-27-00145>, using data obtained at the unique scientific installation "Seismic and Ultrasonic monitoring complex of the Arctic cryolithozone and the complex of continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world".

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Sanchez L.F.M. Internal Swelling Reactions in Concrete: Mechanisms and Condition Assessment / L.F.M. Sanchez. — Boca Raton : CRC Press, 2024. — 220 p. — DOI: 10.1201/9781003188155
2. Yongquan G. Monitoring Dynamic Deformation of Building Using Unmanned Aerial Vehicle / G. Yongquan, Y. Xianzhi, C. Mingzhi [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. — 2021. — № 1. — DOI: 10.1155/2021/2657689
3. Daegyun C. UAV-Driven Structural Crack Detection and Location Determination Using Convolutional Neural Networks / C. Daegyun, B. William, K. Donghoon [et al.] // *Sensors*. — 2021. — № 21. — P. 2650. — DOI: 10.3390/s21082650
4. Mazzanti P. Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry: Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives / P. Mazzanti, D. Perissin, A. Rocca // *Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (Turin, Italy, 1–3 July 2015)*. — Iss. 3. — Turin : International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2016. — P. 1761–1770.
5. Milillo P. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy / P. Milillo, D. Perissin, D. Salzer [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2016. — № 52. — P. 221–229. — DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.013
6. Pieraccini M. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review / M. Pieraccini, L. Miccinesi // *Remote Sensing*. — 2019. — № 11. — P. 1029. — DOI: 10.3390/rs11091029
7. Huang Q. Ground-Based Radar Interferometry for Monitoring the Dynamic Performance of a Multitrack Steel Truss High-Speed Railway Bridge / Q. Huang, Y. Wang, G. Luzi [et al.] // *Remote Sensing*. — 2020. — № 12. — P. 2594. — DOI: 10.3390/rs12162594
8. Пат. 2461847 Российская Федерация, МПК С2. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления / Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Геофизическая служба". — № 2010128394; заявл. 2010-07-08; опубл. 2012-09-20. — 9 с.
9. Лисейкин А.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг.) / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов [и др.] // *Российский сейсмологический журнал*. — 2023. — 2. — С. 32–50.

10. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. / O.S. Salawu // *Engineering Structures*. — 1997. — № 9. — P. 718–723. — DOI: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6
11. Han Q. Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review / Q. Han, Q. Ma, J. Xu [et al.] // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. — 2021. — № 11. — P. 149–173. — DOI: 10.1007/s13349-020-00444-x
12. Hsu T.Y. Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects / T.Y. Hsu, A. Valentino, A.V. Liseikin [et al.] // *Measurement Science and Technology*. — 2020. — № 1. — P. 015801. — DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c
13. Shariatmadar H. Dam-reservoir-foundation interaction effects on the modal characteristic of concrete gravity dams. / H. Shariatmadar, A. Mirhaj // *Structural Engineering and Mechanics*. — 2011. — № 1. — P. 65–79. — DOI: 10.12989/sem.2011.38.1.065
14. Sevim B. Investigation of water length effects on the modal behavior of a prototype arch dam using operational and analytical modal analyses. / B. Sevim, A. Bayraktar, A.C. Altunisik // *Structural Engineering and Mechanics*. — 2011. — № 6. — P. 593–615. — DOI: 10.12989/SEM.2011.37.6.593
15. Селезнев В.С. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, И.В. Коковкин [и др.] // *Геология и геофизика*. — 2024. — № 7. — С. 1036–1044. — DOI: 10.15372/GiG2024102
16. Yuen K.V. Ambient interference in long-term monitoring of buildings. / K.V. Yuen, S.C. Kuok // *Engineering Structures*. — 2010. — № 8. — P. 2379–2386. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012
17. Oliveira S. SHM of Concrete Dams with Swelling. Time Effect on Natural Frequency Histories: HST-FE Models / S. Oliveira, M. Rodrigues, A. Alegre [et al.] // *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*. — Milan : International Association of Earthquake Engineering (IAEE), 2024.
18. Desjardins S.L. Real-time data processing, analysis and visualization for structural monitoring of the confederation bridge / S.L. Desjardins, N.A. Londono, D.T. Lau [et al.] // *Advances in Structural Engineering*. — 2006. — № 1. — P. 141–157. — DOI: 10.1260/136943306776232864
19. Liu C. Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads. / C. Liu, J.T. DeWolf // *Journal of Structural Engineering*. — 2007. — № 12. — P. 1742–1751. — DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:12(1742)
20. Moaveni B. Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge. / B. Moaveni, I. Behmanesh // *Engineering Structures*. — 2012. — № 43. — P. 58–68. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009
21. Kita A. Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. / A. Kita, N. Cavalagli, F. Ubertini // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2019. — № 120. — P. 180–202. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021
22. Alarcon M. Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost Raspberry Shake seismic instrumentation / M. Alarcon, P. Soto, F. Hernandez [et al.] // *Engineering Structures*. — 2023. — № 275. — P. 115278. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115278

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Sanchez L.F.M. Internal Swelling Reactions in Concrete: Mechanisms and Condition Assessment / L.F.M. Sanchez. — Boca Raton : CRC Press, 2024. — 220 p. — DOI: 10.1201/9781003188155
2. Yongquan G. Monitoring Dynamic Deformation of Building Using Unmanned Aerial Vehicle / G. Yongquan, Y. Xianzhi, C. Mingzhi [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. — 2021. — № 1. — DOI: 10.1155/2021/2657689
3. Daegyun C. UAV-Driven Structural Crack Detection and Location Determination Using Convolutional Neural Networks / C. Daegyun, B. William, K. Donghoon [et al.] // *Sensors*. — 2021. — № 21. — P. 2650. — DOI: 10.3390/s21082650
4. Mazzanti P. Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry: Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives / P. Mazzanti, D. Perissin, A. Rocca // *Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (Turin, Italy, 1–3 July 2015)*. — Iss. 3. — Turin : International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2016. — P. 1761–1770.
5. Milillo P. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy / P. Milillo, D. Perissin, D. Salzer [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2016. — № 52. — P. 221–229. — DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.013
6. Pieraccini M. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review / M. Pieraccini, L. Miccinesi // *Remote Sensing*. — 2019. — № 11. — P. 1029. — DOI: 10.3390/rs11091029
7. Huang Q. Ground-Based Radar Interferometry for Monitoring the Dynamic Performance of a Multitrack Steel Truss High-Speed Railway Bridge / Q. Huang, Y. Wang, G. Luzi [et al.] // *Remote Sensing*. — 2020. — № 12. — P. 2594. — DOI: 10.3390/rs12162594
8. Pat. 2461847 Russian Federation, IPC C2. Sposob neprerivnogo monitoringa fizicheskogo sostoyaniya zdaniy i/ili sooruzhenii i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya [Method for Continuous Monitoring of the Physical Condition of Buildings and/or Structures and Device for Its Implementation] / Seleznev V.S., Liseikin A.V., Briksin A.A.; the applicant and the patentee Limited liability company "Geophysical survey". — № 2010128394; appl. 2010-07-08; publ. 2012-09-20. — 9 p. [in Russian]
9. Liseikin A.V. Opredelenie chastot sobstvennikh kolebanii sooruzhenii po maloamplitudnim seismicheskim signalam (na primere plotini Sayano-Shushenskoi GES po dannim monitoringa 2001–2021 gg.) [Determination of Natural Frequencies of

Structures Using Low-Amplitude Seismic Signals (Case Study of the Sayano-Shushenskaya HPP Dam Based on Monitoring Data from 2001–2021)] / A.V. Liseikin, V.S. Seleznev, A.F. Yemanov [et al.] // Rossiiskii seismologicheskii zhurnal [Russian Seismological Journal]. — 2023. — 2. — P. 32–50. [in Russian]

10. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. / O.S. Salawu // Engineering Structures. — 1997. — № 9. — P. 718–723. — DOI: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6

11. Han Q. Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review / Q. Han, Q. Ma, J. Xu [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. — 2021. — № 11. — P. 149–173. — DOI: 10.1007/s13349-020-00444-x

12. Hsu T.Y. Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects / T.Y. Hsu, A. Valentino, A.V. Liseikin [et al.] // Measurement Science and Technology. — 2020. — № 1. — P. 015801. — DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c

13. Shariatmadar H. Dam-reservoir-foundation interaction effects on the modal characteristic of concrete gravity dams. / H. Shariatmadar, A. Mirhaj // Structural Engineering and Mechanics. — 2011. — № 1. — P. 65–79. — DOI: 10.12989/sem.2011.38.1.065

14. Sevim B. Investigation of water length effects on the modal behavior of a prototype arch dam using operational and analytical modal analyses. / B. Sevim, A. Bayraktar, A.C. Altunisik // Structural Engineering and Mechanics. — 2011. — № 6. — P. 593–615. — DOI: 10.12989/SEM.2011.37.6.593

15. Seleznev V.S. Izmenenie znachenii chastot sobstvennykh kolebaniy zdaniy i sooruzhenii v zavisimosti ot vneshnikh faktorov [Changes in Natural Frequencies of Buildings and Structures Depending on External Factors] / V.S. Seleznev, A.V. Liseikin, I.V. Kokovkin [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. — 2024. — № 7. — P. 1036–1044. — DOI: 10.15372/GiG2024102 [in Russian]

16. Yuen K.V. Ambient interference in long-term monitoring of buildings. / K.V. Yuen, S.C. Kuok // Engineering Structures. — 2010. — № 8. — P. 2379–2386. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012

17. Oliveira S. SHM of Concrete Dams with Swelling. Time Effect on Natural Frequency Histories: HST-FE Models / S. Oliveira, M. Rodrigues, A. Alegre [et al.] // Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024). — Milan : International Association of Earthquake Engineering (IAEE), 2024.

18. Desjardins S.L. Real-time data processing, analysis and visualization for structural monitoring of the confederation bridge / S.L. Desjardins, N.A. Londono, D.T. Lau [et al.] // Advances in Structural Engineering. — 2006. — № 1. — P. 141–157. — DOI: 10.1260/136943306776232864

19. Liu C. Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads. / C. Liu, J.T. DeWolf // Journal of Structural Engineering. — 2007. — № 12. — P. 1742–1751. — DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:12(1742)

20. Moaveni B. Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge. / B. Moaveni, I. Behmanesh // Engineering Structures. — 2012. — № 43. — P. 58–68. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009

21. Kita A. Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. / A. Kita, N. Cavalagli, F. Ubertini // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2019. — № 120. — P. 180–202. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021

22. Alarcon M. Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost RaspberryShake seismic instrumentation / M. Alarcon, P. Soto, F. Hernandez [et al.] // Engineering Structures. — 2023. — № 275. — P. 115278. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115278