

УДК 550.34

Оценка возможности выявления трещин в плотине Саяно–Шушенской ГЭС на основе детального анализа её собственных частот

© 2025 г. И.В. Коковкин, В.С. Селезнев, Е.Э. Пархоменко, Д.А. Уколов

СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 17.10.2025 г.

Аннотация. Известно, что образование трещин в объекте меняет его частоты собственных колебаний. Именно это свойство используют продавцы хрустальных бокалов, когда постукивают по ним, чтобы убедиться в их целостности. В ФИЦ ЕГС РАН изучением собственных частот Саяно–Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) занимаются с 90-х годов прошлого столетия. За это время непосредственно на самой плотине методом стоячих волн определено более 15 форм её собственных колебаний при различных уровнях наполнения водохранилища. Установлено, что частоты первых семи из этих мод колебаний хорошо регистрируются на расстоянии 4.5 км от плотины на сейсмостанции «Черёмушки». Здесь же регистрируются и частоты от работающего на ГЭС оборудования с высокой степенью добротности. В то же время у частот собственных колебаний плотины добротность значительно ниже, а также прослеживаются изменения их величин во времени. Одновременная регистрация этих сигналов позволяет исключить погрешности измерений, связанные с нестабильностью работы регистрирующих станций. В данной работе сделана попытка выяснить, возможно ли по вариациям собственных частот плотины СШ ГЭС обнаружить образование в ней трещин. Для этого изучались как микросейсмические данные со специально установленной станции «Филиал» и сейсмостанции «Черёмушки», так и результаты работ, полученные сотрудниками СШ ГЭС в теле плотины при изучении её напряжённого состояния. Установлено, что на изменения частот собственных колебаний могут оказывать влияние множество факторов, таких как уровень водохранилища, температура, намерзание льда и ряд других. Продемонстрировано, что при предельных уровнях наполнения водохранилища происходят сдвиги частоты собственных колебаний плотины, которые можно связать с дефектами в плотине, раскрывающимися при возникающем значительном гидростатическом давлении. Рассматриваемый метод показал хороший потенциал для выявления нарушений.

Ключевые слова: Саяно–Шушенская ГЭС, частоты собственных колебаний, сейсмический мониторинг, уровень водохранилища, трещинообразование.

Для цитирования: Коковкин И.В., Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э., Уколов Д.А. Оценка возможности выявления трещин в плотине Саяно–Шушенской ГЭС на основе детального анализа её собственных частот // Российский сейсмологический журнал. – 2025. – Т. 7, № 4. – С. 27–36. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.4.04>. – EDN: KPZVNU

Введение

Диагностика структурной целостности гидротехнических сооружений играет важную роль в поддержании их функциональности, особенно в условиях прогрессирующего старения конструкционных материалов. Подавляющая доля объектов критически значимой инфраструктуры по всему миру выполнена из армированного бетона, чей расчётный срок эксплуатации составляет 50–75 лет. В настоящее время

они уже начинают достигать конца своего срока службы [Sanchez, 2024]. При этом не следует упускать из виду, что разрушение плотин влечёт катастрофические экономические и экологические последствия, включая миллиардные убытки от разрушения инфраструктуры, потерь сельскохозяйственных угодий и остановки предприятий, а также значительные затраты на их восстановление и переселение жителей. Помимо сказанного, происходит загрязнение водоёмов, уничтожение экосистем, эрозия почв с долгосрочными

последствиями для региона. Эти риски подчёркивают серьёзность своевременного мониторинга состояния плотин для предотвращения аварий.

Традиционно для выявления структурных нарушений применяются методы визуального осмотра. В настоящее время с этой же целью используются и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [Ge *et al.*, 2021], способные выявить и даже определить местоположение нарушения [Choi *et al.*, 2021]. Однако при условии отсутствия непосредственного доступа к изучаемому объекту, тем более, если сооружение является стратегически важным, возникает необходимость использования дистанционных методов исследования. К числу таких методов относится спутниковое радиолокационное интерферометрическое зондирование, которое довольно точно может отслеживать перемещения плотин [Mazzanti *et al.*, 2016; Milillo *et al.*, 2016], а также наземное радарное сканирование [Pieraccini, Miccinesi, 2019; Huang *et al.*, 2020]. Тем не менее, существует вероятность, что повреждения могут остаться незамеченными, к тому же такие подходы обладают существенными ограничениями, особенно в аспекте выявления скрытых дефектов. Кроме того, значительные габариты конструкции усложняют процесс обследования, что обуславливает необходимость комплексного подхода. Достаточно перспективным и экономичным является метод, основанный на анализе динамических характеристик конструкции [Селезнев и др., 2012], который можно использовать для диагностики изучаемого строения с помощью анализа данных, полученных на сейсмостанциях, находящихся даже на расстоянии нескольких километров от объекта исследования [Коковкин и др., 2021]. Здесь основная идея диагностики структурных нарушений заключается в том, что дефекты изменяют физические параметры конструкции, что, в свою очередь, влияет на её частоты собственных колебаний, возбуждаемые естественными и техногенными факторами. Таким образом, повреждение можно выявить, анализируя вариации значений собственных частот во времени, где аномальное отклонение частоты от своих средних значений будет являться индикатором проявления нарушений в объекте.

Теория и методы

Настоящая работа посвящена анализу изменений значений частот собственных колебаний крупных гидротехнических сооружений.

Методика исследования основана на преобразовании сейсмических записей, зарегистрированных на некотором расстоянии от объекта исследования, в спектрограммы согласно [Селезнев и др., 2012]. Обработка регистрируемых данных включает сегментирование сейсмической записи по времени с последующим расчётом спектра каждого участка. Полученные спектры с заданным временным сдвигом упорядочиваются в виде спектрограммы, на которой визуализируются монохроматические колебания с различной добротностью, отражающей ширину резонансного пика на соответствующей частоте. Пример получаемой спектрограммы показан на рис. 1. Данный подход позволяет идентифицировать как собственные частоты колебаний зданий и сооружений, так и сигналы от работающего оборудования и иных вибрационных источников. Разрешающая способность метода по частоте напрямую зависит от длительности анализируемого отрезка сейсмограммы.

Объектом текущего исследования является Саяно-Шушенская ГЭС, крупнейшая гидроэлектростанция России, расположенная на реке Енисей, на границе Республики Хакасии и Красноярского края. Критическая важность объекта требует его постоянного контроля, поэтому с целью отслеживания изменений частот собственных колебаний плотины СШ ГЭС с мая 2024 г. в 3 км от плотины была установлена трёхкомпонентная сейсмическая станция «Филиал» (ориентация осей датчика: N — север, E — восток, Z — вертикаль). Сейсмические записи, зарегистрированные станцией, передаются по сети Интернет на сервер, где создана база данных за два года наблюдений.

На начальном этапе исследования требуется идентифицировать частоты собственных колебаний изучаемого инженерного сооружения. Это необходимо для того, чтобы отличить их от возможных монохроматических помех. Для Саяно-Шушенской гидроэлектростанции частоты собственных колебаний уже были установлены ранее [Еманов и др., 2003; Kuz'menko, Saburov, 2016] непосредственно в теле плотины с использованием метода стоячих волн [Селезнев и др., 1999]. Это значительно упрощает задачу их определения в рамках текущей работы. Указанные динамические характеристики СШ ГЭС регистрировались сейсмической станцией «Черёмушки», расположенной на расстоянии 4.5 км от плотины, где достаточно точно можно определять частоты с 1-й по 7-ю моду колебаний ГЭС [Лисейкин и др., 2023] (рис. 2).

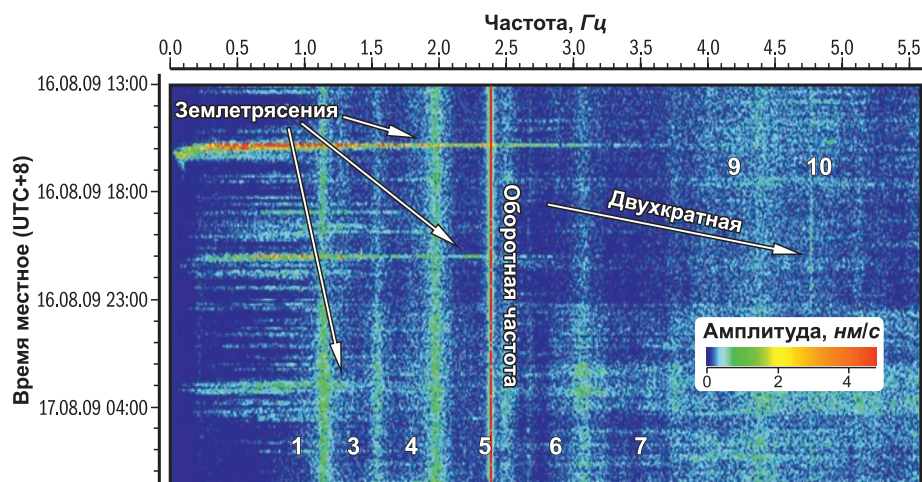


Рис. 1. Текущий спектр сейсмической записи, полученной за день до аварии на СШ ГЭС.

Цифрами обозначены частоты собственных колебаний плотины.
Отмечена оборотная частота работы турбогенератора и её гармоника

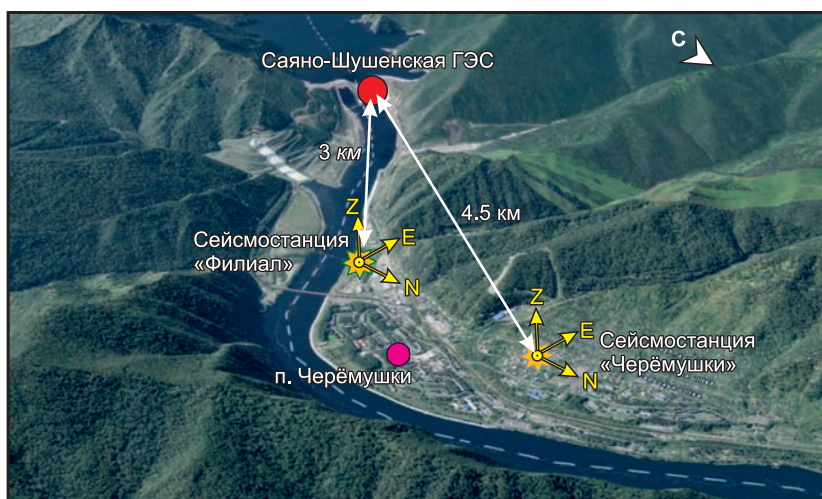


Рис. 2. Схема расположения измерительных станций

На основе получаемых данных производится построение текущих спектров с помощью оконного преобразования Фурье с длиной окна 200 с, которое обеспечивает наилучшую визуализацию. Точность определения частоты с таким выбором окна составляет 0.005 Гц.

В дальнейшем осуществляется отслеживание изменений частот собственных колебаний СШ ГЭС в длительном временном масштабе. По спектру записи видно, что частота 4-й моды колебаний плотины достаточно хорошо определяется и прослеживается во времени, поэтому далее будем изучать именно её изменения.

Исследованию динамических характеристик плотин посвящено не так много статей, в отличие от работ по изучению мостов. 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 [Salawu, 1997]. Таким образом, одного лишь сдвига собственных частот может не хватить для контроля целостности, если только повреждение не находится в важном несущем элементе. В работе [Han et al., 2021] также отмечается, что условия окружающей среды и эксплуатации неизбежно влияют на поведение конструкции.

Кроме того, многие исследователи отмечают существенное влияние степени заполненности водохранилища на величину частот собственных

колебаний плотины. Данное наблюдение также было продемонстрировано и посредством математического моделирования в работе [Shariatmadar, Mirhaj, 2011]. Схожие результаты получены и другими авторами, которые провели экспериментальные исследования на лабораторной модели плотины в сочетании с численным моделированием [Sevim et al., 2011]. Ими показано, что повышение уровня воды приводит к снижению собственных частот, что логично обосновывается увеличением присоединённой массы. Вместе с тем, уменьшается и количество мод колебаний по сравнению с условиями незаполненного водохранилища.

В статье [Hsu et al., 2020] с помощью математического моделирования показаны примеры расчёта изменений собственных частот плотины СШ ГЭС при возникновении дефектов в её конструкции. Величина этих изменений может составлять порядка нескольких сотых долей Гц, что является довольно малым значением. Если учесть, что рассматриваемая система, объединяющая совокупность сооружений, не является изолированной, то на значения частот собственных колебаний плотины могут оказывать воздействие и другие внешние факторы, такие как температурные колебания.

На рис. 3 представлена зависимость частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС от величины, обратной уровню заполнения водохранилища, и температуры окружающей среды в период с 2022 по 2024 год. Данные за 2022–2023 гг. получены с сейсмической станции «Черёмушки», а с 2024 г. — со станции «Филиал». Поскольку

собственная частота обратно пропорциональна уровню воды в водохранилище, для наглядности анализа используется величина, противоположная уровню наполнения.

На графике наблюдается чёткая зависимость частоты 4-й моды колебаний от обратного уровня воды. Видно, что в маловодный период, такой как 2022 г., когда приточность реки была снижена, значения частот колебаний оказываются выше, чем в последующие годы за тот же период. Здесь нужно понимать, что максимальный уровень наполнения водохранилища соответствует минимальным значениям частоты собственных колебаний плотины. При его предельном наполнении возможно раскрытие имеющихся нарушений из-за возникающей нагрузки. О наличии трещин в плотине известно с начала её эксплуатации, их заливка полимерными смолами производилась в 1996 г. [Брызгалов, 1999], но нужно учесть, что срок службы таких составов ограничен.

Что касается влияния температурного фактора на собственные частоты плотины, то здесь не всё так очевидно. Ранее в работах для 14-этажного кирпичного дома [Селезнев и др., 2024] и 22-этажного железобетонного дома [Yuen, Kuok, 2010] замечено увеличение значений частот собственных колебаний с ростом температуры и наоборот. Схожая картина зависимости частот от температуры прослеживается и для бетонной плотины в работе [Oliveira et al., 2024], где авторы фиксируют увеличение собственных частот в тёплый период, объясняя это смыканием вертикальных швов, приводящим к общему увеличению жёсткости,

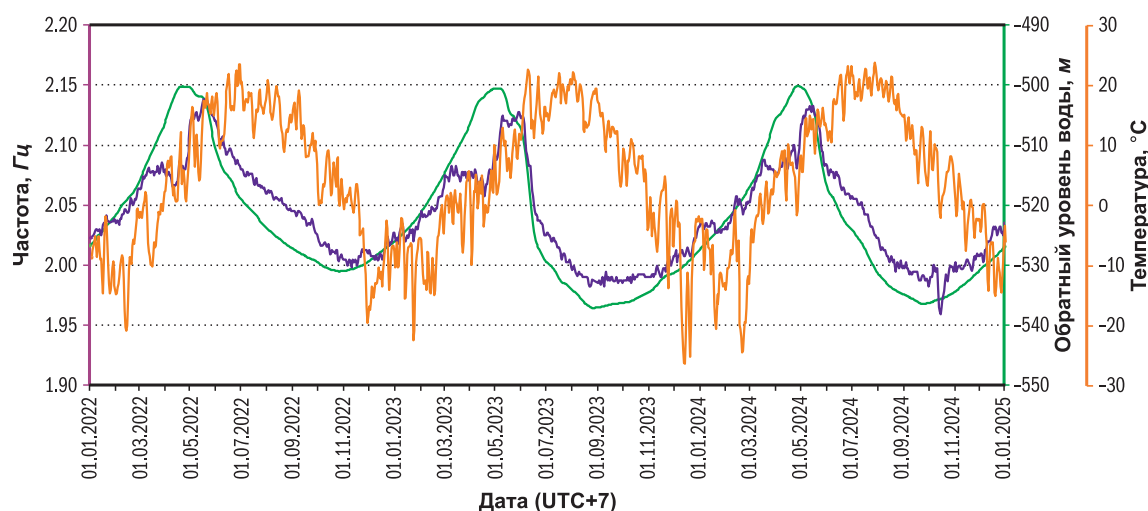


Рис. 3. График корреляции частоты собственных колебаний плотины на примере 4-й моды (фиолетовый цвет) с обратным уровнем водохранилища (зелёный цвет) и температурой (оранжевый цвет), по данным за 2022–2024 гг., E-компонента

а похолодание вызывает противоположный эффект. Но в ряде работ, исследующих мосты [Desjardins et al., 2006; Liu, DeWolf, 2007; Moaveni, Behmanesh, 2012], отмечается обратный эффект, где частоты возрастают с понижением температуры и падают с повышением. Такой же эффект наблюдается для каменных строений [Kita et al., 2019], а также для 6-этажного деревянного дома [Alarcón et al., 2023], 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 не прослеживается такой чёткой зависимости, ведь плотина массивнее всех рассматриваемых выше строений. Поэтому однозначного влияния температуры на частоты на всём протяжении исследуемого периода увидеть довольно сложно, отдельные пики на графике температуры могут соответствовать пикам на графике частоты, но таким же образом можно увидеть и обратную корреляцию. Сравнивая данные, также нужно учесть, что измерения взяты с метеостанции, расположенной в нескольких километрах от плотины, а не непосредственно на ней, что также может вносить ошибку.

Но главным вопросом является возможность по текущим значениям частоты выявлять наличие трещин, раскрывающихся под воздействием

гидростатического давления. В работе [Зюзина и др., 2025] говорится, что в 2017 г., когда уровень наполнения водохранилища достиг своего максимального уровня впервые с 2006 г., произошёл существенный рост деформаций, что повлекло за собой раскрытие трещин в нескольких секциях. При сбросе воды деформации прекратились. Сравнение графика деформации в 2017 г. для 31-й секции [Зюзина и др., 2025] с графиком изменения частоты собственных колебаний плотины (по данным со станции «Черёмушки») путём наложения их друг на друга демонстрируется на рис. 4. Графики деформаций по другим секциям имеют схожий вид.

На рис. 4а видно, что в 2017 г., когда деформации достигли наибольших значений, наблюдается небольшой пик в несколько сотых Гц. Он также соответствует скачку частоты 4-й моды собственных колебаний плотины, что согласуется с теорией раскрытия трещины при предельных уровнях водохранилища.

Чтобы убедиться в том, что выбранный нами размер окна для обработки сейсмических записей в 200 с обеспечивает необходимую точность определения частотных характеристик, был проведён сравнительный анализ данных с окном 10000 с для 2017 г., представленный на рис. 5.

В результате проведённого анализа можно сказать, что окно в 200 с полностью воспроизводит

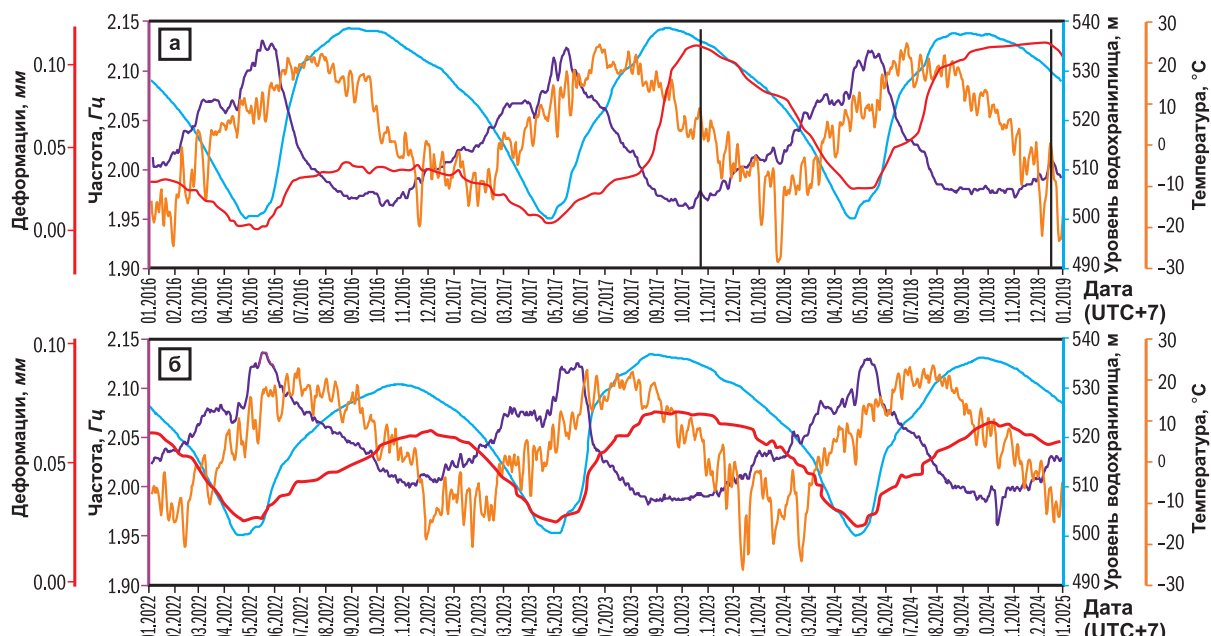


Рис. 4. Корреляция частоты собственных колебаний плотины на примере 4-й моды (фиолетовый цвет) с уровнем водохранилища (синий цвет) и температурой (оранжевый цвет), а также графиком деформации в секции 31 (красный цвет) [Зюзина и др., 2025], по данным за 2016–2018 гг. (а) и 2022–2024 гг. (б), Е-компонента.

Пиковые значения деформации отмечены чёрными вертикальными полосами

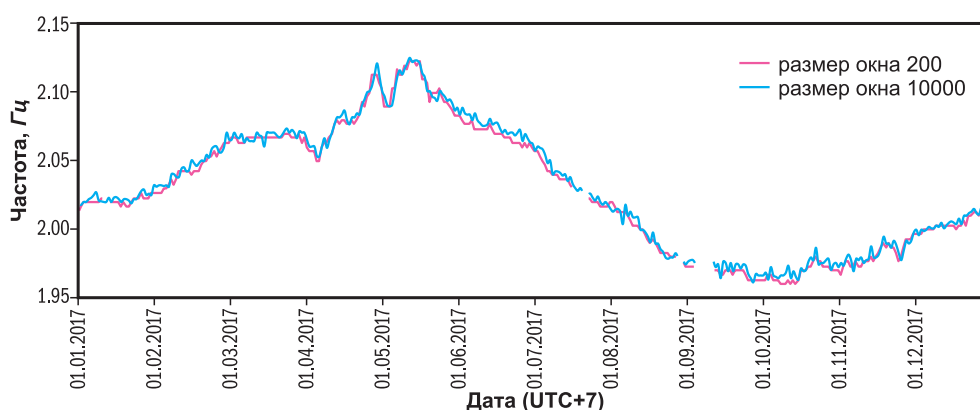


Рис. 5. Сравнение частоты собственных колебаний плотины на примере 4-й моды в зависимости от размера окна в 200 с (розовый цвет) и 10000 с (синий цвет) оконного преобразования Фурье по данным за 2017 г., Е-компонента

результаты окна со значением в 10000 с. Также для количественной оценки этого наблюдения был применён статистический метод расчёта коэффициента линейной корреляции Пирсона между полученными наборами данных. Значение коэффициента составило 0.99, что свидетельствует о практически полной линейной зависимости между ними. Следовательно, для целей нашего исследования, направленного на отслеживание изменений частоты, увеличение размера окна не вносит значимого вклада в точность результатов.

Результаты и обсуждение

Возвращаясь к рис. 4, можно заметить, что колебания частоты при достижении высших уровней наполнения водохранилища отмечаются практически во все представленные годы. Если же рассмотреть график за 2024 г., на нём также виден всплеск частоты собственных колебаний, который можно связать с раскрытием трещин. Однако в статье [Зюзина и др., 2025] утверждается, что в 2024 г. свидетельств раскрытия трещины зафиксировано не было, но рост деформаций всё равно фиксируется, пусть и не такой значительный, как в 2017 году.

По данным, получаемым в трёх километрах от плотины, трудно однозначно подтвердить факт раскрытия трещины в плотине, тем не менее, имеющиеся частотные аномалии могут свидетельствовать о наличии такого дефекта. Ведь мы регистрируем интегральные значения колебания всего сооружения, а не его локальных участков, что позволяет выявить общее наличие повреждений. Локализация дефектов требует более детальных наблюдений и комплексного подхода с обследованием непосредственно на самой плотине. Кроме того, необходимо

также учитывать влияние на изучаемые параметры проводимых ремонтных работ на плотине.

Замечено, что наибольшие изменения частоты наблюдаются при достижении минимальных значений заполнения водохранилища. Это может быть обусловлено снятием гидростатической нагрузки и последующим процессом релаксации.

Данный метод, основанный на изучении частот собственных колебаний, может выступать как система раннего выявления нарушений целостности сооружения, способная уловить зарождение негативной тенденции на самой ранней стадии.

Выводы

Проведённое исследование динамических характеристик Саяно-Шушенской ГЭС с использованием сейсмологических данных демонстрирует хороший потенциал метода мониторинга частот собственных колебаний для оценки структурной целостности крупных гидротехнических сооружений. Анализ данных с удалённых станций за 2016–2018 и 2022–2024 гг. подтвердил устойчивую обратную корреляционную зависимость частот собственных колебаний плотины от уровня воды, что согласуется с теоретическими ожиданиями. Увеличение массы плотины за счёт присоединённой массы воды приводит к снижению частот. Температурный фактор проявляет себя менее однозначно — наблюдались как прямые, так и обратные корреляции с частотой. Это может быть связано с комбинацией различных причин, а также с неточностью измерений.

Главный интерес представляют периоды максимального наполнения водохранилища, когда зафиксированы аномалии в поведении частот, что может быть связано с наличием нарушений

в структуре плотины. Однако однозначно интерпретировать эти изменения пока достаточно сложно, также необходим учёт влияния ремонтных мероприятий на объекте и данных о локальных условиях, таких как температура непосредственно на плотине.

Таким образом, для повышения надёжности диагностики необходимо получить дополнительные параметры, включая данные с метеостанций, расположенных ближе к объекту, а также учесть историю эксплуатации сооружения, включая ремонтные работы. Перспективы дальнейших исследований заключаются в уточнении влияния каждого фактора и разработке комплексных моделей, способных разделять эффекты окружающей среды и структурных изменений, что позволит более точно выявлять скрытые дефекты и прогнозировать поведение плотины в долгосрочной перспективе.

Работа выполнена за счёт 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» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. — Красноярск: Сибирский ИД «Суриков», 1999. — 561 с.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Данилов И.А., Дергачев А.А., Селезнев В.С., Толошинов А.В., Булатов В.А. Детальные инженерно-сейсмологические исследования плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии. — 2003. — № 6. — С. 86–108.

Зюзина Н.В., Рыбалко Д.Ю., Кондратьев С.Б. Оценка современного состояния отремонтированной зоны бетона плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. — 2025. — № 7. — С. 2–15. — DOI: 10.71917/EP.2025.07.76.59.001. — EDN: HLZMMS

Коковкин И.В., Громыко П.В., Брыксин А.А., Селезнев В.С. О возможности удалённого мониторинга работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС по данным сейсмологических наблюдений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2021. — Т. 2, № 2. — С. 81–89. — DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-81-89. — EDN: DEOGUA

Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Креchetов Д.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг. // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5, № 2. — С. 32–50. — DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.03. — EDN: AAVYDU

Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / Патент на изобретение RU 2140625 C1 от 27.10.1999. — EDN: EZZJKH

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 RU 2461847 C2 от 20.09.2012. — EDN: NSYIKF

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В., Соловьев В.М. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов // Геология и геофизика. — 2024. — Т. 65, № 7. — С. 1036–1044. — DOI: 10.15372/GiG2024102. — EDN: ZVFRU

Alarcón M., Soto P., Hernández F., Guindos P. Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost RaspberryShake seismic instrumentation // Engineering Structures. — 2023. — V. 275. — A. 115278. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115278

Choi D., Bell W., Kim D., Kim J. UAV-driven structural crack detection and location determination using convolutional neural networks // Sensors. — 2021. — V. 21, N 8. — A. 2650. — DOI: 10.3390/s21082650

Desjardins S.L., Londono N.A., Lau D.T., Khoo H. Real-time data processing, analysis and visualization for structural monitoring of the confederation bridge // Advances in Structural Engineering. — 2006. — V. 9, N 1. — P. 141–157. — DOI: 10.1260/136943306776232864

Ge Y., Yu X., Chen M., Yu C., Liu Y., Zhang G. Monitoring dynamic deformation of building using unmanned aerial vehicle // Mathematical Problems in Engineering. — 2021. — V. 2021. — A. 2657689. — DOI: 10.1155/2021/2657689

Han Q., Ma Q., Xu J., Lui M. Structural health monitoring research under varying temperature condition: A review // Journal of Civil Structural Health Monitoring. — 2021. — V. 11. — P. 149–173. — DOI: 10.1007/s13349-020-00444-x

Hsu T.Y., Valentino A., Liseikin A.V., Krechetov D.V., Seleznev V.S., Chen C.C., Wang R.Z., Lin T.K., Chang K.C. Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects // Measurement Science and Technology. — 2020. — V. 31, N 1. — A. 015801. — DOI: 10.1088/1361-6501/ab393c

- Huang Q., Wang Y., Luzi G., Crosetto M., Monserrat O., Jiang J., Zhao H., Ding Y. Ground-based radar interferometry for monitoring the dynamic performance of a multitrack steel truss high-speed railway bridge // *Remote Sensing*. — 2020. — V. 16, N 12. — A. 2594. — DOI: 10.3390/rs12162594
- Kita A., Cavalagli N., Ubertini F. Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy // *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2019. — V. 120. — P. 180–202. — DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.10.021
- Kuz'menko A.P., Saburov S.V. Identification of natural oscillation modes for purposes of seismic assessment and monitoring of HPP dams // *Power Technology and Engineering*. — 2016. — V. 50, N 2. — P. 152–163. — DOI: 10.1007/s10749-016-0676-9. — EDN: WVLZCD
- Liu C.Y., DeWolf J.T. Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads // *Journal of Structural Engineering*. — 2007. — V. 133, N 12. — P. 1742–1751. — DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:12(1742)
- Mazzanti P., Perissin D., Rocca A. Structural health monitoring of dams by advanced satellite SAR interferometry: Investigation of past processes and future monitoring perspectives // *Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (Turin, Italy, 1-3 July 2015). V. 3 / Ed. by A. De Stefano. — Turin: International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 2016. — P. 1761–1770.
- Milillo P., Perissin D., Salzer J.T., Lundgren P., Lacava G., Milillo G., Serio C. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2016. — V. 52. — P. 221–229. — DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.013
- Moaveni B., Behmanesh I. Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge // *Engineering Structures*. — 2012. — V. 43. — P. 58–68. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009
- Oliveira S., Rodrigues M., Alegre A., Mendes P., Carvalho E., Matsinhe B., Proença J. SHM of concrete dams with swelling. Time effect on natural frequency histories: HST-FE models // *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*. — Milan: International Association of Earthquake Engineering (IAEE), 2024.
- Pieraccini M., Miccinesi L. Ground-Based radar interferometry: A bibliographic review // *Remote Sensing*. — 2019. — V. 11, N 9. — A. 1029. — DOI: 10.3390/rs11091029
- Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review // *Engineering Structures*. — 1997. — V. 19, N 9. — P. 718–723. — DOI: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6
- Sanchez L.F.M. Internal swelling reactions in concrete: Mechanisms and condition assessment (1st ed.). — Boca Raton: CRC Press, 2024. — 220 p. — DOI: 10.1201/9781003188155
- Sevim B., Bayraktar A., Altunisik A.C. Investigation of water length effects on the modal behavior of a prototype arch dam using operational and analytical modal analyses // *Structural Engineering and Mechanics*. — 2011. — V. 37, N 6. — P. 593–615. — DOI: 10.12989/SEM.2011.37.6.59
- Shariatmadar H., Mirhaj A. Dam-reservoir-foundation interaction effects on the modal characteristic of concrete gravity dams // *Structural Engineering and Mechanics*. — 2011. — V. 38, N 1. — P. 65–79. — DOI: 10.12989/sem.2011.38.1.065
- Yuen K.V., Kuok S.C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // *Engineering Structures*. — 2010. — V. 32, N 8. — P. 2379–2386. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012

Сведения об авторах

Коковкин Иван Васильевич, науч. сотр. Сейсмологического филиала Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: titanoks1@ya.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: sel@gs.nsc.ru

Пархоменко Елизавета Эдуардовна, инженер-исследователь СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: lilavati21@mail.ru

Уколов Денис Александрович, инженер-исследователь СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: d.ukolov@g.nsu.ru

Assessment of the feasibility of detecting cracks in the Sayano-Shushenskaya HPP dam based on a detailed analysis of its natural frequencies

© 2025 I.V. Kokovkin, V.S. Seleznev, E.E. Parkhomenko, D.A. Ukolov

SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received October 17, 2025

Abstract This paper explores the potential for diagnosing the structural integrity of large hydraulic structures, such as the Sayano-Shushenskaya HPP (SSHPP), through the analysis of changes in their natural frequencies. It describes how seismographs located away from the object under study can be used to record microseismic vibrations and convert them into spectrograms. Using data collected between 2016 and 2024, it analyses the dependence of the fourth mode frequency of dam vibrations on the fill level and ambient temperature of the dam. The analysis shows that the fill level significantly affects the natural frequency of the dam, while the effect of temperature demonstrates ambiguous dependencies that require further study. The paper demonstrates that abnormal changes in the natural frequency of the dam occur at the limit values of the reservoir filling, which can be associated with defects revealed when significant hydrostatic pressure arises. Graphs comparing the frequency with deformation graphs obtained directly on the dam are provided. The importance of taking into account various factors that may influence changes in natural frequencies is emphasized. The method under consideration has shown good potential and should be tested on several structures in future.

Keywords Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station, natural frequencies, seismic monitoring, reservoir water level, crack formation.

For citation Kokovkin, I.V., Seleznev, V.S., Parkhomenko, E.E., & Ukolov, D.A. (2025). [Assessment of the feasibility of detecting cracks in the Sayano-Shushenskaya HPP dam based on a detailed analysis of its natural frequencies]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(4), 27-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.4.04>. EDN: KPZVNU.

References

- Alarcón, M., Soto, P., Hernández, F., & Guindos, P. (2023). Structural health monitoring of South America's first 6-Story experimental light-frame timber-building by using a low-cost RaspberryShake seismic instrumentation. *Engineering Structures*, 275:115278. DOI: [10.1016/j.engstruct.2022.115278](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115278)
- Bryzgalov, V.I. (1999). *Iz opyta sozdaniia i osvoeniia Krasnoarskoi i Saiano-Shushenskoi gidroelektrostantsii. Proizvodstvennoe izdanie* [From the experience of creating and developing the Krasnoyarsk and Sayano-Shushenskaya hydroelectric power stations. Production Edition]. Krasnoyarsk, Russia: Siberian Publishing house "Surikov", 561 p. (In Russ.).
- Choi, D., Bell, W., Kim, D., & Kim, J. (2021). UAV-driven structural crack detection and location determination using convolutional neural networks. *Sensors*, 21(8):2650. DOI: [10.3390/s21082650](https://doi.org/10.3390/s21082650)
- Desjardins, S.L., Londono, N.A., Lau, D.T., & Khoo, H. (2006). Real-time data processing, analysis and visualization for structural monitoring of the confederation bridge. *Advances in Structural Engineering*, 9(1), 141-157. DOI: [10.1260/136943306776232864](https://doi.org/10.1260/136943306776232864)
- Emanov, A.F., Bach, A.A., Danilov, I.A., Dergachev, A.A., Seleznev, V.S., Toloshinov, A.V., & Bulatov, V.A. (2003). [Detailed engineering and seismological studies of the Sayano-Shushenskaya HPP dam]. *Vestnik Krasnoarskoi gosudarstvennoi arkhitekturno-stroitel'noi akademii* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Academy of Architecture and Civil Engineering], (6), 86-108. (In Russ.).
- Ge, Y., Yu, X., Chen, M., Yu, C., Liu, Y., & Zhang, G. (2021). Monitoring dynamic deformation of building using unmanned aerial vehicle. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021:2657689. DOI: [10.1155/2021/2657689](https://doi.org/10.1155/2021/2657689)
- Han, Q., Ma, Q., Xu, J., & Lui, M. (2021). Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 149-173. DOI: [10.1007/s13349-020-00444-x](https://doi.org/10.1007/s13349-020-00444-x)
- Hsu, T.Y., Valentino, A., Liseikin, A.V., Krechetov, D.V., Seleznev, V.S., Chen, C.C., Wang, R.Z., Lin, T.K., & Chang, K.C. (2020). Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects. *Measurement Science and Technology*, 31(1):015801. DOI: [10.1088/1361-6501/ab393c](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab393c)
- Huang, Q., Wang, Y., Luzi, G., Crosetto, M., Monserrat, O., Jiang, J., Zhao, H., & Ding, Y. (2020). Ground-based radar interferometry for monitoring the dynamic performance of a multitrack steel truss high-speed railway Bridge. *Remote Sensing*, 16(12):2594. DOI: [10.3390/rs12162594](https://doi.org/10.3390/rs12162594)

- Kita, A., Cavalagli, N., & Ubertini, F. (2019). Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 180-202. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.021
- Kokovkin, I.V., Gromyko, P.V., Bryksin, A.A., & Seleznev, V.S. (2021). [Possibilities of remote monitoring of the Novosibirsk HPP hydraulic units operation according to seismological observations]. *Interekspo Geo-Sibir' [InterExpo Geo-Siberia]*, 2(2), 81-89. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-81-89. EDN: DEOGUA
- Kuz'menko, A.P., & Saburov, S.V. (2016). Identification of natural oscillation modes for purposes of seismic assessment and monitoring of HPP dams. *Power Technology and Engineering*, 50(2), 152-163. DOI: 10.1007/s10749-016-0676-9. EDN: WVLZCD
- Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., Emanov, A.F., & Krechetov, D.V. (2023). [Identification of natural oscillation frequencies of constructions from low-amplitude seismic signals (on the example of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to the monitoring data of 2001-2021)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal [Russian Journal of Seismology]*, 5(2), 32-50. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.03. EDN: AAVYDU
- Liu, C.Y., & DeWolf, J.T. (2007). Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads. *Journal of Structural Engineering*, 133(12), 1742-1751. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:12(1742)
- Mazzanti, P., Perissin, D., & Rocca, A. (2016). Structural health monitoring of dams by advanced satellite SAR interferometry: Investigation of past processes and future monitoring perspectives. In *Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (Turin, Italy, 1-3 July 2015); edited by A. De Stefano. Vol. 3* (pp. 1761-1770). Turin, Italy: International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure.
- Milillo, P., Perissin, D., Salzer, J.T., Lundgren, P., Lacava, G., Milillo, G., & Serio, C. (2016). Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 221-229. DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.013
- Moaveni, B., & Behmanesh, I. (2012). Effects of changing ambient temperature on finite element model updating of the Dowling Hall Footbridge. *Engineering Structures*, 43, 58-68. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.009
- Oliveira, S., Rodrigues, M., Alegre, A., Mendes, P., Carvalho, E., Matsinhe, B., & Proença, J. (2024). SHM of concrete dams with swelling. Time effect on natural frequency histories: HST-FE models. In *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*. Milan, Italy: International Association of Earthquake Engineering (IAEE).
- Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-based radar interferometry: A bibliographic review. *Remote Sensing*, 11(9):1029. DOI: 10.3390/rs11091029
- Salawu, O.S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 19(9), 718-723. DOI: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6
- Sanchez, L.F.M. (2024). *Internal swelling reactions in concrete: Mechanisms and condition assessment* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press, 220 p. DOI: 10.1201/9781003188155
- Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Baryshev, V.G., & Kuz'menko, A.P. (1999). [Method for determining the physical condition of buildings and structures]. Patent RF for invention, No. 2140625. (In Russ.). EDN: EZZJKH
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., & Bryksin, A.A. (2012). [Method for continuous monitoring of the physical condition of buildings and/or structures and a device for its implementation]. Patent RF for invention, No. 2461847. (In Russ.). EDN: NSYIKF
- Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Kokovkin, I.V., & Solovov, V.M. (2024). [Change in natural oscillation frequencies of buildings and structures depending on external factors]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, 65(7), 1036-1044. (In Russ.). DOI: 10.15372/GiG2024102. EDN: ZVFRU
- Sevim, B., Bayraktar, A., & Altunisik, A.C. (2011). Investigation of water length effects on the modal behavior of a prototype arch dam using operational and analytical modal analyses. *Structural Engineering and Mechanics*, 37(6), 593-615. DOI: 10.12989/SEM.2011.37.6.59
- Shariatmadar, H., & Mirhaj, A. (2011). Dam-reservoir-foundation interaction effects on the modal characteristic of concrete gravity dams. *Structural Engineering and Mechanics*, 38(1), 65-79. DOI: 10.12989/sem.2011.38.1.065
- Yuen, K.V., & Kuok, S.C. (2010). Ambient interference in long-term monitoring of buildings. *Engineering Structures*, 32(8), 2379-2386. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.04.012
- Zyuzina, N.V., Rybalko, D.Y., & Kondratiev, S.B. (2025). [The assessment of the current condition of the repaired cracks in the concrete zone of the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]*, (7), 2-15. (In Russ.). DOI: 10.71917/EP.2025.07.76.59.001. EDN: HLZMMS

Information about authors

Kokovkin Ivan Vasilievich, Researcher of the Seismological Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: titanoks1@ya.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Chief Researcher of the SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sel@gs.nsc.ru

Parkhomenko Elizaveta Eduardovna, Research Engineer of the SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: lilavati21@mail.ru

Ukolov Denis Alexandrovich, Research Engineer of the SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: d.ukolov@g.nsu.ru