

Изменения состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по многолетнему мониторингу собственных частот

Д. В. Кречетов¹, А. В. Лисейкин¹*

¹ Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail:krechet1@bk.ru

Аннотация. По данным сейсмической станции «Черёмушки» рассчитаны собственные частоты плотины Саяно-Шушенской ГЭС и их непрерывные изменения в течении 20 лет. Выделены сезонные изменения значений собственных частот, которые коррелируют с уровнем водохранилища, а также многолетние (глобальные) изменения, связанные с консолидацией тела плотины.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС, собственные частоты, сейсмостанция «Черёмушки»

Changes in the state of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to long-term monitoring of the natural frequencies.

D. V. Krechetov¹, A. V. Liseikin¹*

¹ Seismological Department of GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail:krechet1@bk.ru

Abstract. According to the data of the seismic station «Cheryomushki», resonance frequencies of the Sayano-Shushenskaya HPP dam and their continuous changes over 20 years are calculated. Seasonal changes in the values of resonance frequencies, which correlate with the level of the reservoir, as well as long-term (global) changes associated with the consolidation of the dam body, are highlighted.

Keywords: Sayano-Shushenskaya HPP, resonance frequencies, seismic station «Cheryomushki»

Введение

Для контроля целостности различных инженерных сооружений (зданий, плотин и т.п.) используются различные методы мониторинга, основанные на анализе изменений во времени различных параметров поля стоячих волн (прежде всего собственных частот) [1]. В то же время изменения поля стоячих волн могут быть связаны не только с возникновением каких-либо дефектов в конструкции, но и другими факторами. Так, исследования, проведённые на Саяно-Шушенской, Чиркейской, и Красноярской ГЭС, а также на аналогичных плотинах в других странах, показали, что значения собственных частот колебаний плотины значительно меняются в зависимости от уровня заполнения водохранилища [2, 3]. Также на их значение оказывают влияние и другие факторы – температура, образование льда со стороны верхнего бьефа плотины, и другие. Эти вариации собственных частот являются сезонными и не связанными с дефектами в теле плотины.

тин. Выделить их – одна из ключевых задач при разработке методики мониторинга целостности плотин и иных инженерных сооружений.

Измерение собственных частот инженерных сооружений обычно проводится по данным сейсмостанций, установленных непосредственно на изучаемом объекте. Это позволяет измерять собственные частоты с максимальной точностью, а также минимизировать влияние помех от других источников (микросейсм, резонансных частот от других объектов и т.д). Тем не менее у данного метода измерений есть существенный недостаток: измерения непосредственно на сооружении как правило ограничены во времени сроком действия договора. Поэтому для анализа многолетних изменений состояния сооружений предпочтительней использовать данные станций глобального сейсмологического мониторинга, расположенных в непосредственной близости от исследуемого объекта.

Так, в данной работе мониторинг собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС проводится по данным сейсмической станции Черёмушки, расположенной в 4,4 км к северо-востоку от плотины. Наблюдения на этой станции ведутся уже более 20 лет (с 2001 года), что позволило собрать практически непрерывный массив данных частот собственных колебаний плотины ГЭС за этот период. Это позволило выявить не только сезонные (годовые) колебания, но и глобальные изменения собственных частот за наблюдаемый период.

Методика наблюдений

Формы колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС установлены с высокой точностью в результате непосредственного сейсмического мониторинга плотины [3, 4]. По усреднённым спектрам, пересчитанным из сейсмической записи станции «Черёмушки», просматриваются амплитудные пики, которые являются воздействием резонансных колебаний плотины определённой моды. Опытным путём установлено, что несмотря на удалённость сейсмической станции от плотины (что неизбежно снижает амплитуду полезного сигнала относительно микросейсм), по спектрам чётко прослеживаются пики, соответствующие частотам собственных колебаний ГЭС с 1-й по 7-ю моду.

Анализ зависимости частоты собственных колебаний от УВБ

Как уже было отмечено выше, частоты собственных колебаний плотины ГЭС характеризуются однозначной сезонной изменчивостью, вызванную в первую очередь изменениями уровнем верхнего бьефа плотины (далее – УВБ). В периоды заполнения водохранилища частоты собственных колебаний снижаются, а в периоды сработки (снижения уровня) водохранилища – растут. Это объясняется воздействием на плотину присоединённой массы воды. В идеальной системе зависимость частот собственных колебаний плотины от УВБ должна иметь линейный или, с учётом времени, необходимым на релаксацию плотины, эллипсоидальный характер. Но реальный график зависимости собственных частот от УВБ значительно более сложный. Как можно видеть из работ [3, 4], эллипсоидальная форма кривой наблюдается только в периоды заполнения водохранилища, а в периоды сработки кривая носит куда более сложный характер. Есть

предположения, что это вызвано намерзанием льда в верхнем бьефе плотины, а также температурой и иными факторами. Это требует дополнительных исследований, а на текущем этапе было принято решение сосредоточиться на анализе зависимости собственных частот от УВБ в периоды заполнения водохранилища, где кривая более простая и синхронно повторяется каждый год.

Как уже было отмечено ранее, такая эллипсоидальная форма кривой обусловлена тем, что тело плотины не мгновенно реагирует на изменения уровня водохранилища, а с некоторой задержкой. Если исходить из предположения, что релаксация плотины происходит более-менее равномерно, то введение временного сдвига на определённый период теоретически должно привести «выпрямлению» кривой, в идеальном случае должна получиться линейная зависимость. Для проверки данной гипотезы были построены графики зависимости 3-й и 4-й мод (которые просматриваются наиболее чётко во всём диапазоне) от УВБ со сдвигом 3, 5, 7 и 10 дней, и в ходе их анализа было установлено, что наиболее близким к прямой графики получаются при сдвиге на 3 суток (рис. 1).

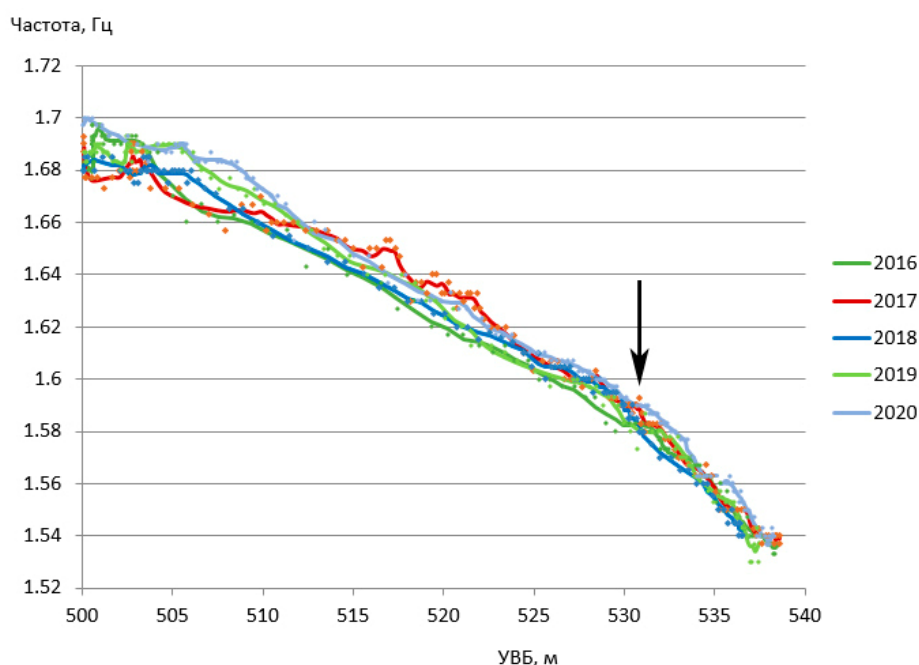


Рис. 1. Зависимость собственных частот колебаний плотины (на примере 3-й моды) от УВБ за 2016 – 2020 годы в периоды наполнения водохранилища с временным сдвигом 3 суток. Стрелочкой показана точка, где происходит смена линейной зависимости графика на более сложную.

Так, в диапазоне УВБ 506 – 530 м график за каждый год удалось аппроксимировать кривой с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,98$ для 3-й моды (рис. 2) и $R^2 > 0,97$ для 4-й моды.

При высоком уровне водохранилища (на отметках УВБ свыше 530 – 531 м) данная линейная зависимость нарушается, кривая графика начинает спадать значительно быстрее. Объяснить это можно сложной формой плотины и водохра-

нилища. Плотина в продольном сечении имеет форму обратной трапеции и существенно расширяется в верхней части. Из-за этого при увеличении УВБ объём водохранилища (а, следовательно, и оказывающая воздействие на плотину присоединенная масса воды) возрастает непропорционально сильнее, что приводит к более быстрому снижению частоты. Изменения резонансной частоты в данной части нуждаются в дополнительных исследованиях.

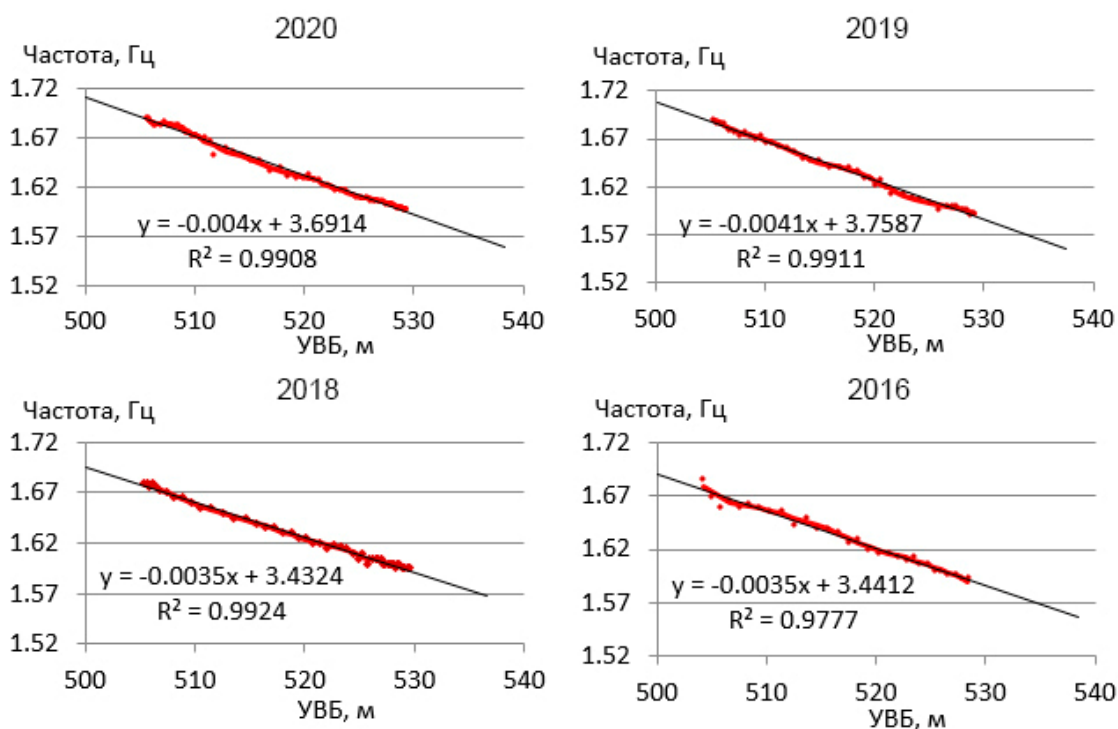


Рис. 2. Линейная аппроксимация кривой зависимости 3-й моды от УВБ со сдвигом 3 суток в диапазоне УВБ 506 – 530 м за 2020, 2019, 2018 и 2016 годы

Многолетние изменения частот собственных колебаний ГЭС

Помимо сезонных колебаний в ходе мониторинга удалось отследить и многолетние изменения в частотах собственных колебаний плотины. Так, на графике частоты собственных колебаний ГЭС за весь наблюдаемый период (рис. 3) видно, что частоты постепенно выросли примерно на 0,025 – 0,03 Гц. Причём наибольший рост наблюдался в период 2001 – 2010 годов, а затем рост собственных частот сильно замедлился или практически прекратился. Это свидетельствует о том, что в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС происходят глобальные процессы. Можно предположить, что до примерно 2010 года происходил процесс консолидации плотины, который после существенно замедлился.

Для более точного отслеживания именно глобальных многолетних изменений собственных частот необходимо отфильтровать регулярные (сезонные) колебания, вызванные описанными выше климатическими факторами. Анализ поведения зависимости частоты от УВБ в период заполнения водохранилища показал, что при введении временной поправки её с высокой точностью можно ап-

проксимировать прямой линией. Если из графика зависимости частоты от времени вычесть уравнение аппроксимации, то в идеальном случае (при отсутствии многолетних изменений и прочих факторов) он должен лечь на прямую, равную 0. Если же имеются многолетние изменения, то они покажут отклонение от нуля.

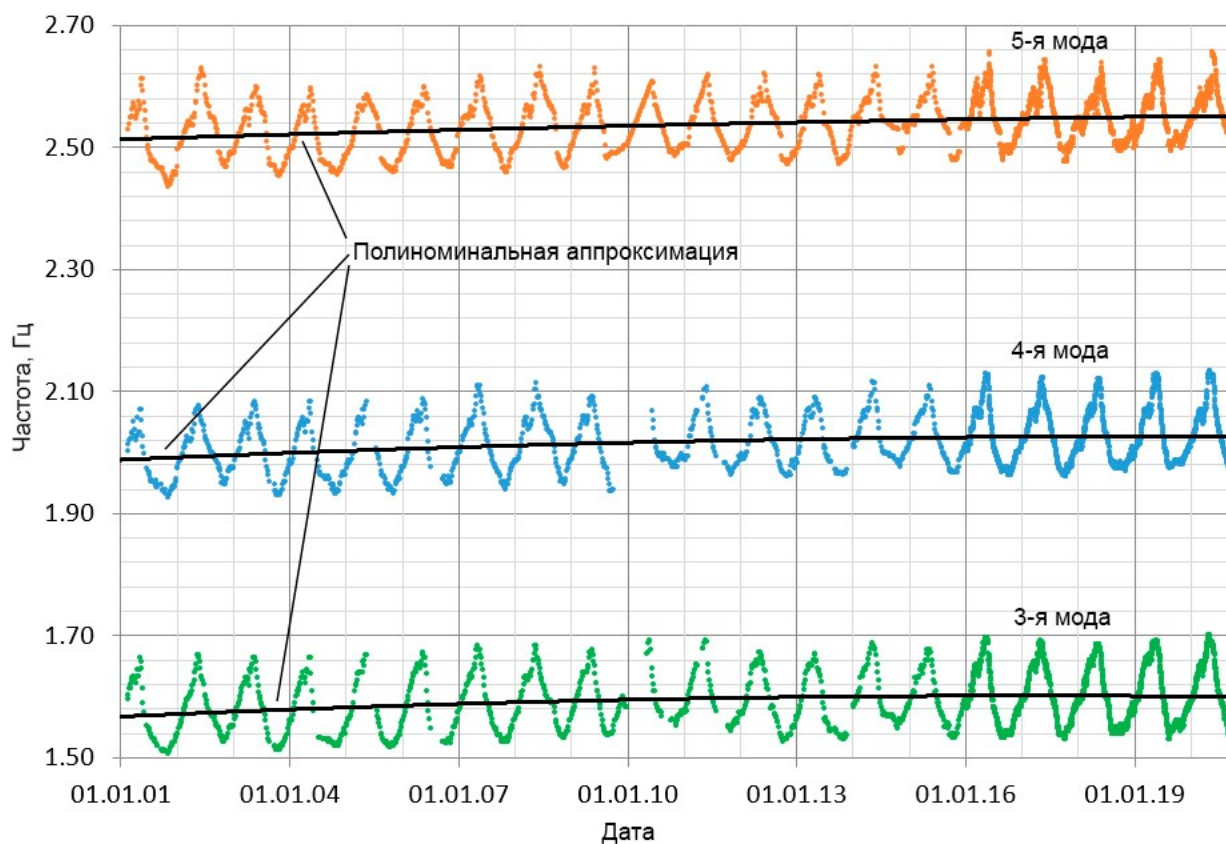


Рис. 3. Изменения частот собственных колебаний плотины 3-й и 4-й мод и 5-й мод за весь период наблюдений, и их полиномиальная аппроксимация 2-й степени (вида $y=ax^2+bx+c$, где a, b, c – автоматически подобранные коэффициенты)

Для построения такого графика в качестве эталонной была взята кривая зависимости резонансной частоты от УВБ за 2020-й год. При временном сдвиге на 3-е суток её с большой точностью ($R^2 = 0,99$) можно описать линейным уравнением вида (1):

$$y = -0.0040x + 3.6914 \quad (1)$$

где x – УВБ с временным сдвигом 3 суток, y – аппроксимация 3-й моды. Вводя это уравнение в график изменения резонансной частоты от времени, получаем отклонение 3-й моды от эталонной (рис. 4).

Как видно из графика, в целом глобальные (многолетние) изменения частоты незначительны, и, если брать любые близко расположенные годы, они су-

щественно меньше случайных отклонений, и строгим диагностическим признаком являться не может. Но при этом чётко прослеживается определённый глобальный тренд на постепенное возрастание собственной частоты. За 20 лет она выросла примерно на 0,03 Гц: наибольший рост наблюдался в период 2001 – 2010 годов (более 0,02 Гц), а в последующие годы рост замедлился. Возможно, также присутствуют колебания с периодом 3 – 4 года, но точность измерений не позволяет отследить их однозначно.

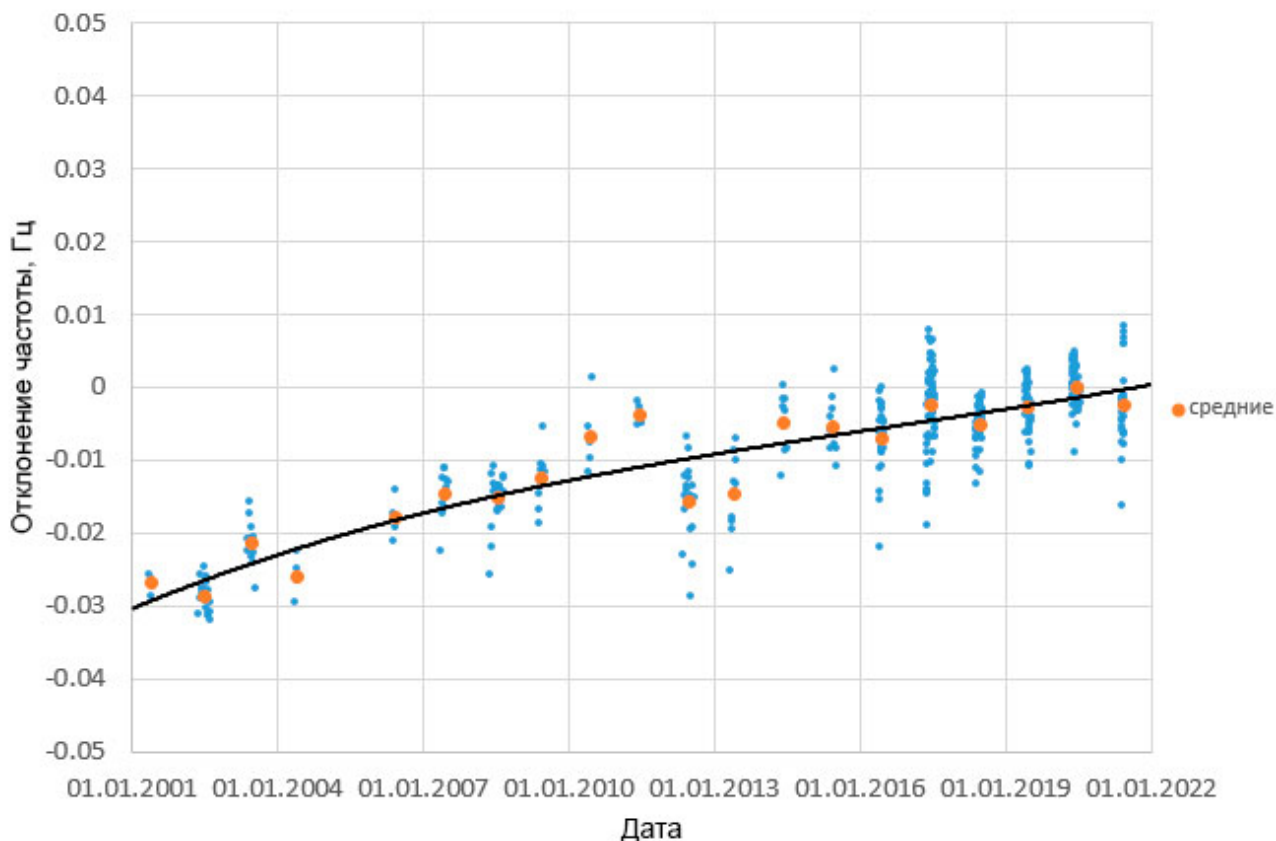


Рис. 4. Отклонение собственной частоты 3-й моды от эталонной (2020-й год) за период наблюдений 2001 – 2021 годы. Диапазон УВБ от 506 до 530 м в периоды заполнения водохранилища. Красным показаны средние значения за год, чёрной кривой – полиномиальная аппроксимация 2-й степени

Аналогичный график был построен и для 4-й моды (рис. 5). За эталонную частоту также был выбран 2020-й год, а эталонная кривая описывается линейным уравнением (2):

$$y = -0.0038x + 4.0398 \quad (2)$$

Как и у 3-й моды, видна явная тенденция на возрастание собственной частоты за весь период наблюдений. При этом наиболее активный рост (примерно на 0,03 Гц) наблюдается в первые 7 лет (с 2001 по 2007 годы), а затем график

выполаживается и становится почти горизонтальным. Также для 4-й моды наблюдается немного меньшие отклонения фактической резонансной частоты от эталонной.

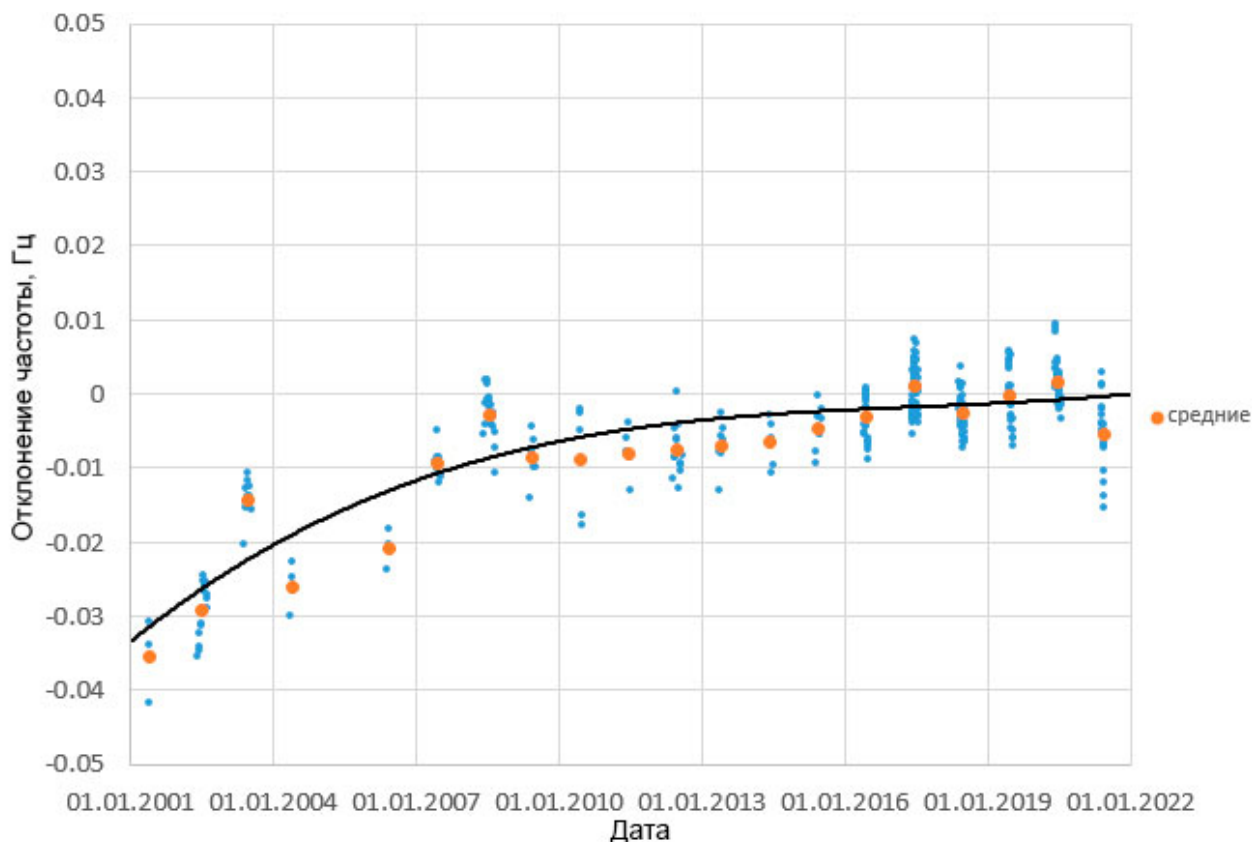


Рис. 5. Отклонение собственной частоты 4-й моды от эталонной (2020-й год) за период наблюдений 2001 – 2021 годы. Диапазон УВБ от 506 до 530 м в периоды заполнения водохранилища. Красным показаны средние значения за год, чёрной кривой – полиномиальная аппроксимация 2-й степени

Оценка результатов и выводы

В ходе проведённых исследований построен непрерывный диапазон данных резонансных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС с 2001 года по настоящее время. Установлено, что изменения частот собственных колебаний плотины ГЭС носят как глобальный (многолетний) характер, так и сезонный. Сезонные колебания определяются прежде всего изменениями уровня верхнего бьефа (УВБ) водохранилища, в меньшей степени – образованием льда, температурой воздуха и другими факторами.

Были проанализирована зависимость значений собственных частот от УВБ, установлено, что в периоды заполнения водохранилища при введении временного сдвига 3 суток данную зависимость в диапазоне УВБ от 506 до 530 м можно с большой точностью описать линейным уравнением.

В периоды наполнения водохранилища были вычислены отклонения реальной частоты от эталонной, по которым можно сделать вывод, что имеются гло-

бальные изменения собственных частот за наблюдаемый период. Но при этом нужно признать, что имеются сравнимые случайные отклонения, которые значительно искажают результат. Наилучшим образом глобальные изменения видны по 4-й моде.

Следует отметить, что график отклонения собственной частоты 4-й моды от эталонной в период с 2001 по 2016 годы коррелирует с радиальными перемещениями плотины, замеренными при минимальных УВБ [5]. Максимальный рост значений собственных частот наблюдался в первой половине 2000-х годов, когда по данным измерений перемещений гребня плотины в ней ещё шёл процесс консолидации. После того, как плотина перешла в стабилизированное состояние (с начала 2010-х годов), значительных изменений по частоте собственных колебаний не выявлено.

Для дальнейшей проработки системы мониторинга плотины Саяно-Шушенской ГЭС по собственным частотам стоячих волн требуется более детальный анализ характера изменений частот в зависимости от УВБ и прочих факторов.

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. Еманов, А. Ф. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений / А. Ф. Еманов, В. С. Селезнев, А. А. Бах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20-24. – EDN IAWNLF.
2. Лисейкин, А. В. Собственные частоты и формы колебаний арочной плотины Чиркейской ГЭС по данным метода стоячих волн / А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, З. А. Адилов // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 12. – С. 2-7. – EDN YRLGUH.
3. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища / А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, А. А. Бах, Д. В. Кречетов // Геофизические методы исследования земной коры : Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва, Новосибирск, 08–13 декабря 2014 года. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 182-186. – EDN TTBKTV.
4. Саранцев, М. И. Определение собственных частот колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным инженерно-сейсмометрических наблюдений / М. И. Саранцев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. – Т. 283. – С. 72-81. – EDN ZRJGEN.
5. Вульфович, Н. А. Динамика изменения необратимых перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период эксплуатации при проектных параметрах нагружения (1990 - 2016 гг.) / Н. А. Вульфович, Л. П. Потехин // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 8. – С. 2-9. – EDN ZFROLR.

© Д. В. Кречетов, А. В. Лисейкин, 2022