

## **О МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС)**

*Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В.*

*Федеральное государственное учреждение науки Геофизическая служба Сибирского отделения  
Российской Академии наук (ГС СО РАН), Новосибирск, [sel@gs.sbras.ru](mailto:sel@gs.sbras.ru).*

### **Введение**

В последние годы в ГС СО РАН разрабатывается методика мониторинга состояния крупных промышленных объектов, основанная на анализе сейсмических записей, полученных с локальных сейсмологических сетей. Толчком для развития данного направления послужила крупнейшая в истории гидроэнергетики авария, произошедшая на Саяно-Шушенской ГЭС (далее – СШ ГЭС) 17 августа 2009 г. В результате аварии погибло 75 человек, все гидроагрегаты станции, а также конструкции машинного зала получили серьезные повреждения. Была выведена из строя вся имеющаяся на СШ ГЭС контрольно-измерительная аппаратура, что создало определенные трудности в расследовании причин инцидента. Вместе с тем, на расстоянии около 4 км от ГЭС, располагается постоянно действующая сейсмостанция «Черемушки» (CERR). Специалистами ГС СО РАН, при финансовой поддержке со стороны ОАО «РусГидро», был выполнен ряд экспериментальных работ, включающих регистрацию и анализ колебаний сетью из временных сейсмических станций, установленных на плотине и в здании машинного зала СШ ГЭС, с одновременным анализом микросейсмических колебаний на сейсмостанции «Черемушки». Данные исследования позволили установить, что колебания, происходящие на гидроэлектростанции, регистрируются на удаленной сейсмической станции и могут быть выделены из сейсмической записи при последующей ее цифровой обработке. В результате анализа записи с сейсмостанции «Черемушки» до и после момента аварии, удалось разобраться в ее причинах. Кроме этого, данные исследования показали принципиальную возможность использования записей сейсмостанций, расположенных вблизи крупных промышленных объектов, как для контроля над вибрационным состоянием работающего оборудования, так и для мониторинга состояния инженерных сооружений.

### **Методика исследований**

Методика исследований заключается в анализе записей колебаний, полученных с сейсмостанций локальной сейсмологической сети, расположенных вокруг объекта исследований – крупного промышленного объекта (например, гидроэлектростанции). Данный анализ включает в себя выделение из сейсмической записи, состоящей из суммы колебаний от различных источников, «полезных» сигналов, связанных с работой нужного источника. Особенностью работы гидроагрегатов ГЭС является то, что они излучают колебания с постоянными частотами. Инженерные сооружения ГЭС, прежде всего, плотина, а также водоводы и отсасывающие трубы характеризуются набором собственных частот, которые при определенных условиях также не меняются с течением времени. Работающие гидроагрегаты и колеблющиеся с собственными частотами сооружения порождают сейсмические колебания, которые распространяются от промышленного объекта до сейсмостанций и фиксируются на сейсмической записи. Разумеется, кроме этих колебаний, которые являются для нас «полезными», в сейсмической записи всегда присутствует и множество других сигналов, являющихся «помехой». Причем, амплитуда «помехи», как правило, существенно выше амплитуды полезного сигнала. Таким образом, задача сводится, в первую очередь, к определению соответствия источник-частота. Зная это соответствие, мы можем из сейсмической записи, с применением процедур накопления полезного сигнала, выделить колебание с заданной частотой и, анализируя изменения амплитуд данного колебания, контролировать работу нужного источника.

Методика обработки и анализа сейсмических данных состоит в следующем. На первоначальном этапе строится спектрограмма сейсмической записи, позволяющая на качественном уровне определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени и выделить из записи колебания, частоты которых постоянны. Далее, мы определяем, каким источникам соответствуют какие частоты колебаний. Частоты некоторых из источников выделяемых

колебаний известны заранее. Например, для Саяно-Шушенской ГЭС такими колебаниями являются «оборотная» (2.38 Гц) и «лопастная» (35.71 Гц) частоты. Если частота источника точно неизвестна, то ее можно определить исходя из анализа корреляционных связей между одновременными изменениями амплитуд колебаний и параметров работы источников. Если такая связь найдена, то это означает, что мы нашли соответствие частота-источник. Как отмечалось, в сейсмической записи могут присутствовать колебания, источником которых являются колеблющиеся с собственными частотами инженерные сооружения. Для того чтобы достоверно определить значения собственных частот сооружений, необходимо провести обследование данного сооружения методом стоячих волн [1]. В конечном итоге, установив соответствие источник-частота, мы строим графики изменения амплитуд колебаний по следующей формуле:

$$A_f(t) = \frac{2}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} F(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \right|, \quad (1)$$

где  $F(\tau)$  – зарегистрированный сейсмический сигнал,  $f$  – частота, для которой строится график (Гц),  $t$  – время,  $T$  – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда  $A_f(t)$ ,  $|\dots|$  – обозначает модуль комплексного числа. В данной формуле важным параметром является длина окна ( $T$ ) – от нее напрямую зависит детальность построения графика по времени. Но сильно уменьшать длину окна нельзя, т.к. при этом уменьшается разрешенность построения по частоте (пропорционально  $1/T$ ). Например, нами обычно используется длина окна 10 с. Это означает, что сигналы длительностью менее 10 с мы изучать не можем. Но при этом разрешенность по частоте составляет 0.1 Гц – это означает, что любые сигналы на сейсмограмме с частотами, отстоящими от частоты изучаемого сигнала более чем на 0.1 Гц, не будут влиять на результат определения амплитуд по формуле (1).

### Обсуждение результатов

Ниже приводятся примеры использования зарегистрированных данных сейсмостанции «Черемушки» для изучения колебательных процессов, происходящих на СШ ГЭС.

На рис.1 показан пример анализа изменений амплитуд колебаний на «оборотной» частоте гидроагрегатов по записям сейсмостанции «Черемушки». Из рисунка видно, что на спектрограмме сейсмической записи станции, расположенной в 4.4 км от СШ ГЭС, отчетливо выделяется колебание с частотой 2.38 Гц. Данная частота является оборотной для гидроагрегатов и изменения амплитуд колебаний на ней свидетельствуют об изменении дебаланса турбины. Видно, что при запуске или остановке гидроагрегата №2, происходит скачкообразное изменение амплитуд колебаний на этой частоте. При этом, в ходе изменения нагрузок, амплитуда колебаний не меняется, что свидетельствует о постоянном дебалансе турбины. Зная, в какие моменты времени запускался или останавливался определенный гидроагрегат и, измерив величину изменения амплитуд колебаний по записям сейсмической станции, мы можем сделать оценку вибрационного состояния выбранного гидроагрегата. Так, в работе [2] было установлено, что амплитуды колебаний 2-го гидроагрегата в период несколько месяцев до аварии на оборотной частоте были примерно в 1.5 раза выше, чем амплитуды колебаний остальных машин. Кроме этого, анализ данных показал, что перед аварией не было увеличений амплитуд колебаний, что опровергло версию других исследователей об увеличении вибраций 2-го гидроагрегата за 1.5-2 месяца до аварии.

Некоторые исследователи считали, что причиной выхода из строя 2-го гидроагрегата послужил гидроудар, который «выбил» агрегат с места крепления. В таком случае, сейсмические волны от него должны быть зафиксированы на сейсмостанции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от СШ ГЭС. Вместе с тем, анализ данных показал, что никакого ударного воздействия на записях во время аварии не выделяется на фоне сейсмических шумов, с амплитудой порядка 500 нм/с. Предположим, что такое воздействие было. В таком случае, на удалении в 4.4 км, его амплитуда не должна превышать уровня шумов, иначе оно было бы заметно на сейсмограмме. В сейсмологии хорошо известны методы определения энергии сейсмических источников по записям сейсмостанций с различных эпицентральных удалений. Используя эти подходы, мы оценили, что энергия не превышает 4-го энергетического класса. Для сравнения, ударное воздействие с такой энергией может быть вызвано взрывом около 0.5 кг тротила или 10-15 литровым пневмоисточником, используемым в сейсморазведочных работах. Расчеты показывают, что этой энергии недостаточно для срыва 1500 тонного гидроагрегата, да еще и закрепленного шпильками. Поэтому, с использованием данных с сейсмостанции «Черемушки» во время аварии было доказано, что причиной инцидента не могло быть ударное воздействие [3].

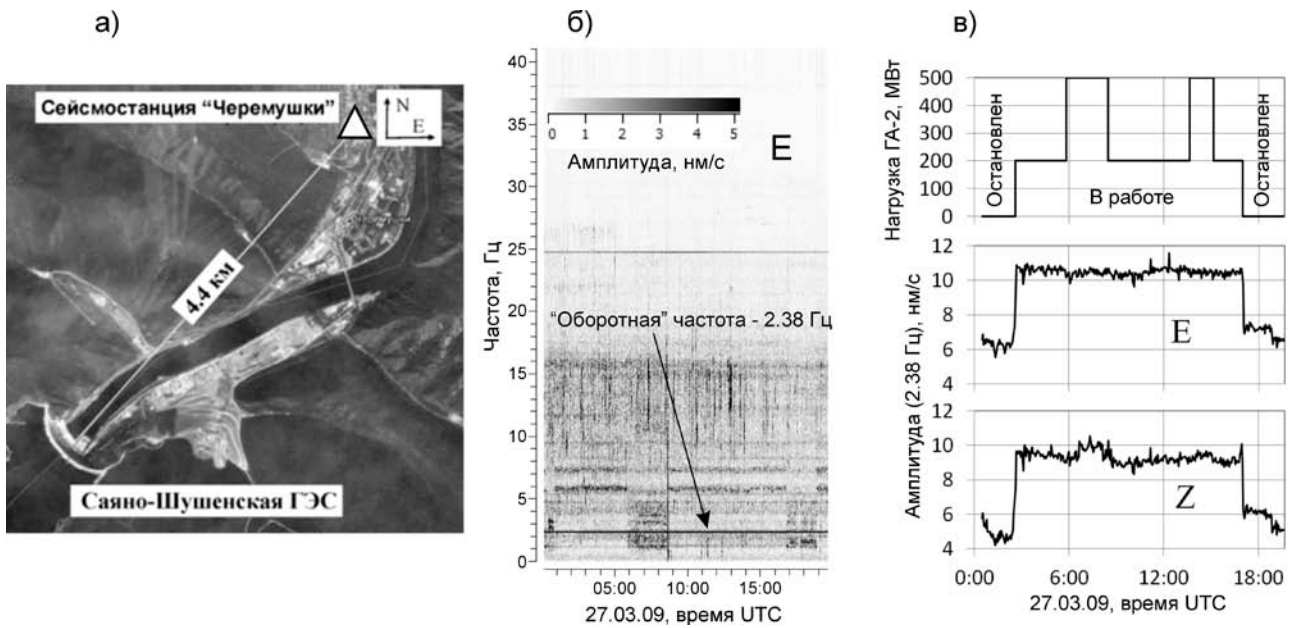


Рис.1. Пример оценки дебаланса 2-го гидроагрегата (ГА-2) Саяно-Шушенской ГЭС по записям сейсмической станции. (а) – схема расположения сейсмостанции «Черемушки»; (б) – спектрограмма сейсмической записи E-компоненты; (в) – графики изменения нагрузки ГА-2 и амплитуд колебаний на оборотной частоте.

Из рис.2 видно, что в волновом поле, регистрируемом сейсмостанцией «Черемушки» наблюдаются низкочастотные (в интервале от 1 Гц до 5 Гц) колебания, которые одновременно фиксируются в верхней части плотины СШ ГЭС. Установлено, что амплитуды этих колебаний увеличиваются примерно на порядок при определенных режимах работы гидроагрегатов (в данном примере – при нагрузке 480 МВт). Данные колебания являются собственными колебаниями плотины, что подтверждается исследованиями методом стоячих волн, выполненными в сентябре 2009г (рис.2а). Нашими исследованиями [4] было показано, что существуют интервалы нагрузок, при которых наблюдаются увеличения амплитуд собственных колебаний плотины в 10-20 раз по сравнению с фоновыми значениями. Это явление характерно для всех 10-ти гидроагрегатов СШ ГЭС, причем интервалы нагрузок меняются в зависимости от уровня наполнения водохранилища. Следует отметить, что причина возникновения этих колебаний до настоящего времени неясна, что представляет собой предмет дальнейших исследований.

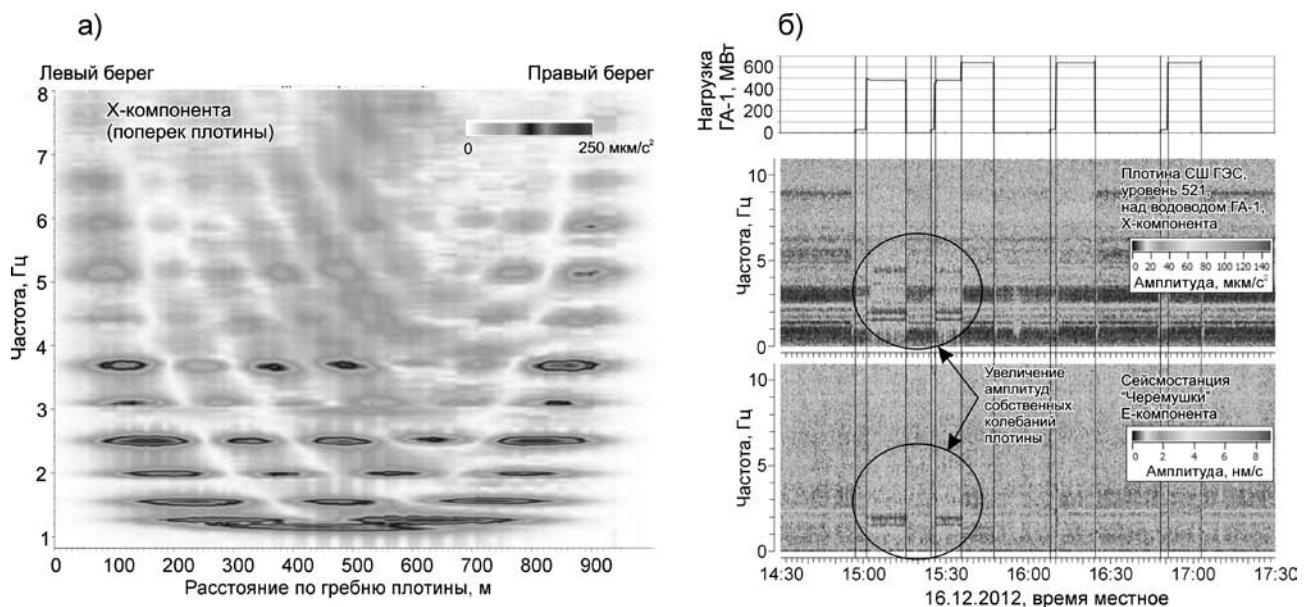


Рис.2. Спектральное представление поля стоячих волн в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (а); график изменения нагрузок 1-го гидроагрегата (ГА-1), спектрограммы сейсмических записей в плотине и на сейсмостанции «Черемушки» (б).

Известно, что практически на любом инженерном сооружении распространение сейсмических колебаний приводит к формированию набора стоячих волн. В поле стоячих волн содержится информация о физическом состоянии сооружения: например, если появился какой-то дефект в строительной конструкции – это приводит к изменению поля стоячих волн. Поэтому широкое распространение получили способы мониторинга состояния инженерных сооружений, основанные на анализе изменений параметров поля стоячих волн (например, собственных частот) с течением времени [5]. Но, изменения собственных частот могут быть связаны не только с появлением каких-то дефектов. Они меняются при изменении внешней нагрузки, не приводящей к возникновению дефектов конструкции и это обстоятельство необходимо учитывать.

Плотина Саяно-Шушенской ГЭС в 1998 году была детально исследована методом стоячих волн. Исследования проводились дважды – при максимальном и минимальном уровне наполнения водохранилища, и было установлено, что на первых семи формах собственные частоты меняются таким образом, что при минимальном уровне они повышенные, а при максимальном – пониженные. Эти изменения относительно невелики и составляют порядка одной десятой герца. Есть работы, посвященные теоретическим расчетам собственных колебаний плотины без воды и с водой. Так, в работе [6] показано, что при наполнении водохранилища значения собственных частот должны уменьшаться. Для того чтобы понять как детально меняются собственные частоты плотины СШ ГЭС с течением времени нужно либо многократно в разное время проводить исследования методом стоячих волн по методике [1], что достаточно трудоемко и затратно, либо придумать другой более оптимальный способ.

Как было показано выше, в спектрах сейсмических записей сейсмостанции «Черемушки» можно выделить колебания, источником которых являются собственные колебания плотины. Основная трудность заключается в том, что данные сигналы очень слабы (на несколько порядков ниже) по сравнению с микросейсмическим фоном. Для выделения этих сигналов применялась следующая процедура. Сейсмическая запись разбивалась на фрагменты длительностью 300 с, для каждого из них вычислялся амплитудный спектр, затем полученные спектры усреднялись. Из рис.3а видно, что необходимо использовать достаточно длинные (до 5 суток) записи для вычисления усредненных спектров, чтобы достоверно выделить интересующие нас колебания из шумов. Длительность 300 с для вычисления единичного спектра выбрана исходя из требуемой разрешенности спектра по частоте. Из дополнительных процедур цифровой обработки, применялось обнуление т.н. импульсных помех, вызванных, например, близкими землетрясениями (район с повышенной сейсмической активностью), которые существенно влияют на результат вычисления спектра. На рис.3б показан результат построения описанным способом 5-ти суточных усредненных спектров за 2012 год. Видно, что в течение года, частоты собственных колебаний плотины СШ ГЭС меняются и эти изменения коррелируют с изменениями уровня водохранилища. Это видно из рис.3в: с увеличением уровня водохранилища, значения частот уменьшаются. Причем, для форм 1-4 и 6 эта зависимость монотонная, в первом приближении линейная. В то же время, зависимости для форм 5 и 7 имеют разрывы и скачки, приводящие к немонотонности и неоднозначной связи между уровнем водохранилища и значениями собственных частот плотины. Данное обстоятельство, возможно, связано со следующими изменениями состояния плотины. Известно, что в теле плотины существует трещина, которая раскрывается при достижении определенного уровня водохранилища, а затем закрывается, при его снижении.

Результаты, полученные в настоящем исследовании, могут быть использованы при мониторинге технического состояния плотины СШ ГЭС. По непрерывным записям с сейсмостанции «Черемушки», каждые 5 суток можно определять значения собственных частот плотины. Эти значения необходимо сравнивать с величинами, полученными при соответствующих уровнях наполнения водохранилища. Если значения собственных частот будут различаться, то необходимо выполнить более детальный анализ состояния плотины с обследованием методом стоячих волн для установления причин этих различий. Необходимо отметить, что если установить сейсмостанцию для анализа непосредственно на плотине, то накопление полезного сигнала будет происходить значительно быстрее – в течение нескольких десятков минут.

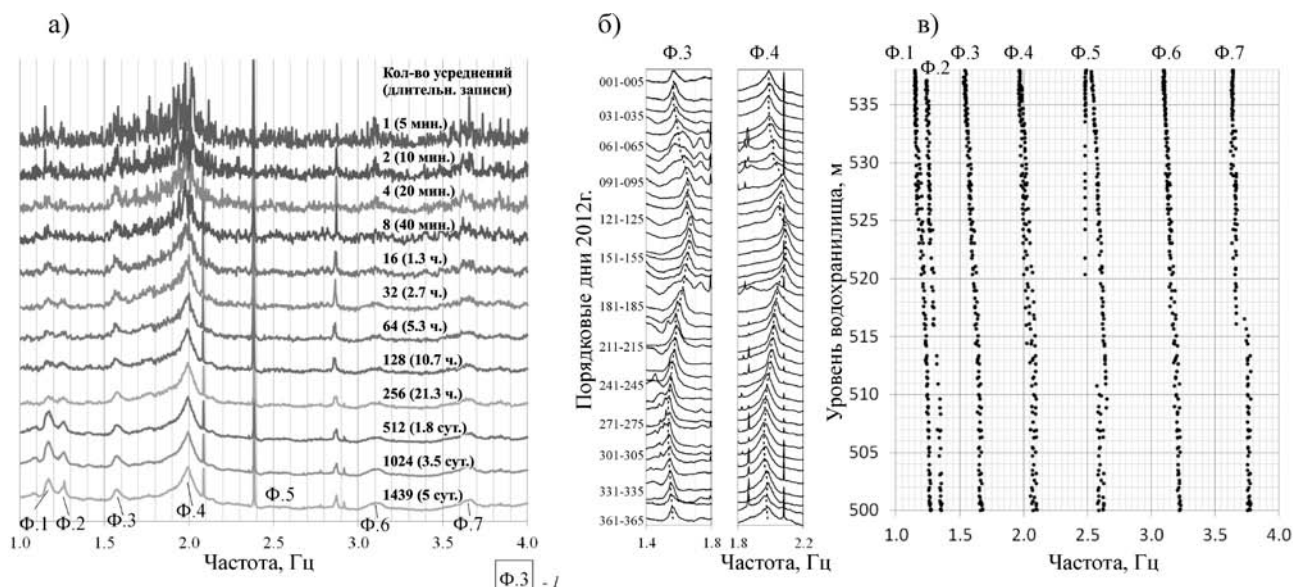


Рис.3. Пример определения значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС по сейсмическим записям станции «Черемушки». (а) – усредненные спектры, при разных интервалах усреднения; (б) - фрагменты 5-ти суточных усредненных спектров за все дни 2012 года; (в) – зависимости между уровнем водохранилища и значениями собственных частот. 1 – обозначение номера формы собственных колебаний.

### Заклучение

Таким образом, разрабатываемая в ГС СО РАН методика мониторинга состояния крупных промышленных объектов, основанная на анализе сейсмических записей, полученных с локальных сейсмологических сетей, позволяет решать следующие задачи:

- осуществлять дистанционный контроль над вибрационным состоянием промышленного оборудования;
- следить за изменениями значений собственных частот сооружений и тем самым осуществлять мониторинг их технического состояния;
- получать дополнительную объективную информацию, необходимую для расследования причин возникновения нештатных ситуаций на крупных промышленных предприятиях.

### Список литературы

1. 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 детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. №2. 2002. С. 192 - 207.
2. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громько П.В. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009г.? // Гидротехническое строительство. №10. 2012. С. 48-50.
3. Victor S. Seleznev, Alexey V. Liseikin, Alexey A. Bryksin, and Pavel V. Gromyko. What Caused the Accident at the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant (SSHPP): A Seismologist's Point of View // Seismological Research Letters. July/August 2014. v. 85. P. 817-824.
4. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громько П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. №7. С. 2-7.
5. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение РФ. №2461847. Бюл. №26. 20.09.2012г.
6. Козинец Г.Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5 (23). С. 43-48.