

## **О ПРИЧИНЕ АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СЕЙСМОЛОГА**

### ***Виктор Сергеевич Селезнев***

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

### ***Алексей Владимирович Лисейкин***

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геофизик, тел. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

### ***Алексей Александрович Брыксин***

Сейсмологический филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, заместитель директора, тел. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

### ***Павел Владимирович Громыко***

Геофизическая служба СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, геофизик, тел. (383)333-20-21, e-mail: psharak@ngs.ru

Анализируются колебания, полученные на сейсмической станции «Черемушки», расположенной в 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, в плотине и машинном зале ГЭС до и после аварии 17 августа 2009 г. Предполагается, что причиной разрушения шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата №2 явилась длительная работа под воздействием высокочастотных вибраций, неучтенных при конструировании.

**Ключевые слова:** Саяно-Шушенская ГЭС, сейсмостанция, авария, колебания.

## **ABOUT THE CAUSE OF THE ACCIDENT AT SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP: THE SEISMOLOGIST'S POINT OF VIEW**

### ***Victor S. Seleznev***

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Doctor of Science, Director, tel. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

### ***Aleksey V. Liseikin***

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Geophysicist, tel. (383)333-25-35, e-mail: lexik@ngs.ru

### ***Alexey A. Bryksin***

Seismological Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Deputy Director, tel. (383)330-39-14, e-mail: fater.gs@gmail.com

### ***Pavel V. Gromiko***

Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prosocet, Geophysicist, tel. (383)330-20-21, e-mail: psharak@ngs.ru

The seismic data recorded at the seismic station "Cheryomushki" (located 4 km from the power plant), a dam and hydroelectric turbine hall before and after the accident on August 17, 2009 are analyzed. It is assumed that the cause of the destruction of mounting studs of turbine covers hydroelectric №2 was the long-term operation under the influence of high frequency vibrations, unrecorded in the design.

**Key words:** Sayano-Shushenskaya HPP, seismic station, accident, fluctuations.

В августе 2009 г. произошла крупнейшая из всех, произошедших когда-либо на гидростанциях в России, авария. На Саяно-Шушенской ГЭС погибло 75 человек, вышли из строя все 10 гидроагрегатов общей мощностью в 6400 МВт. Уже на второй день после аварии один из авторов статьи был на ГЭС и принял участие в работе правительственной комиссии по расследованию причин аварии. В средствах массовой информации много писали о различных версиях аварии. Комиссия установила, что причина аварии – "разрушение шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата №2, вызванное дополнительными динамическими нагрузками переменного характера, которому предшествовало образование и развитие усталостных повреждений узлов крепления, что привело к срыву крышки и затоплению машинного зала станции" [1]. Мы попытаемся, опираясь на данные, полученные во время и до момента аварии на сейсмостанции «Черемушки» (CERR), находящейся в 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, и на данные, которые были получены в процессе запуска гидроагрегатов после аварии, разобраться, в чем причина трагедии, и выяснить, откуда появились "дополнительные динамические нагрузки".

Прежде надо понять, существует ли физически такая возможность. У нас имеются записи колебаний различных механизмов, работающих на гидростанции, зарегистрированные на расстоянии примерно в 100 длин волн на фоне помех. Аналогичная задача, в возможность решения которой ни у кого нет сомнения, – это описание звучания оркестра на расстоянии в 30–50 м. Примерно такую же информацию пишет и сейсмологическая станция, соединенная с трехкомпонентным сейсмоприемником. Частоты, так же, как и расстояния, отличаются примерно на 2 порядка.

После аварии начали запускать как гидроагрегаты «старой» конструкции, которые были на ГЭС до аварии, так и «новой» конструкции. Данные, полученные с временных сейсмических станций, установленных вблизи гидроагрегатов и на сейсмостанции «Черемушки», позволили установить, что работающий гидроагрегат излучает набор монохроматических частот, кратных частоте вращения. Их амплитуда значительно меняется при различных режимах работы гидроагрегата, и некоторые гармоники (прежде всего на оборотной частоте, равной 2,38 Гц, и лопастной – 38,10 Гц) хорошо регистрируются на сейсмостанции (рис.1). Изучение полученных данных позволило выявить связи между изменениями амплитуд монохроматических сигналов и параметрами работы гидроагрегатов. Кроме монохроматических колебаний, на станции «Черемушки» регистрируются и колебания, источником которых являются собственные колебания плотины [2].

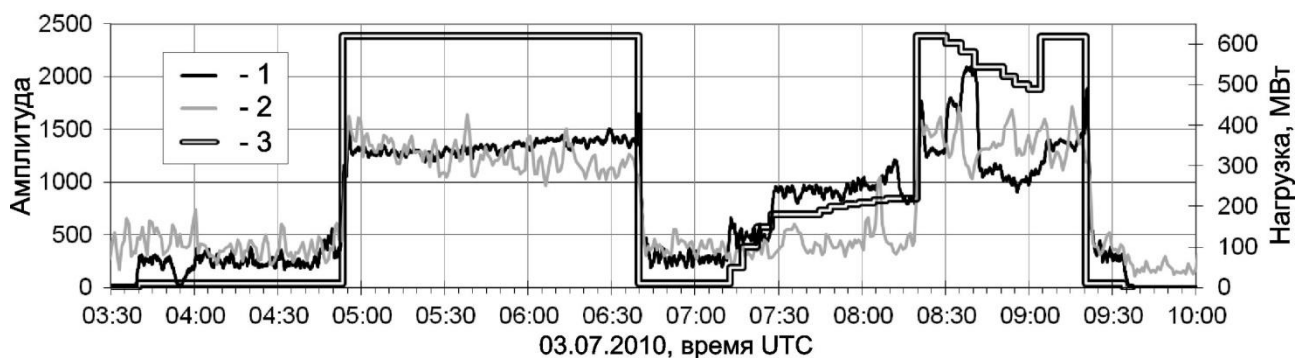


Рис. 1. Пример связи изменений режима работы ГЭС с регистрируемыми сейсмическими колебаниями. 1, 2 – изменения амплитуд колебаний на частоте 38.1 Гц, зарегистрированных на Z-канале в основании плотины и на станции «Черемушки» соответственно, 1 – в  $\mu\text{м}/\text{с}^2$ , 2 – то же с увеличением в 1 500 раз; 3 – изменение нагрузки гидроагрегата № 6

Многие исследователи считали, что причиной разрыва шпилек был гидроудар. Однако после анализа записей с сейсмостанции «Черемушки» в работах [3, 4] было показано, что гидроудара, способного разрушить шпильки и «выбросить» гидроагрегат весом около 150 тонн, в момент аварии не было. Вместе с тем из анализа последствий аварии, по отметкам на колонне машинного зала, известно, что гидроагрегат в момент инцидента поднимался на высоту не менее 12 м (рис. 2а). Такое возможно только в том случае, если бы этот процесс происходил достаточно медленно. Попробуем разобраться в этом вопросе с помощью записей, полученных на сейсмостанциях, установленных в теле плотины, и определить, были ли зарегистрированы низкочастотные мощные колебания в момент аварии. Частотный диапазон установленных в теле плотины станций – 1–50 Гц, но даже в этом случае мощные низкочастотные колебания должны выделяться. Мы проделали следующий лабораторный эксперимент: на платформу поместили сейсмоприемники (горизонтальная X-компонента) и произвели медленное движение платформы (в течение 10–15 секунд) в одном направлении на расстояние 0.2 м и затем в обратном, с возвращением в исходное положение. Полученную сейсмическую запись отфильтровали НЧ-фильтром 0.05 Гц (рис. 2б). Из рисунка видно, что такое медленное, но высокоамплитудное движение выделяется на записях сейсмоприемниками, собственная частота которых 1 и 10 Гц. Затем аналогичная процедура фильтрации была проделана с записями сейсмостанций, установленных в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 2в). Из этих данных можно сделать вывод, что гидроагрегат поднимался более 10 с. Именно поэтому на сейсмостанции «Черемушки» не видно записи с большими амплитудами.

Изучение колебаний крышек турбин гидроагрегатов и агрегатных блоков показал следующее. На рис. 3 представлено сравнение спектров колебаний, зарегистрированных на гидроагрегатах двух типов: №3 – старой конструкции, аналогичной конструкции гидроагрегата № 2, на котором произошла авария,

и №9 – новой конструкции, той же мощности, но с улучшенными характеристиками в плане надежности и безопасности. Рис. 3а описывает колебания бетонных агрегатных блоков (на расстоянии около 30 м от оси гидроагрегатов), рис. 3б – колебания крышки турбины. Оба гидроагрегата работали с максимальной нагрузкой 640 МВт. Из рисунка видно, что амплитуды колебаний, соответствующие гидроагрегату №3, существенно выше, чем соответствующие 9-му. Кроме этого, спектры значительно различаются наличием у гидроагрегата старой конструкции большого числа монохроматических высокочастотных сигналов (частота каждого из них кратна частоте вращения гидроагрегата), которые отсутствуют при регистрации на гидроагрегате новой конструкции. Получается, что крышка турбины и шпильки, которые ее крепят, при работе гидроагрегата находились в состоянии постоянного воздействия высокочастотных вибраций. Так как второй гидроагрегат был устроен таким образом, что излучаемые им колебания превышали колебания на остальных агрегатах [4], возможно, из-за этого на нем и произошла авария. Осмотр шпилек с других гидроагрегатов после аварии показал, что некоторые из них также были в аварийном состоянии (с большим количеством усталостных дефектов).

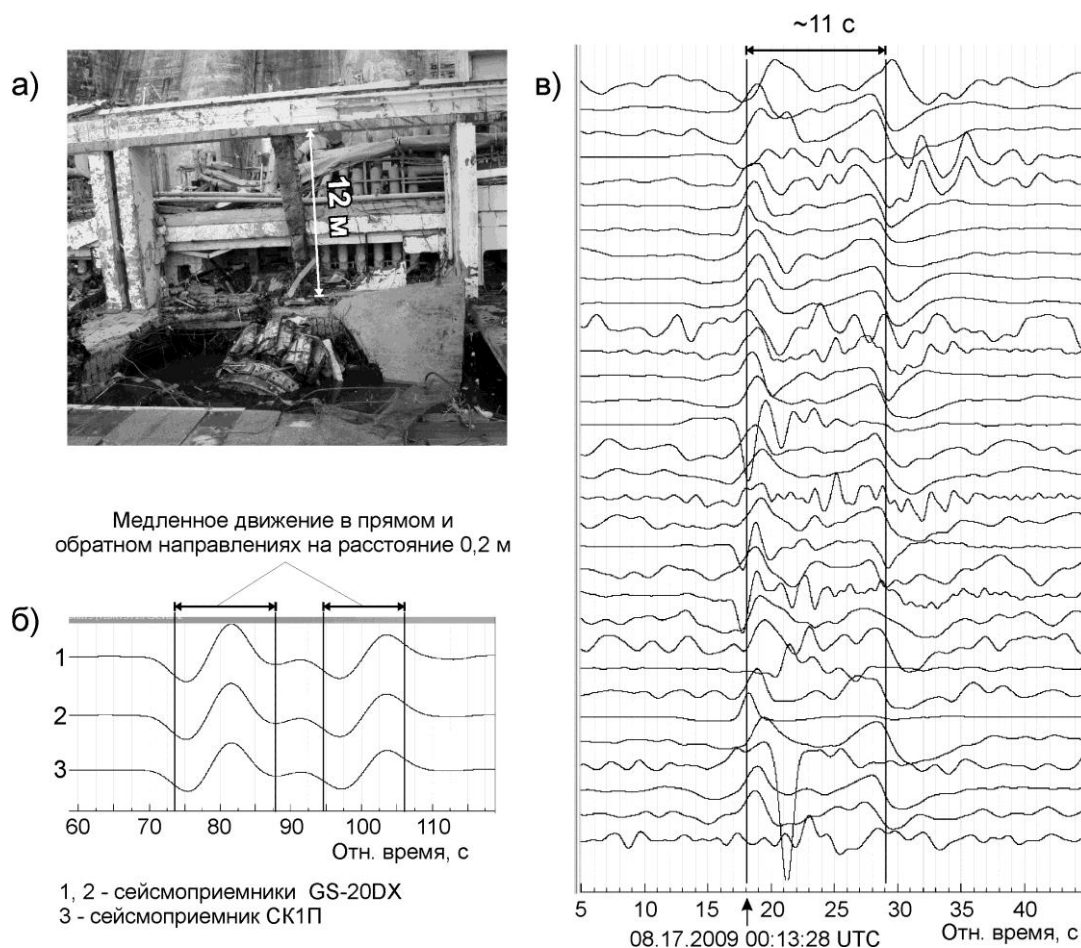


Рис. 2. Анализ записей момента аварии на сеймостанциях, установленных в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС: (а) – фотография машинного зала после аварии; (б) – моделирование записи медленных движений; (в) – сейсмические записи в различных точках плотины

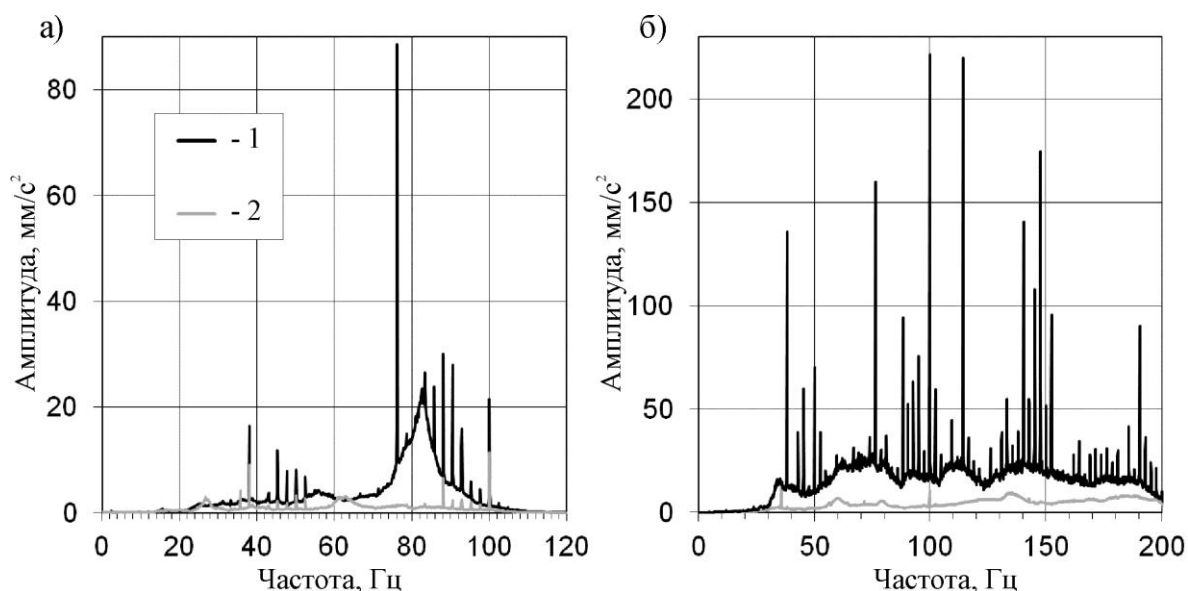


Рис. 3. Спектры радиальных колебаний, зарегистрированных на агрегатных блоках (а) и на крышках турбин (б) при работе гидроагрегатов под нагрузкой 600–640 МВт. 1, 2 – гидроагрегаты старой и новой конструкции соответственно

Разумеется, колебания крышки были не очень большие и не превышали нормативных уставок, но они длились годами. Особенно сильное воздействие возникло, когда на части шпилек произошло ослабление затяжки. Мельчайшие зазоры привели к увеличению динамического воздействия на шпильки, и наступил момент, когда они начали разрушаться.

Таким образом, можно предположить, что истинная причина аварии связана с тем, что при расчете крепления крышки турбины не был учтен тот факт, что она будет работать в состоянии длительного воздействия высокочастотных вибраций. На созданных новых гидроагрегатах количество шпилек было увеличено и амплитуда монохроматических колебаний значительно снижена.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акт технического расследования аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного». Федеральная служба по экономическому, технологическому и атомному надзору, 2009.
2. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. - 2013. - №7. - С.2–7.
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. - 2014. - V. 85. - P. 817–824.
4. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громыко П.В. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г.? // Гидротехническое строительство. - 2012. - № 10. - С.48–50.

© В. С. Селезнев, А. В. Лисейкин, А. А. Брыксин, П. В. Громыко, 2015