

УДК 550.34; 531/534; 627.8

## О ВОЗДЕЙСТВИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТОКТОГУЛЬСКУЮ ПЛОТИНУ

*В.И. Довгань*

Приведены сведения об интенсивности воздействий на Токтогульскую плотину землетрясений, зарегистрированных цифровой системой сейсмометрических наблюдений.

*Ключевые слова:* плотина; землетрясения; сейсмический мониторинг; спектральный состав и интенсивность воздействий; собственные частоты.

---

## ABOUT INFLUENCE OF EARTHQUAKES ON THE TOKTOGUL DAM

*V.I. Dovgan*

There are data on intensity of influences on the Toktogul dam of the earthquakes registered by digital system of seismometric supervision.

*Key words:* dam, earthquakes; seismic monitoring; spectral structure and intensity of influences; fundamental frequencies.

Вопрос о том, с какой силой воздействуют землетрясения на разные участки плотины, важен для прогноза критических ситуаций при сильном событии. Мы сделали попытку прикоснуться к этому сложному вопросу. Дело в том, что каждое землетрясение индивидуально – его воздействие на сооружение зависит не только от силы, но и от спектрального состава колебаний, резонансных явлений, эпицентрального расстояния, очаговых параметров (типа подвижки, направленности излучения). Для того чтобы вывести какую-то закономерность, необходима достаточно полная статистика. Сейсмические приборы, установленные в теле плотины и бортах в 2005 г., к настоящему моменту зарегистрировали около 300 землетрясений. В ближней для гидроузла зоне сильных событий за этот период не произошло – максимальные колебания наблюдались от двух местных толчков в июле-августе 2006 г. и составили 4 балла в основании плотины и порядка 6.5 баллов – на гребне. Землетрясения, зарегистрированные в пределах 160 км от плотины, не превышали 11-й энергетический класс. На плотине записались и более сильные события, но их эпицентры расположены на значительном, а значит, безопасном для нее расстоянии.

На рисунке 1 показана интенсивность воздействия на гидросооружение местного землетрясения 30 июля 2006 г. Интенсивность колебаний в данном случае изменялась от 5 до 6.5 баллов, увеличиваясь с высотой расположения точки

(для получения детальной картины учитывались не принятые в сейсмологии десятые доли балла). Наибольшие колебания наблюдались в центре плотины, достигая максимума во второй точке.

На рисунке 1 (вверху справа) показано изменение максимальных амплитуд колебаний при переходе от опорной 10-й точки к 9-й в основании плотины и далее вверх по центру к бортам плотины и верхним точкам. При этом достаточно сильном землетрясении максимум амплитудного спектра в опорной десятой точке находился на частоте 1,3 Гц. Усиление амплитуд колебаний в верхних точках происходит на собственных частотах блоков, в которых эти точки расположены. Спектры колебаний при землетрясениях меньшей энергии еще более высокочастотны, поэтому при местных и близких толчках при переходе к 9-й точке, жестко связанной с массивным основанием плотины, амплитуды колебаний уменьшаются. В данном случае уменьшение амплитуд колебаний происходило и при переходе от основания к правому борту (точка 4). Для остальных точек наблюдался рост амплитуд колебаний с высотой: для правой стороны плотины (точка 1) в большей степени, для левой стороны (точка 3) – в меньшей степени. Максимальный рост амплитуд происходил в центральном блоке плотины (точки 6 и 2).

На рисунке 2 показано воздействие на плотину сильного удаленного гиндукушского землетрясения. При этом землетрясении приращение интенсивности колебаний во второй точке относи-

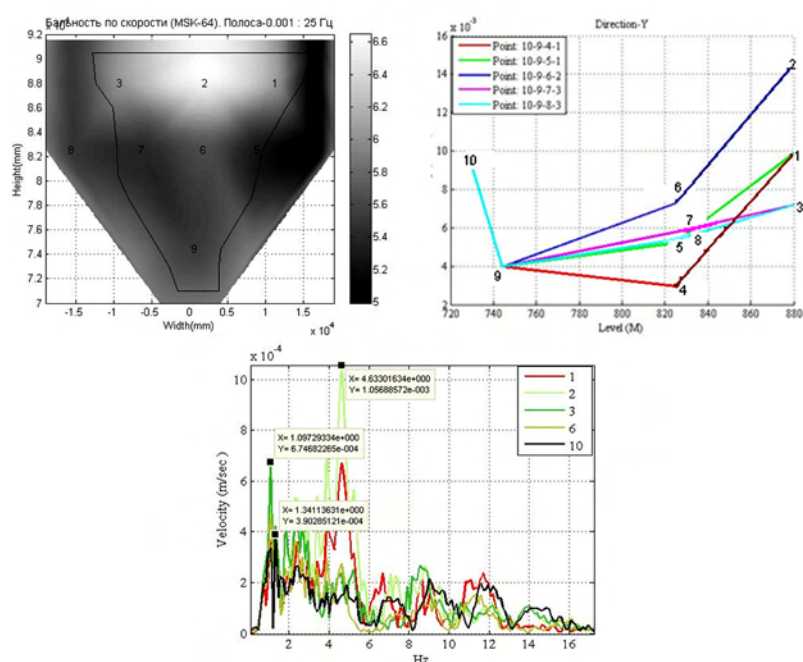


Рисунок 1 – Распределение интенсивности колебаний (в баллах) по телу плотины (вверху слева), цифрами показано положение точек наблюдений; изменение максимальных амплитуд колебаний в зависимости от расположения точки наблюдений (вверху справа) и спектры колебаний по записям местного землетрясения 30 июля 2006 г. (внизу)

тельно опорной происходило незначительно – на десятые доли балла. Спектры амплитуд колебаний на плотине более низкочастотны, чем при местных толчках (рисунок 2, внизу). В данном случае максимум спектра по записи в десятой точке находился на частоте 0,38 Гц.

На низкочастотные колебания сильнее реагирует и девятая точка в основании плотины – амплитуды колебаний в ней даже выше, чем в точках второго уровня – 5-й, 6-й, 7-й и в бортах плотины – 4-й и 8-й (рисунок 2, вверху справа). Далее происходит небольшой рост амплитуд в верхних точках с максимумом во второй.

Для всех зарегистрированных на плотине землетрясений, даже для тех, которые были замечены только приборами, есть информация о величине воздействия в баллах по шкале MSK-64 на каждую точку наблюдений. Большой частью это воздействие условно – менее одного балла. Из всего каталога записанных на плотине землетрясений отобрали только те, которые могли ощущаться хотя бы в верхних точках наблюдений: для близких событий энергетический класс не менее 9,5, эпицентральные расстояния для удаленных землетрясений не превышали 300 км. На основании полученных данных построили графики зависимостей приращения балльности в девяти точках от энер-

гетического класса и эпицентрального расстояния относительно десятой опорной. Примеры таких графиков для трех верхних точек наблюдений приведены на рисунке 3. Для данного и всех последующих построений мы рассматривали записи на составляющей С-Ю (вдоль течения). Рассеяние данных на графиках обусловлено особенностями каждого конкретного землетрясения.

Вторая точка, расположенная в центре плотины на высоте 880 м, обладает наибольшей степенью свободы в направлении С-Ю – вдоль течения. Для нее наблюдается приращение интенсивности колебаний до двух баллов при несильных землетрясениях ( $K < 11$ ) и эпицентральных расстояниях  $R < 160$  км. Для боковых первой и третьей точек максимальное приращение составляет 1,5 балла. Наблюдается уменьшение интенсивности воздействия на верхние точки наблюдений с увеличением эпицентрального расстояния и энергетического класса. Для некоторых удаленных землетрясений приращения балльности с высотой вовсе не происходит.

Для точек второго уровня – пятой, шестой и седьмой при значительном рассеянии данных приращение балльности относительно опорной ниже, чем для трех верхних. Максимальное приращение интенсивности (до 0,5–0,8 балла) наблюдается для шестой точки в центре плотины.

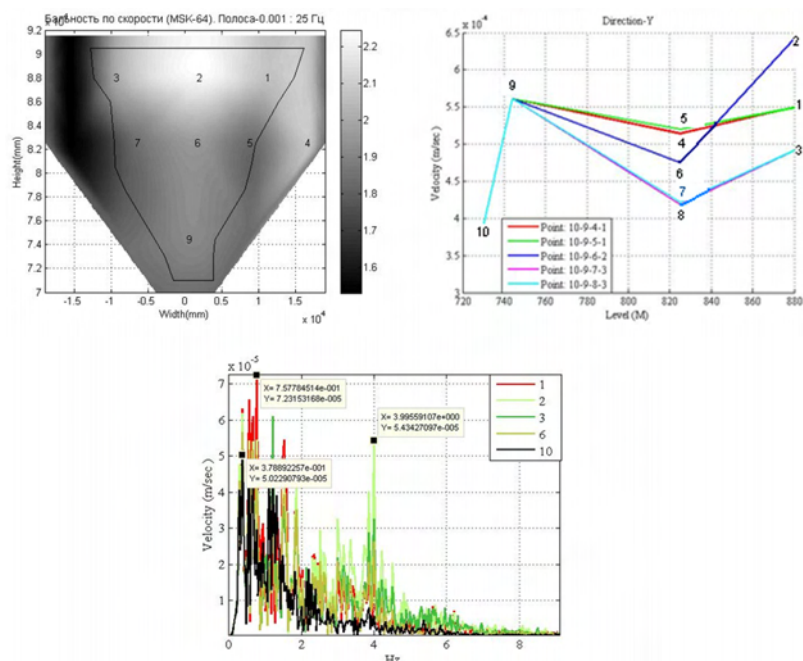


Рисунок 2 – Распределение интенсивности колебаний (в баллах) по телу плотины (вверху слева), изменение максимальных амплитуд колебаний в зависимости от расположения точки наблюдений (вверху справа) и спектры колебаний (внизу) по записям удаленного сильного землетрясения 26 мая 2013 г.

Для четвертой и восьмой точек в бортах плотины и для девятой точки в ее основании воздействие большей части высокочастотных местных и близких (до 150 км) землетрясений ниже или приближается к воздействию на опорную точку, т. е. происходит затухание сейсмических волн. Для более удаленных землетрясений заметно небольшое (на

десятые доли балла) увеличение интенсивности в бортах по сравнению с десятой точкой.

На рисунке 4 показаны графики максимальных спектральных амплитуд колебаний в верхних точках относительно десятой опорной в зависимости от энергетического класса и эпицентрального расстояния. В качестве амплитуд колебаний были исполь-

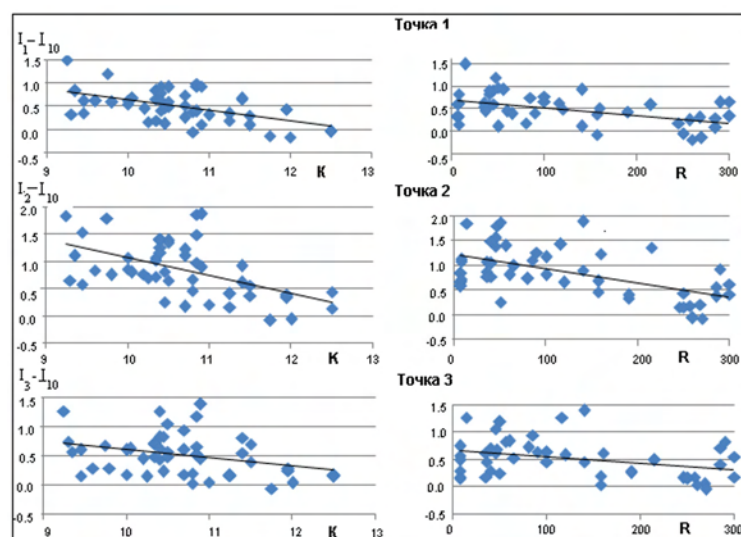


Рисунок 3 – Графики зависимостей приращения балльности от энергетического класса (слева) и эпицентрального расстояния (справа) в трех верхних точках наблюдений относительно десятой опорной точки

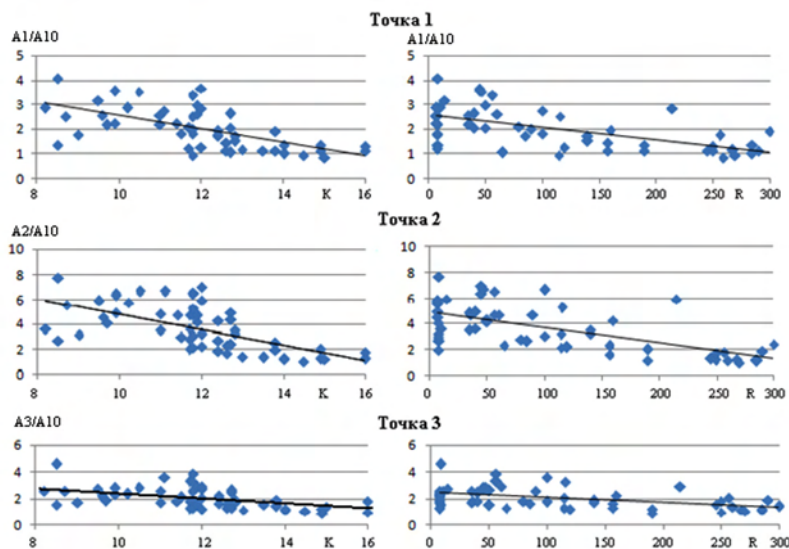


Рисунок 4 – Графики зависимостей приращений резонансных амплитуд колебаний от энергетического класса (слева) и эпицентрального расстояния (справа) в трех верхних точках наблюдений относительно десятой опорной точки

зованы максимальные амплитуды в спектрах Фурье по записям землетрясений в точках наблюдений.

Изменение спектральных амплитуд колебаний в точках наблюдений по отношению к входному сигналу, так же как и по дальности, имеет сложный характер. Рассеяние данных уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния и энергетического класса и зависит от особенностей самого землетрясения. Для второй точки увеличение амплитуд колебаний в ближней зоне изменяется от 2-х до 7,7 раз по сравнению с десятой точкой. Для первой и третьей точек эти соотношения ниже – для некоторых землетрясений они приближаются к 4-м, для других увеличения амплитуд колебаний не происходит вообще.

На рисунке 5 показано отношение спектральных амплитуд колебаний во второй точке к амплитудам в десятой точке в зависимости от резонансной частоты входного сигнала: чем высокочастотнее землетрясение, тем сильнее (при прочих равных условиях – энергетического класса, эпицентрального расстояния и т. д.) относительное воздействие его на верхние точки.

Какие частоты являются собственными для разных частей плотины – частоты, на которых происходит резонансное усиление колебаний? Полагаем, что каждая точка наблюдений характеризует блок, в котором она расположена. Анализ спектров Фурье по записям рассмотренных землетрясений показал, что каждая точка наблюдений характеризуется определенным диапазоном частот, на которых происходит максимальное усиление колебаний входного сигнала.

На рисунке 6 приведены соотношения частот, соответствующих максимумам в спектрах записей рассмотренных землетрясений в десятой опорной точке и в точках на плотине и бортах.

По составляющей С-Ю достаточно четко можно определить диапазон собственных частот для второй точки верхнего уровня (высота 880 м) в центре плотины. Для частот входного сигнала  $f \geq 2,5$  Гц резонансные частоты изменяются в небольших пределах от 3,6 до 4,2 Гц. При более низкочастотном входном сигнале диапазон резонансных частот во второй точке за небольшим исключением изменяется в пределах от 3 до 4,6 Гц. Этот диапазон частот можно назвать собственным для второй точки.

Для первой точки верхнего уровня преобладают резонансные частоты в диапазоне от 3,4 до 4,2 Гц, но наблюдаются и более высокочастотные максимумы до 6–6,5 Гц. Для третьей точки этого уровня резонансные частоты изменяются в пределах от 3 до 5–6 Гц.

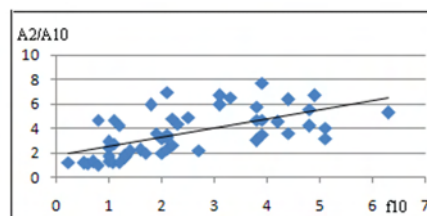


Рисунок 5 – График зависимости отношений спектральных амплитуд по записям во второй и десятой точках от резонансной частоты входного сигнала

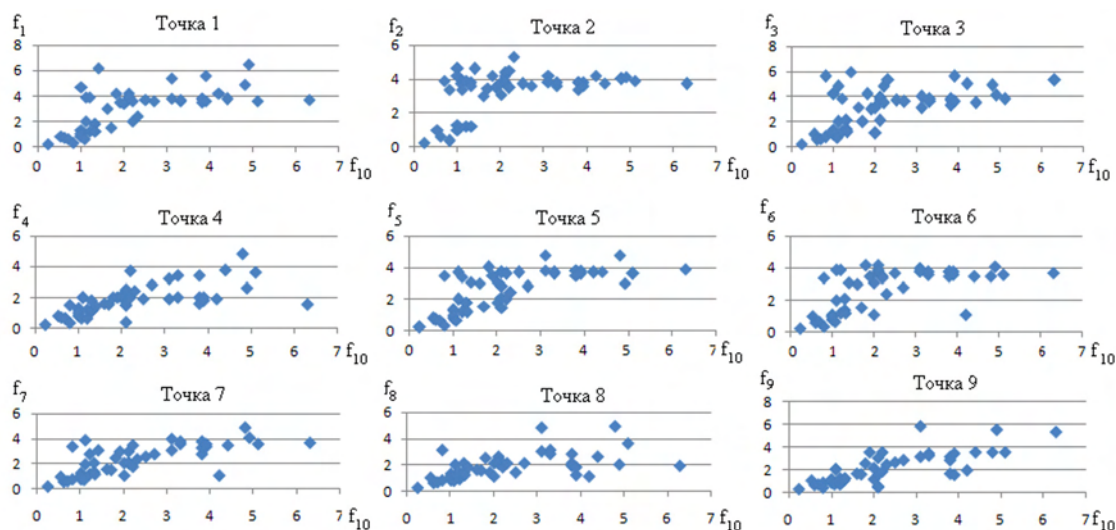


Рисунок 6 – Графики зависимостей резонансных частот по записям в девяти точках наблюдений от резонансной частоты входного сигнала (точка 10)

Второй уровень (высота 825 м): пятая точка имеет преобладающие резонансные частоты от 2,8 до 4 Гц, шестая точка в центре – от 3 до 4,1 Гц, седьмая – от 2,8 до 4 Гц.

Для 4-й и 8-й точек в бортах и для 9-й точки в основании плотины за небольшим исключением низкие резонансные частоты до 2 Гц близки к резонансным частотам входного сигнала. Для частот входного сигнала  $f_{10} \geq 2$  Гц резонансные частоты в этих трех точках изменяются в пределах от 1–1,5 до 3–3,7 Гц. В основном, низкочастотные максимумы в спектрах присущи сравнительно удаленным землетрясениям с эпицентрными расстояниями  $R > 200$  км. Для остальных точек совпадение резонансных частот с резонансной частотой входного сигнала в диапазоне 0,5–1,0 Гц наблюдается для удаленных сильных событий. В большинстве случаев резонансная частота входного сигнала в десятой точке присутствует в спектрах по записям в других точках, не всегда являясь там резонансной.

**Выводы.** Величина сейсмических воздействий на гидроузел зависит от особенностей землетрясений – энергетического класса, эпицентрального расстояния, спектрального состава и т. д. Мы получили только некоторые предварительные результаты по этой проблеме, которые в дальнейшем будут дополняться и уточняться.

Близкие высокочастотные землетрясения воздействуют на отдельные блоки плотины, усиливая колебания в трёх верхних точках на высоте 880 м до 1,5–2-х баллов с максимумом во второй центральной. Для точек второго уровня – пятой, шестой и седьмой (высота 825 м) при значительном рас-

сеянии данных приращение балльности относительно опорной десятой ниже, чем для трех верхних. Максимальное приращение интенсивности (до 0,5–0,8 балла) наблюдается для шестой точки в центре плотины. Для четвертой и восьмой точек в бортах плотины и для девятой точки в ее основании воздействие большей части высокочастотных местных и близких (до 150 км) землетрясений ниже или приближается к воздействию на опорную точку. Для более удаленных землетрясений заметно небольшое (на десятые доли балла) увеличение интенсивности в бортах по сравнению с десятой точкой. Удаленные низкочастотные события воздействуют на плотину в целом, и изменение интенсивности колебаний в зависимости от положения точки наблюдений происходит незначительно.

Спектры колебаний входного сигнала трансформируются плотиной в зависимости от собственных частот отдельных блоков. Каждая точка наблюдений характеризуется определенным диапазоном частот, на которых происходит максимальное усиление колебаний входного сигнала.

Для точек с первой по седьмую в теле плотины преобладающие резонансные частоты находятся в диапазоне от 2,8 до 5 Гц. Для девятой точки, жестко связанной с основанием плотины, и для четвертой и восьмой в бортах диапазон резонансных частот смещен в низкочастотную область: 1–3,7 Гц.

В большинстве случаев резонансная частота входного сигнала в десятой точке присутствует в спектрах по записям в других точках, не всегда являясь там резонансной.