

УДК 550.34; 531/534; 627.8

## К ВОПРОСУ СТАБИЛЬНОСТИ ТОКТОГУЛЬСКОЙ ПЛОТИНЫ

*В.И. Довгань*

Для оценки стабильности состояния плотины использован метод корреляционного анализа. В основу анализа легли нормированные спектры записей землетрясений в десяти точках наблюдений, расположенных на гидроузле.

*Ключевые слова:* плотина; сейсмометрические наблюдения; записи землетрясений; спектральный и корреляционный анализ.

---

## TO QUESTION OF STABILITY OF TOKTOGUL DAM

*V.I. Dovgan*

It is used the method of the correlation analysis for an assessment of stability of the dam condition. The basis of the analysis was formed by rated ranges of records of earthquakes in ten points of the supervision located on the water-engineering system.

*Key words:* dam; seismometric supervisions; earthquakes records; spectral and correlated analysis.

Сделана попытка выяснить, меняется ли состояние Токтогульской плотины во времени? Тело плотины постоянно подвергается вибрациям – это пуски гидроагрегатов, шумы от их работы, на которые накладываются внешние микросейсмы и, наконец, землетрясения. Вибрации могут ослабить внутренние связи материала, подстилающего пункт наблюдений, что приведет к увеличению амплитуд колебаний.

Для изучения стабильности состояния плотины использованы результаты корреляционного анализа [1–3]. Исходим из того, что землетрясение – случайный процесс. Считаем, что каждая точка наблюдений дает характеристику блока, в котором она находится. Тело плотины состоит из семи вертикальных блоков. В центральном блоке расположены три пункта на высотах 770, 825 и 880 м. Два пункта находятся в двух левых, два – в двух правых разных блоках плотины на высотах 825 и 880 м и два – в бортах каньона на высоте 825 м, десятый опорный пункт наблюдений расположен на расстоянии 800 м от плотины в скале (рисунок 1).

В основу корреляционного анализа легли нормированные спектры записей 95 землетрясений в десяти точках наблюдений по трем составляющим. Эпицентральные расстояния использованных землетрясений не превышали 200 км, энергетические классы  $K \geq 8.5$ , период наблюдений с июля

2005 г. по март 2013 г. По изменению во времени коэффициентов корреляции между нормированными спектрами землетрясений можно судить об изменениях, происходящих в плотине.

**Корреляция между точками наблюдений.** Рассмотрим корреляцию между точками 1 и 2, расположенными на одной высоте, но разделенными вертикальным блоком. Графики корреляции между ними на основе спектров землетрясений, записанных по трем составляющим ( $X$  – направление “Восток – Запад” поперек плотины,  $Y$  – “Север – Юг” – вдоль плотины и  $Z$  – вертикальное), приведены на рисунке 2.

Для характеристики графиков были использованы следующие параметры: максимальное и минимальное значения коэффициентов корреляции и положение линии тренда. Для составляющей  $B - Z$  при некотором рассеянии данных (максимальное значение коэффициента корреляции  $r = 0.98$ , минимальное  $r = 0.81$ ) наблюдается небольшой тренд в сторону уменьшения корреляции. Для составляющей  $C - Y$  – максимальное значение  $r = 0.96$ , минимальное  $r = 0.8$ , тренд в сторону увеличения корреляции. Для вертикальной составляющей при изменении коэффициента корреляции от 0.8 до 0.96 тренда не наблюдается. Корреляция между остальными парами точек имеет подобный вид, что и для пары 1–2.

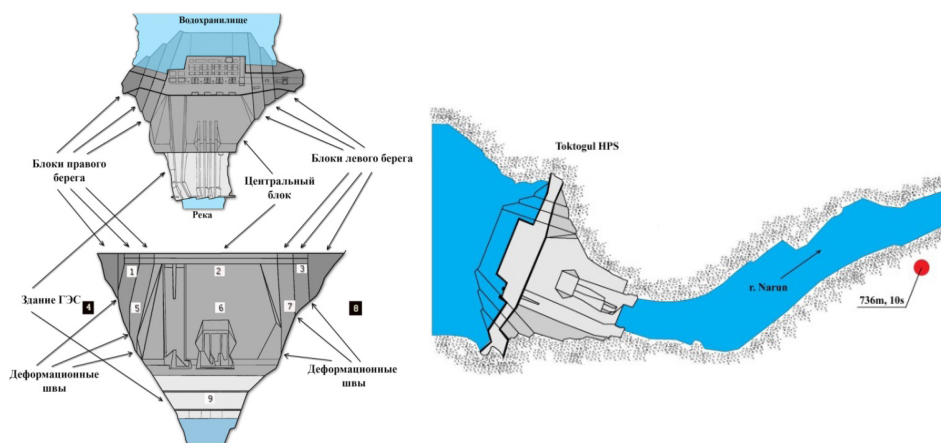


Рисунок 1 – Слева: Токтогульская ГЭС, вид сверху и со стороны нижнего бьефа, цифрами показано расположение точек наблюдений; справа: Токтогульская ГЭС и опорная 10-я точка наблюдений

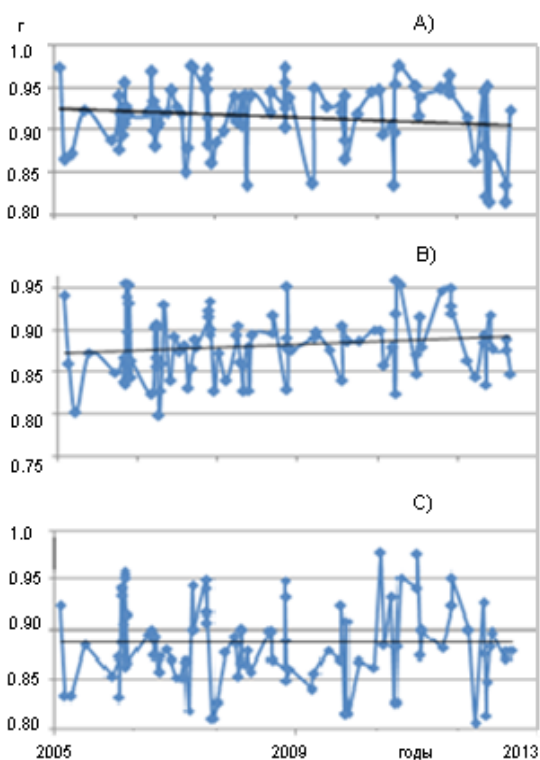


Рисунок 2 – Корреляция между точками 1 и 2: А – компонента В – 3, В – компонента С – Ю, С – компонента Z

За небольшим исключением коэффициенты корреляции изменяются в пределах от 0.7 до 0.98. Эти колебания можно объяснить неоднородностью исходного материала – были использованы записи местных и более удаленных землетрясений, срав-



Рисунок 3а – Уровень воды и корреляция между точками 2 и 3 (компонента С – Ю – вдоль течения)

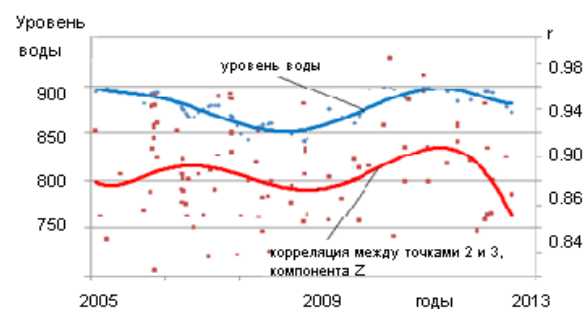


Рисунок 3б – Уровень воды и корреляция между точками 2 и 3 (вертикальная компонента)

нительно сильных и не очень. Среднее направление этих изменений показывают прямые линии тренда – поднятие вверх (положительный угол наклона) говорит об усилении корреляционных связей, опускание вниз (отрицательный угол накло-

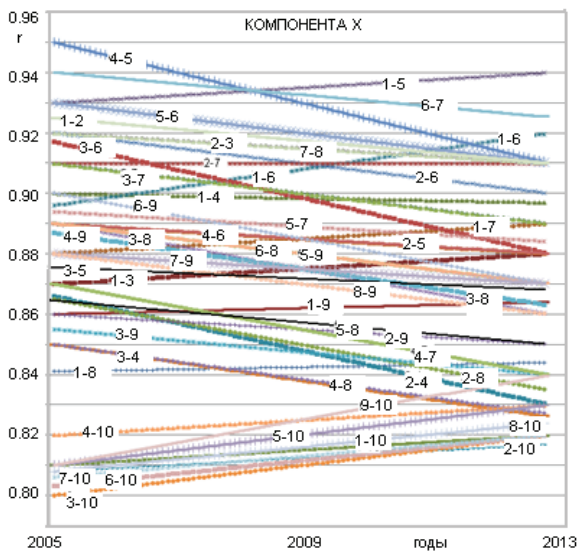


Рисунок 4а – Линии тренда, составляющая X (“Восток – Запад”)

на) – об ослаблении корреляционных связей. При отсутствии наклона прямой можно полагать, что никаких изменений не происходит.

Мы сделали попытку выяснить, не влияет ли уровень воды в водохранилище на изменение корреляционных связей между верхними точками. Примеры графиков изменения во времени уровня воды и коэффициентов корреляции между верхними точками 2 и 3 приведены на рисунках 3 а,б. Аппроксимация данных выполнена полиномом 5-й степени.

Для горизонтальных компонент на определенном начальном временном интервале (разном для разных пар и составляющих), наблюдается обратная связь между параметрами, т. е. с уменьшением уровня воды корреляция между точками увеличивается. С течением времени связь меняется напрямую, т. е. с увеличением уровня воды корреляция увеличивается, и наоборот. Что касается вертикальных составляющих, то с начала 2007 г. и далее наблюдается прямая связь параметров: уменьшение (увеличение) одного соответствует уменьшению (увеличению) другого.

Как уже отмечалось выше, коэффициенты корреляции изменяются в небольших пределах, отклонения от средних значений измеряются в сотых долях. Таким образом, можно констатировать, что хотя и наблюдается определенная связь между изменениями уровня воды и коэффициентами корреляции между точками, но в количественном выражении она невелика и лежит в пределах точности эксперимента.

Вернемся теперь к линиям тренда, которые представлены в виде следующих графиков раздельно для трех составляющих (рисунок 4а, б, в).

#### Компонента X (рисунок 4а)

В направлении “Восток – Запад” плотина зажата между бортами. И, несмотря на это, для большинства пар точек, расположенных на плотине и бортах, наблюдается уменьшение корреляции во времени. Исключением является точка 1: корреляция ее с точками 3, 5, 6, 7, 9 с течением времени увеличивается. Блок, в котором расположена первая точка наблюдений, отличается большой подвижностью и, по нашим наблюдениям, является наиболее уязвимой частью плотины.

Наибольший интерес представляет изменение корреляции между соседними точками. Для направления “Восток – Запад” максимальная корреляция в начале наблюдений была между 5-й точкой и бортом плотины (точка 4). Эти точки расположены на одной высоте и блок, в котором расположена 5-я точка, вплотную граничит с бортом в той его части, где находится точка 4. Однако с течением времени связь между этими точками уменьшается – наблюдается самый большой тренд. Высокая корреляция, уменьшающаяся со временем, наблюдается между точками 6 и 7 (центральный и левый соседние блоки, высота 825 м) и на меньшем уровне – между точками 5 и 6 и верхними 1 и 2, 2 и 3, а также между 7-й точкой и левым бортом плотины (точка 8). Корреляция между соседними точками, расположенными на одном уровне, выше по сравнению с точками на разных уровнях (кроме пары 1 и 5).

Самая низкая корреляция с постепенным ее увеличением для направления В – З наблюдается для 10-й точки, расположенной вне плотины, со всеми остальными точками. Наибольший рост корреляции происходит с соседней 9-й точкой.

#### Компонента У (рисунок 4б)

В направлении “Север – Юг” плотина обладает максимальной степенью свободы. Но для большей части пар точек наблюдается увеличение корреляции, либо отсутствие всяких изменений (тренда нет). Исключением являются соседние точки 5 и 6, точки в бортах плотины – 4 и 8, точки 4 и 9, точки 3 и 10, корреляционная связь между которыми незначительно – на сотые доли величины  $r$  – уменьшается во времени.

Максимальная связь наблюдается между 3 и 7-й точками, расположенными в соседних блоках, но на разных высотах. Высокая корреляция между 1-й и 5-й точками не меняется во времени. На рисунке 5б видно, что достаточно высокая корреляция наблюдается между парами соседних

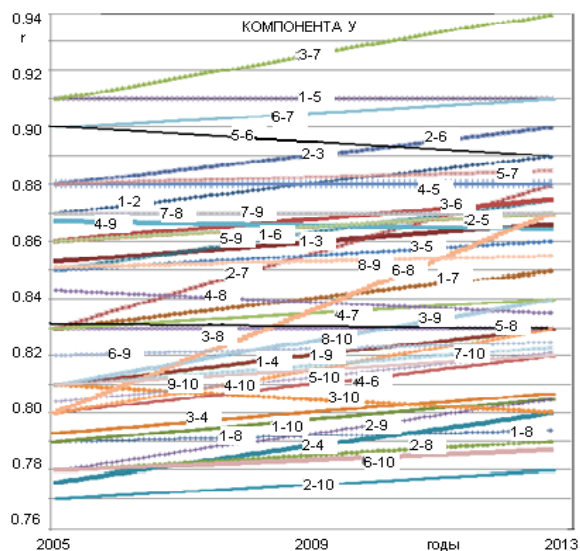


Рисунок 4б – Линии тренда, составляющая У “Север – Юг”

верхних точек и соседних точек второго уровня и бортов (высота 825 м), а также между парами, расположенными в соседних блоках, но на разных высотах (880 и 825 м). Корреляция 9-й точки (нижний уровень, высота 770 м) с 6-й точкой, расположенной в одном блоке на втором уровне, сравнительно низкая, значительно ниже, чем ее корреляция с точками второго уровня, расположенными в соседних блоках (точки 7 и 5), а также с точками в бортах (4 и 8). Корреляция 9-й точки с опорной 10-й ниже, чем с 6-й.

*Вертикальная компонента (рисунок 4в)*

Для вертикальной составляющей уменьшается корреляция между 1-й и 5-й, 4-й и 5-й, 6-й и 9-й точками. Для остальных соседних пар точек на плотине и бортах корреляция стабильно высокая без тренда, либо наблюдается некоторое её увеличение.

Максимальная корреляция при увеличении ее во времени наблюдается между точками 2 и 6, расположенными в центральном блоке на разных высотах. Высокая корреляция между точками 1 и 5, расположенными в соседних правых блоках плотины, а также между 5-й точкой и примыкающей к ней 4-й точкой правого борта уменьшается во времени. Для левой стороны плотины невысокая корреляция между точками соседних блоков 3 и 7 усиливается во времени. Небольшое увеличение корреляции наблюдается и между 7-й точкой и точкой 8 в левом борту.

Корреляция с 10-й опорной точкой ниже, чем между парами, расположенными на плотине и бор-

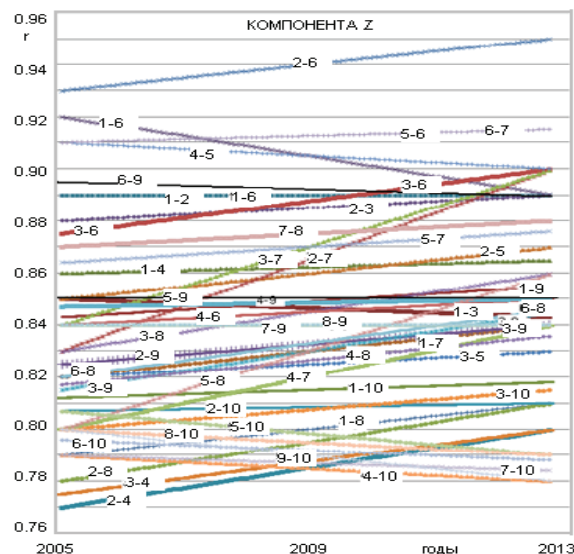


Рисунок 4в – Линии тренда, вертикальная составляющая

тах. Для пар 1 и 10, 2 и 10, 3 и 10 она увеличивается, для остальных пар – уменьшается.

Рассмотрим отдельно центральный блок, левую, правую стороны плотины и их примыкания к бортам.

*Центральный блок.* Достаточно высокая корреляция между точками 2 и 6, 6 и 9 в направлении В – З уменьшается на 0.02 единицы  $r$ , в направлении С – Ю незначительно увеличивается, для вертикальной составляющей корреляция между точками 2 и 6 – максимальна и растет во времени, между точками 6 и 9 незначительно (на тысячные доли величины  $r$ ) уменьшается.

*Центральный блок и левая сторона плотины.* Связь между точками 2 и 3, 6 и 7 по составляющей В – З уменьшается, по составляющим С – Ю и вертикальной растет. Связь 9-й точки нижнего уровня с 7-й точкой по составляющей В – З также уменьшается, а по составляющим С – Ю и вертикальной с течением времени не меняется.

*Центральный блок и правая сторона плотины.* Связь между точками 1 и 2, 5 и 6 по составляющей В – З уменьшается, по составляющей С – Ю между точками 1 и 2 растет, между точками 5 и 6 – уменьшается, по вертикальной составляющей для пары 1 и 2 – не меняется, для пары 5 и 6 – незначительно увеличивается (на тысячные доли величины  $r$ ). Связь точки 9 с 5-й точкой также уменьшается по составляющей В – З, по составляющей С – Ю растет, а по вертикальной – не меняется.

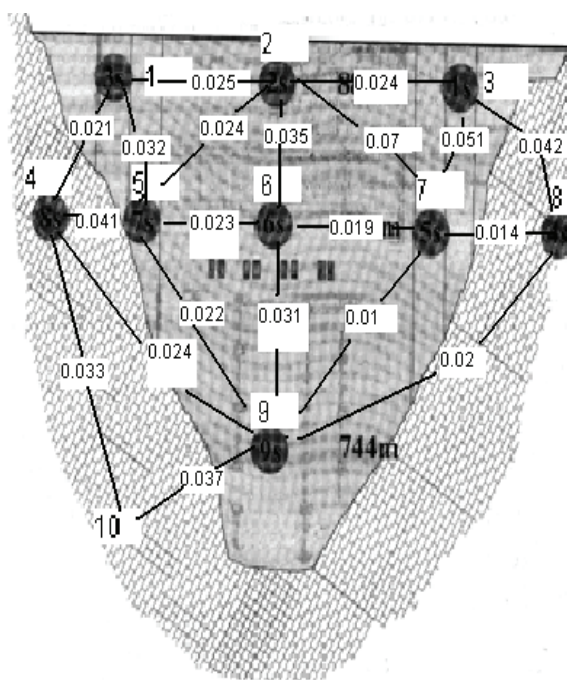


Рисунок 5 – Значения модулей величины изменения корреляции между точками наблюдений

*Левая сторона плотины.* Связь между точками 3 и 7 по составляющей В – 3 уменьшается, по составляющим С – Ю и вертикальной – увеличивается. Связь 7-й точки с бортом плотины (точка 8) также уменьшается по составляющей В – 3, по составляющей С – Ю не меняется, по составляющей Z – увеличивается.

*Правая сторона плотины.* Связь между точками 1 и 5 по составляющей В – 3 увеличивается, по составляющей С – Ю – не меняется, по вертикальной составляющей – уменьшается. Связь 5-й точки с бортом плотины (точка 4) по составляющей В – 3 уменьшается, по составляющим С – Ю и Z – не меняется во времени.

*Связь 9-й точки в основании плотины с 10-й точкой в скале* увеличивается по горизонтальным составляющим и уменьшается – по вертикальной.

*Связь между бортами плотины (точки 4 и 8)* по горизонтальным составляющим уменьшается (особенно значительно – по направлению “Восток – Запад”), в вертикальном направлении – увеличивается.

Увеличение корреляции между точками наблюдений говорит об усилении связей между блоками, в которых эти точки находятся, уменьшение корреляции об ослаблении связей. Любое изменение корреляции между точками наблюдений – уве-

личение или уменьшение – связано с определенными деформациями, происходящими в плотине. Отвлекаясь от направленности этих изменений по трем составляющим, перейдем к их модулю. На рисунке 5 показаны значения модуля изменения величины корреляции между соседними точками за рассмотренный период наблюдений.

На рисунке 5 видно, что максимальные изменения на плотине произошли между 7-й и 2-й, 7-й и 3-й точками наблюдений, а также между 3-й точкой и левым бортом плотины (точка 8). Далее по уровню изменений идут точки центрального блока – они подвержены максимальному воздействию водохранилища, а также точка 5 – её связи с 1-й и с точкой 4 в правом борту плотины.

**Корреляция между компонентами для каждой из 10 точек.** В основу корреляции вошли данные о записях тех же землетрясений, что и для корреляционной связи между точками. Изменение корреляционных связей между компонентами X-Y, X-Z и Y-Z точек наблюдений во времени также имеет осциллирующий характер. О направлении этих изменений можно судить по величине тренда. Осредняющие линии тренда показаны на следующих рисунках.

Высокой корреляцией для всех трех пар компонентов отличается 10-я точка наблюдений, расположенная за пределами плотины. При этом для горизонтальной пары X-Y эта корреляция усиливается со временем. Для пар с вертикальной компонентой корреляция незначительно уменьшается.

Достаточно высокая корреляция между компонентами с небольшими изменениями наблюдается также для 4-й и 8-й точек в бортах плотины: для пар X-Y и Y-Z – увеличение коэффициента  $r$  во времени или полное отсутствие таких изменений, для пары X-Z – уменьшение корреляции, измеряемое в сотых долях величины  $r$ . Минимальная корреляция наблюдается для 2-й и 6-й точек, расположенных в центральном блоке, наиболее подверженных влиянию водохранилища, а для пары X-Z – еще и для 3-й точки. Для всех остальных точек корреляция между компонентами имеет промежуточные значения.

Таким образом, анализ корреляционных связей между точками наблюдений показал, что коэффициенты имеют высокие значения и за небольшим исключением изменяются в пределах от 0.7 до 0.98. Такие колебания можно объяснить неоднородностью исходного материала, так как были использованы нормированные спектры записей местных и более удаленных землетрясений, отличающихся и по величине энергетических классов. Кроме того, для верхних точек наблюдалась определенная связь между колебаниями ко-

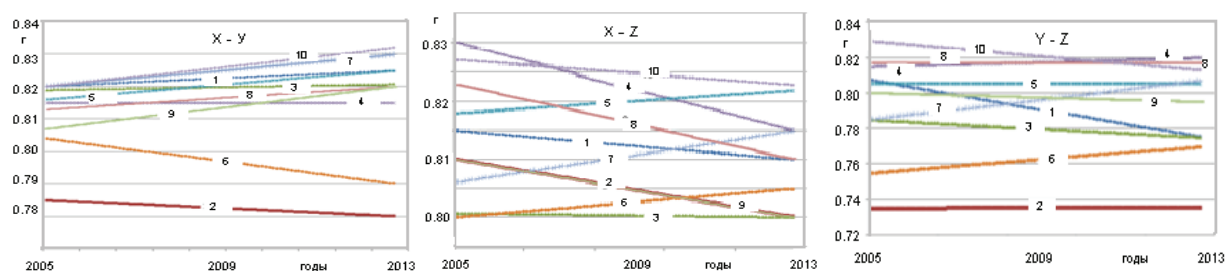


Рисунок 6 – Корреляция между компонентами X-Z, X-Y и Y-Z

эффицентом корреляции и изменениями уровня воды в водохранилище, но в количественном выражении она невелика и лежит в пределах точности эксперимента.

Для оценки среднего направления изменений корреляции между точками во времени были использованы прямые линии тренда: наклон вверх говорит об усилении, вниз – об ослаблении корреляционных связей. При отсутствии наклона прямой можно полагать, что никаких изменений между блоками не происходит.

Рассмотрение трендов по трем составляющим показывает довольно сложную картину изменений. В направлении “Восток – Запад” плотина зажата между бортами. И, несмотря на это, для большинства пар точек, расположенных на плотине и бортах, наблюдается тенденция уменьшения корреляции во времени. Самая низкая корреляция с постепенным ее увеличением наблюдается для 10-й точки, расположенной вне плотины, со всеми остальными точками.

В направлении “Север – Юг” плотина обладает максимальной степенью свободы, но для большинства пар точек наблюдается увеличение корреляции, либо отсутствие всяких изменений.

Для вертикальной составляющей уменьшается корреляция между 1-й и 5-й, 4-й и 5-й, 6-й и 9-й точками. Для остальных соседних пар точек на плотине и бортах корреляция стабильно высокая без тренда, либо наблюдается некоторое её увеличение. Корреляция с 10-й опорной точкой ниже, чем между парами, расположенными на плотине и бортах.

Если перейти от направленности этих изменений к их модулю, то максимальные изменения произошли в левой стороне плотины между

7-й и 2-й, 7-й и 3-й точками наблюдений, а также между 3-й точкой и левым бортом (точка 8). Далее по уровню изменений идут точки центрального блока – они подвержены максимальному воздействию водохранилища, а также точка 5 – её связи с 1-й и с точкой 4 в правом борту плотины. Все эти изменения невелики и измеряются сотыми долями величины  $r$ , но мы, к сожалению, не знаем критических значений этих изменений.

Анализ связей между компонентами показал, что самой высокой корреляцией для всех трех пар компонентов отличается 10-я точка наблюдений, расположенная за пределами плотины. Достаточно высокая корреляция между компонентами с небольшими изменениями наблюдается также для 4-й и 8-й точек в бортах плотины. Минимальная корреляция наблюдается для 2-й и 6-й точек, расположенных в центральном блоке, наиболее подверженных влиянию водохранилища, а для пары X-Z – еще и для 3-й точки. Следует учесть, что различия между максимальными и минимальными уровнями трендов невелики и составляют сотые доли от величины  $r$ . Эти результаты свидетельствуют о достаточной стабильности работы сейсмометров и об отсутствии особых изменений в подстилающей среде.

#### Литература

1. Bath M. Spectral analysis in geophysics / M. Bath. Amsterdam – Oxford – New York, 1974. 535 p.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 750 с.
3. Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика / Р.И. Ивановский. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 528 с.