

УДК 550.348

ОЦЕНКА РЕАКЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ КОГЕРЕНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СТОЯЧИХ ВОЛН

Лисейкин А.В., Селезнев В.С.

Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, lexik1979@mail.ru

Введение

Для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений чрезвычайно важно определить характеристики их колебаний, возникающих от различных сейсмических воздействий. Анализ опубликованной на эту тему литературы показывает, что большинством исследователей, как в России, так и в других странах, такая оценка делается на основе результатов математического моделирования: создается конечно-элементная модель здания или сооружения и производятся численные расчеты реакции этой модели на то или иное сейсмическое воздействие в его основании. Однако, для крупных и сложных по конструкции сооружений, задача построения модели весьма трудоемка, а рассчитываемые теоретические колебания не всегда совпадают с экспериментальными.

Известно, что при воздействиях происходит усиление колебаний от основания к верху сооружения преимущественно на собственных частотах. Это подтверждается наблюдениями, выполненными на различных объектах, например, на плотине Саяно-Шушенской ГЭС (далее – СШ ГЭС). На рис. 1 приведен пример, описывающий реакцию плотины на воздействие от Тувинского землетрясения [1]. На рис. 1а показаны колебания в поперечном к плотине направлении. Из записи сейсмостанции «Черемушки», которая, как и плотина, расположена на скальном грунте, видно, что максимальная амплитуда колебаний составляет около 2 мм/с. В то же время, при регистрации в верхних точках плотины, максимумы амплитуд в несколько раз выше и достигают 7-20 мм/с. В разных точках плотины формы записей колебаний и их амплитуды отличаются. На рис. 1б показано сравнение спектров этих записей со спектрами стоячих волн, полученных из микросейсмических колебаний методом когерентного восстановления полей стоячих волн [2]. Видно, что на станции «Черемушки» спектр относительно равномерный, без ярко выраженных частотных составляющих. В верхних точках плотины в спектрах присутствуют составляющие с частотами, совпадающими с собственными частотами плотины. Предполагая, что колебания основания плотины, вызванные землетрясением, мало отличаются от колебаний, зарегистрированных в 4-х км от нее, можно заключить, что усиление колебаний от низу к верху плотины произошло преимущественно на собственных частотах. Разный вид колебаний и их амплитуд можно объяснить тем, что точки расположены в различных местах относительно узлов и пучностей стоячих волн, формирующихся в плотине. Исходя из этого появилась идея, использовать информацию, полученную при детальном обследовании сооружения методом стоячих волн для того чтобы предсказать, как оно будет колебаться при различных сейсмических воздействиях. Эти результаты можно использовать как для оценки сейсмостойкости сооружения, так и для проверки расчетов, сделанных другими методами.

Методика исследований

Технология изучения стоячих волн в крупных сооружениях на основе регистрации микросейсм с использованием малоканальной аппаратуры разработана в Сибирском отделении ФИЦ ЕГС РАН около 20 лет назад [2]. Упрощенно она состоит в следующем. В первую очередь, выполняются измерения по специальной схеме: на сооружении выбирается как минимум одна точка, в которой устанавливается аппаратура для постоянной регистрации колебаний, называемая опорной. Имеющимся набором из нескольких сейсмостанций проводятся последовательные серии измерений микросейсмических колебаний во всем сооружении. Количество таких серий может быть любым, поэтому даже имея небольшой набор сейсмостанций, можно измерить колебания по очень густой сетке, состоящей из N точек наблюдения. После измерений выполняется цифровая обработка данных: для каждой пары точек, состоящей из опорной и i -й точки на объекте, рассчитываются фильтры Винера по приведенной ниже формуле:

$$h_i(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_{ij}(\omega) \bar{F}_{0j}^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_{0j}(\omega)|^2}, \quad (1)$$

где $h_i(\omega)$ - частотная характеристика фильтра Винера для пересчета колебаний между опорной и i -й точками, $i=1,...,N$; $\bar{F}_{ij}(\omega)$ and $\bar{F}_{0j}(\omega)$ - преобразования Фурье j -х фрагментов одновременных записей в перемещаемой и опорной точках, верхний индекс $*$ – означает комплексное сопряжение; n – количество таких фрагментов. Фильтр (1) устроен таким образом, что пропускает когерентные колебания, какими являются стоячие волны и подавляет колебания от бегущих волн-помех, которые не являются когерентными. После этого выполняется процедура свертки колебаний в опорной точке с полученными фильтрами Винера, результатом которой является единовременное и детальное поле стоячих волн на объекте.

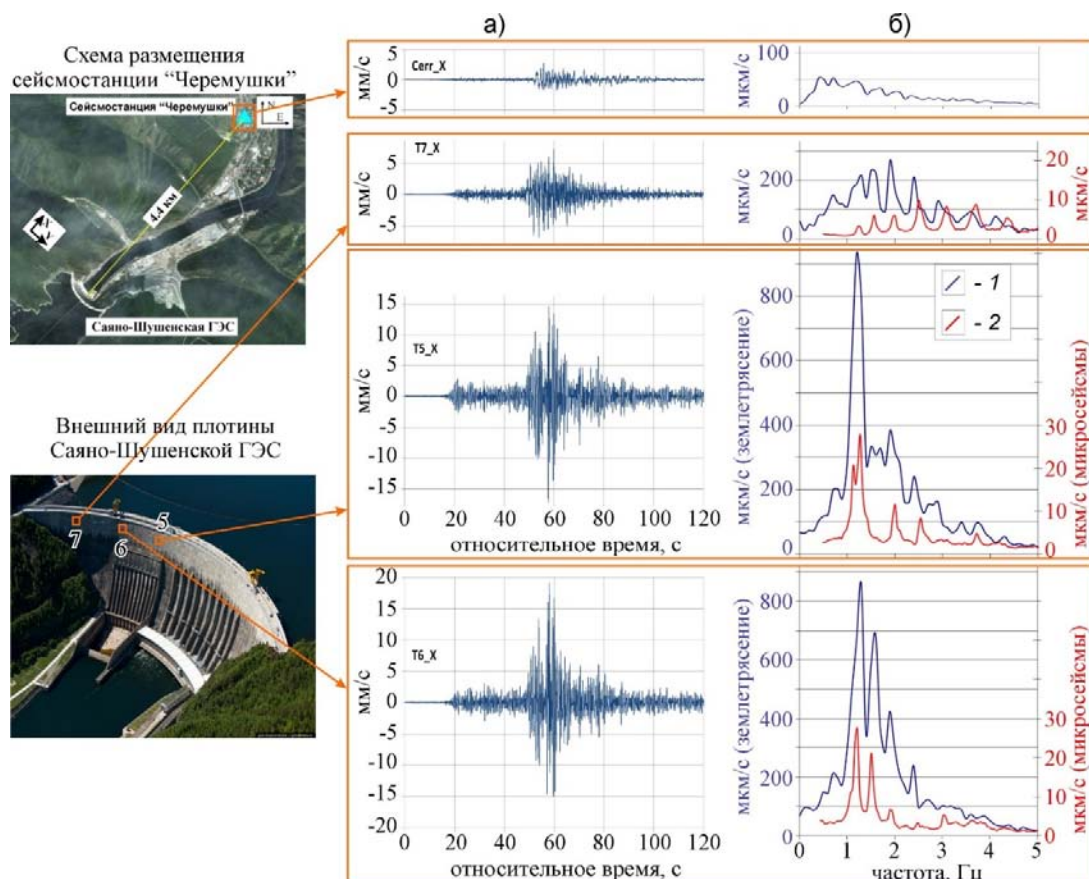


Рис. 1. Поперечные колебания в различных точках плотины СШ ГЭС, вызванные Тувинским землетрясением (26.02.2012г., $M=6.8$, ~300 км с юго-востока от ГЭС). (а) – записи землетрясения; (б) – амплитудные спектры записей землетрясения (1) и микроколебаний стоячих волн (2) в соответствующих точках.

Суть предлагаемого нами подхода состоит в следующем. Система наблюдений организуется таким образом, что добавляется еще одна опорная точка в основании здания или сооружения (рис. 2). Проводятся измерение колебаний и последующая обработка данных, с расчетом фильтров Винера между верхней опорной точкой и различными точками здания. Кроме этого, рассчитывается фильтр Винера между нижней и верхней опорной точкой.

Пусть $F(t)$ – некоторая функция, описывающая колебание, пришедшее в нижнюю опорную точку; фактически это колебание основания сооружения при сейсмическом воздействии. Далее производится расчет теоретических колебаний $\bar{F}_i(t)$ в каждой из точек сооружения по формуле:

$$\bar{F}_i(t) = [F(t) * h_0(t)] * h_i(t) + F(t), \quad (2)$$

где $*$ – это операция свертки; $h_0(\omega)$ – фильтр Винера, рассчитанный по формуле (1) для пересчета колебаний между нижней и верхней опорными точками, а $h_i(\omega)$ – фильтр между верхней опорной точкой и i -й точкой сооружения ($i=1,...,N$), соответственно. Данная процедура определяет, как преобразуется колебание в основании сооружения в любую из точек на сооружении. Дополнительное слагаемое $F(t)$ в формуле (2) введено из следующих соображений. Если его не учитывать, то будут получены только колебания с частотами стоячих волн, в связи с особенностью характеристик фильтров Винера (1). Однако, кроме стоячих волн, в поле колебаний будут еще и бегущие волны. Чтобы их учесть, вводится дополнительное слагаемое $F(t)$. Так как длина волны при низкочастотных сейсмических воздействиях, как правило, много больше геометрических размеров сооружения, то

такое допущение представляется справедливым. На заключительном этапе, чтобы перейти к оценке сейсмостойкости сооружения, можно строить детальные карты колебаний объекта в разные моменты времени, по которым, например, можно определять, в каких местах будут критические изгибы конструкции, когда она может разрушиться и при каких воздействиях это произойдет.

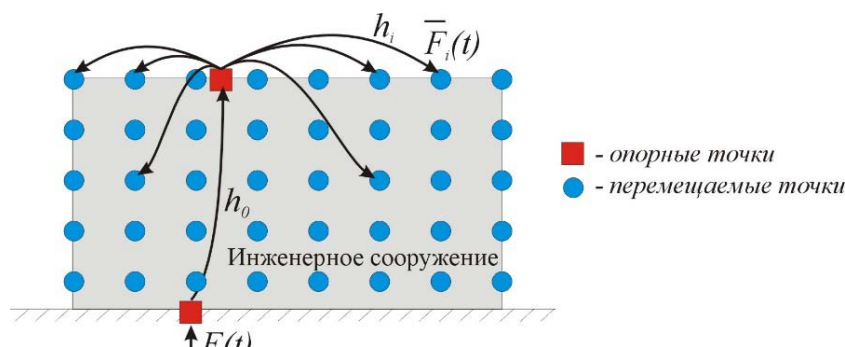


Рис. 2. Схема выполнения измерений микросейсм на объекте с целью дальнейшей оценки его реакции на сейсмические воздействия.

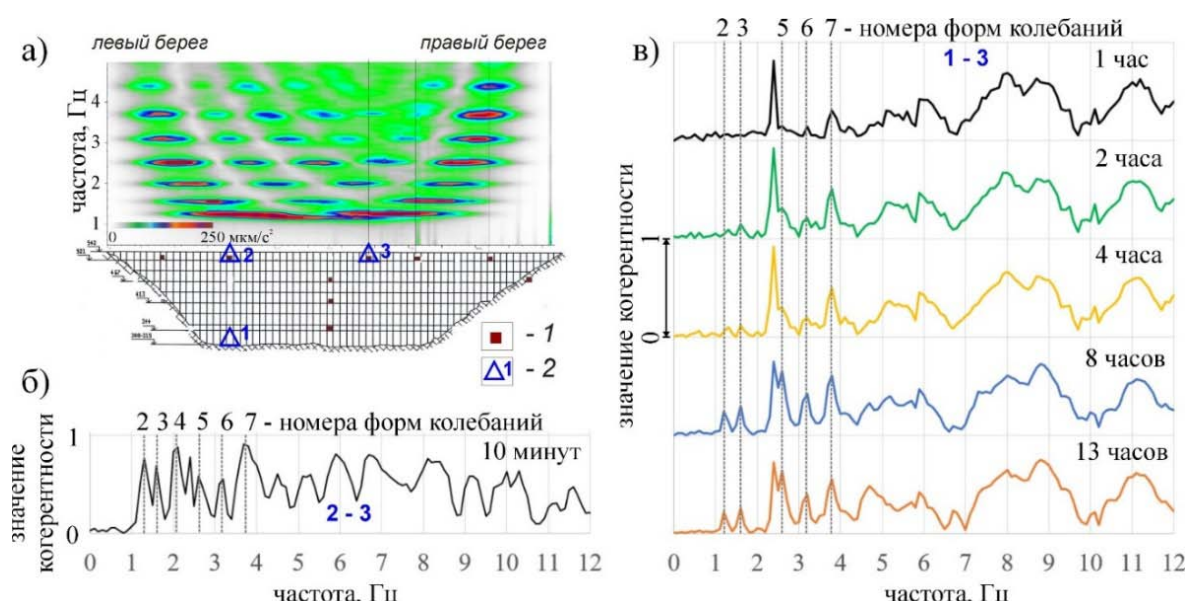


Рис. 3. Спектральное изображение поля стоячих волн, схема сейсмических наблюдений в плотине СШ ГЭС (а) и функции когерентности поперечных колебаний различной длительности между точками 2-3 (б) и 1-3 (в). 1 – пункты сейсмометрической системы; 2 – временные сейсмостанции.

Необходимо отметить, что точность расчета фильтра h_0 будет сильно зависеть от соотношения сигнал/шум в нижней опорной точке. Так как точка стоит в основании сооружения, то амплитуда полезного сигнала, связанного с собственными колебаниями сооружения, существенно ниже, чем в верхних точках. Это проявляется в том, что функция когерентности сигналов в нижней и верхней опорных точках принимает пониженные значения на собственных частотах (рис. 3в), в отличие от случая, когда обе точки расположены в верхней части сооружения (рис. 3б). Как известно из работы [2], точность расчета характеристик фильтров Винера зависит как от значений когерентности, так и от длительности используемой записи сигналов: чем выше когерентность, тем меньший интервал времени регистрации требуется для достижения заданной точности. Вместе с тем, само значение когерентности также определяется с некоторой погрешностью, зависящей как от соотношения сигнал/шум, так и от длительности записи. Для того, чтобы определить оптимальную длительность сигнала, предлагается анализировать изменения функции когерентности, рассчитанной для разных по времени длительностей сигналов. Оптимальным временем будем считать такое, когда достигается стабилизация, т.е. когда увеличение времени регистрации не приводит к изменению функции когерентности. Из рис. 3в, видно, что при длительности записей 8 и 13 часов, функции когерентности становятся стабильными. Зная значения когерентности для различных частот, можно, с использованием формул из работы [2] оценить погрешность расчета характеристик фильтров Винера. Так, при значении когерентности около 0.2 для частоты 1.2 Гц и 1.6 Гц (2-я и 3-я формы собственных

колебаний плотины) и длительности записи 13 часов, относительная точность составит около 5%. Для сравнения, при регистрации в верхних точках плотины, когда когерентность выше 0.8, точность в 5% достигается при длительности регистрации менее 10-ти минут. Таким образом, чтобы обеспечить высокую точность построения характеристик фильтров, необходимо существенно увеличить длительность регистрации одновременно в нижней и верхней точках.

Обсуждение результатов

Для апробации предложенной методики расчета теоретических сейсмограмм, были проделаны два эксперимента: на плотине СШ ГЭС и на административном здании, расположенном в г. Тайбэй (Тайвань). Рис. 4 описывает результат первого эксперимента. В качестве экспериментального воздействия использовалась запись Тувинского землетрясения от 26.02.2012. К сожалению, отсутствуют записи этого землетрясения в основании, а есть только в верхних точках плотины. Поэтому в качестве сейсмического воздействия в основании применялись записи сейсмостанции «Черемушки». Кроме этого, записи в теле плотины были с неточным временем, и не для всех компонент приборов они были кондиционными. Все это не дало возможности провести полноценное сравнение теоретических и реальных записей землетрясения. Для расчета фильтров Винера использовались записи в двух точках – в нижней части плотины и в 5-м сеймопавильоне (т.1 и т.3 на рис. 3а, соответственно). Из представленных результатов расчета теоретических сейсмограмм видно, что усиление происходит на X-компоненте, а на Y и Z колебания практически не усиливаются. Видно, что теоретические сейсмограммы по амплитуде близки к реальным. Некоторое различие в амплитудах и формах сигналов предположительно связано с тем, что исходная запись землетрясения использовалась с сейсмостанции «Черемушки», расположенной на расстоянии 4.4 км от СШ ГЭС, а не с основания плотины (где отсутствуют кондиционные записи). Кроме этого, возможное искажение вносит тот факт, что сравниваются записи, полученные разными типами сейсмической аппаратуры с отличающимися характеристиками.

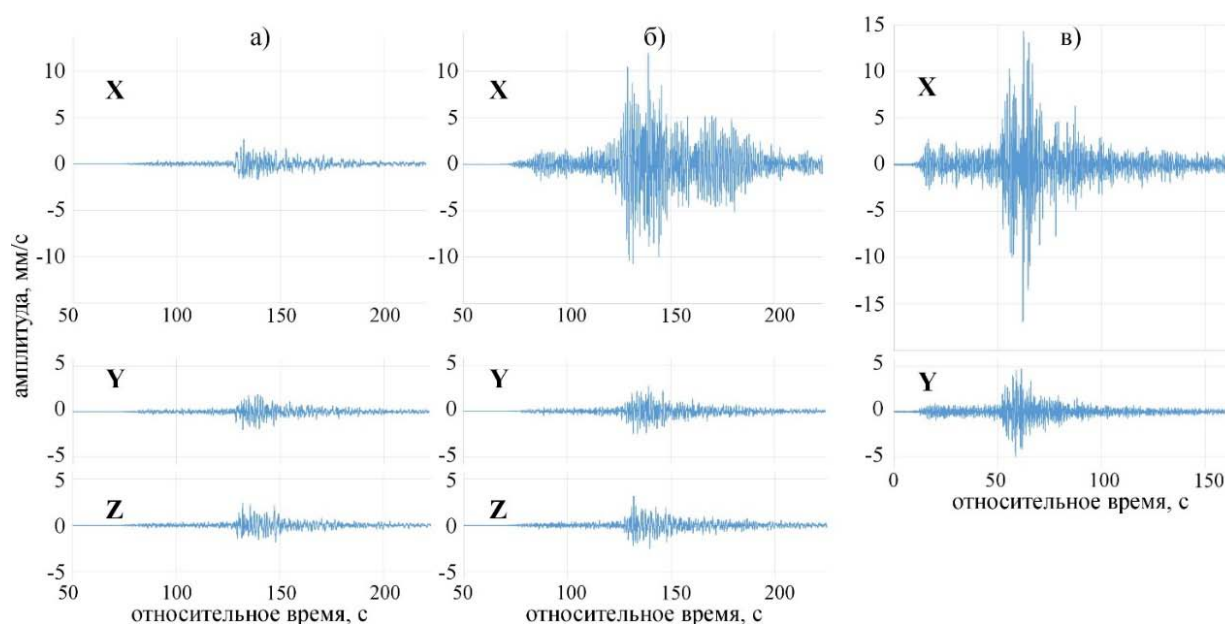


Рис. 4. Пример реализации способа для плотины Саяно-Шушенской ГЭС. (а) – запись сейсмостанции «Черемушки»; (б, в) – соответственно, теоретические и реальные сейсмограммы для т.3 (см. схему на рис. 2).

Для реализации второго эксперимента, были использованы результаты обследования здания на Тайване [8]. На рис. 5 показано местоположение здания, эпицентры использованных землетрясений, фотография объекта. Здание оснащено сейсмометрической системой, которая записывала сейсмические воздействия. Здание было детально обследовано методом стоячих волн, с использованием двух опорных точек: в основании и на крыше. Далее, с использованием предложенного подхода, была рассчитана теоретическая акселерограмма, представленная на рисунке. Видно, что теоретические и реальные колебания практически совпадают по амплитуде, значит данный способ дает достоверный результат.

В дальнейшем предполагается выполнить более детальную верификацию способа и отладки алгоритмов. Для этого необходим экспериментальный материал, которого не много, так как довольно

мало существует сооружений, оснащенных сейсмометрическими системами, а на зданиях они практически отсутствуют. При этом, сильные сейсмические воздействия происходят тоже крайне редко. В этом плане, для развития метода для нас представляют интерес записи сильных землетрясений на объектах, которые в обязательном порядке оснащены сейсмометрическими системами. К таковым относятся, например, плотины или другие гидротехнические сооружения, расположенные в сейсмоактивных районах.

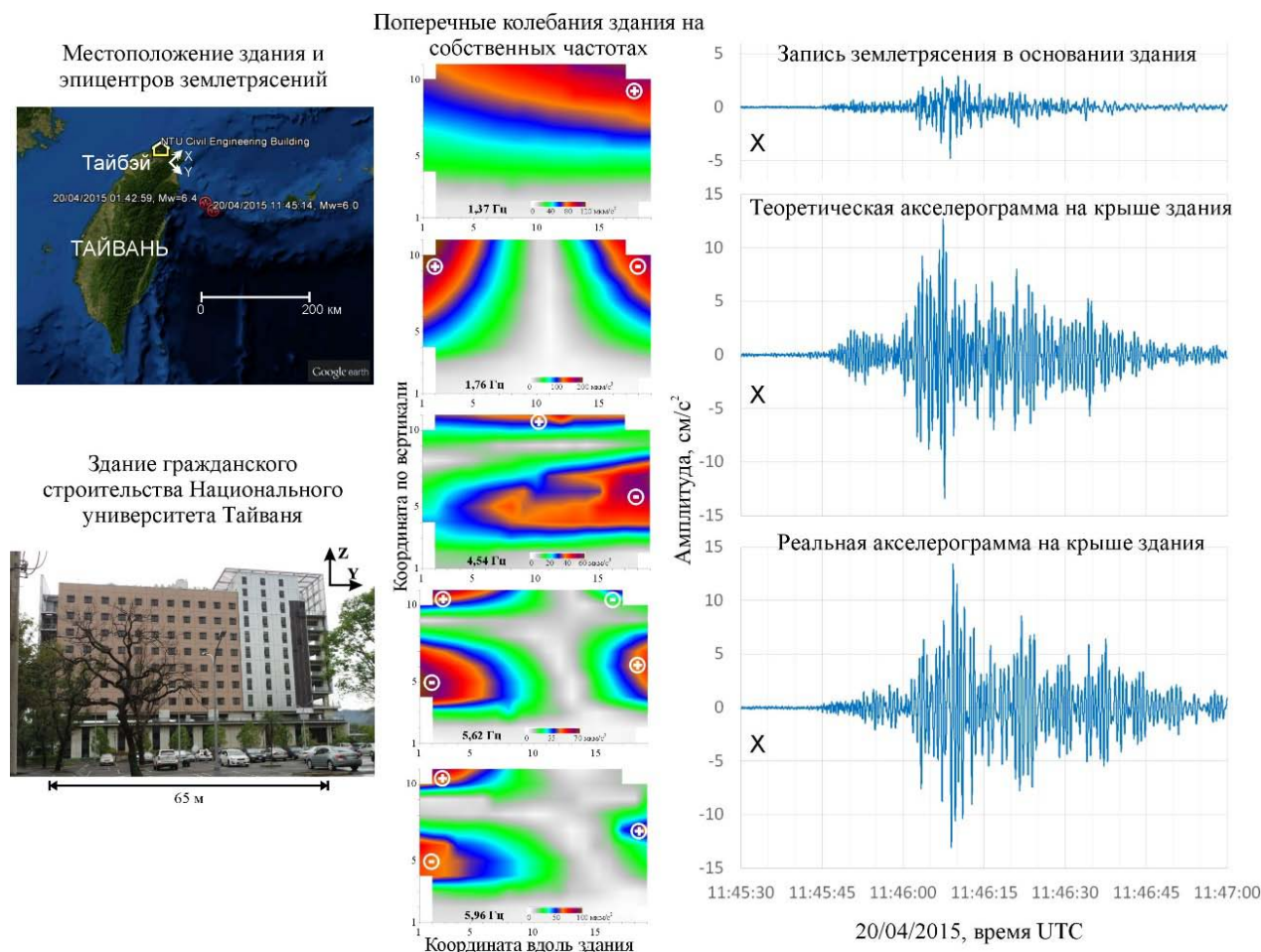


Рис. 5. Пример реализации способа для административного здания.

Заключение

Предложен способ оценки реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия в основании, заключающийся в использовании результатов их детального обследования методом когерентного восстановления полей стоячих волн для расчета теоретических сейсмограмм в различных точках объекта. С использованием экспериментальных данных на крупном инженерном сооружении – бетонной арочно-гравитационной плотине Саяно-Шушенской ГЭС, а также на административном здании в г. Тайбэй (Тайвань), показано, что теоретические сейсмограммы в целом соответствуют по амплитуде реальным записям в верхней части сооружений.

Список литературы

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнёв В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., $M_L = 6.7$ и 26.02.2012 г., $M_L = 6.8$ и их афтершоки // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 2. С. 223.
2. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. С. 192–207.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Брыксин А.А. Результаты исследования здания с резинометаллической сейсмоизоляцией методом стоячих волн (на примере здания гражданского строительства Национального университета Тайваня, г. Тайбэй) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. Т. 1. № 2. С. 53–59.