

УДК 550.34

*НГО ТХИ ЛЫ, д-р физ.-мат. наук, Институт геофизики Вьетнамской академии наук и технологий (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам);
Н.К. КАПУСТЯН, д-р физ.-мат. наук, Институт физики Земли РАН (Москва);
Г.Н. АНТОНОВСКАЯ, канд. техн. наук, К.Б. ДАНИЛОВ, А.В. ДАНИЛОВ, физики,
Институт экологических проблем Севера УрО РАН (Архангельск)*

Комплекс сейсмических методик для обследования гидротехнических сооружений

Рассмотрены методики и результаты обследования состояния бетонной высотной плотины Сон-Чань-2 (Song Tranh-2, Вьетнам) для оценки ее безопасности в связи с активизацией сейсмичности в районе ее размещения. Использован новый подход к обследованиям, развиваемый авторами, включающий комплекс сейсмометрических методик, охватывающих тело плотины и вмещающую геологическую среду. Основные методики: просвечивание тела плотины техногенными вибрациями и выявление структурных неоднородностей в основании плотины и бортах примыкания с помощью микросейсмического зондирования поверхностными волнами.

Ключевые слова: ответственные сооружения, сейсмические методики, микросейсмы, техногенные вибрации, собственные частоты.

Основной задачей обследования зданий и сооружений является определение их состояния для оценки степени безопасности функционирования объектов, в том числе для получения исходных данных для реконструкции. Визуальные осмотры зданий, сопровождающиеся различными замерами геометрических параметров (величины и раскрытия трещин, их направления и пространственной плотности, горизонтальных перемещений, осадок и кренов), а также лабораторные испытания образцов

стройматериалов являются традиционными методами в строительстве и регламентируются нормами, например СТО 70238424.27.140.032–2009 «Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования». Для многих ответственных объектов, в том числе гидротехнических сооружений (ГТС), помимо обследова-

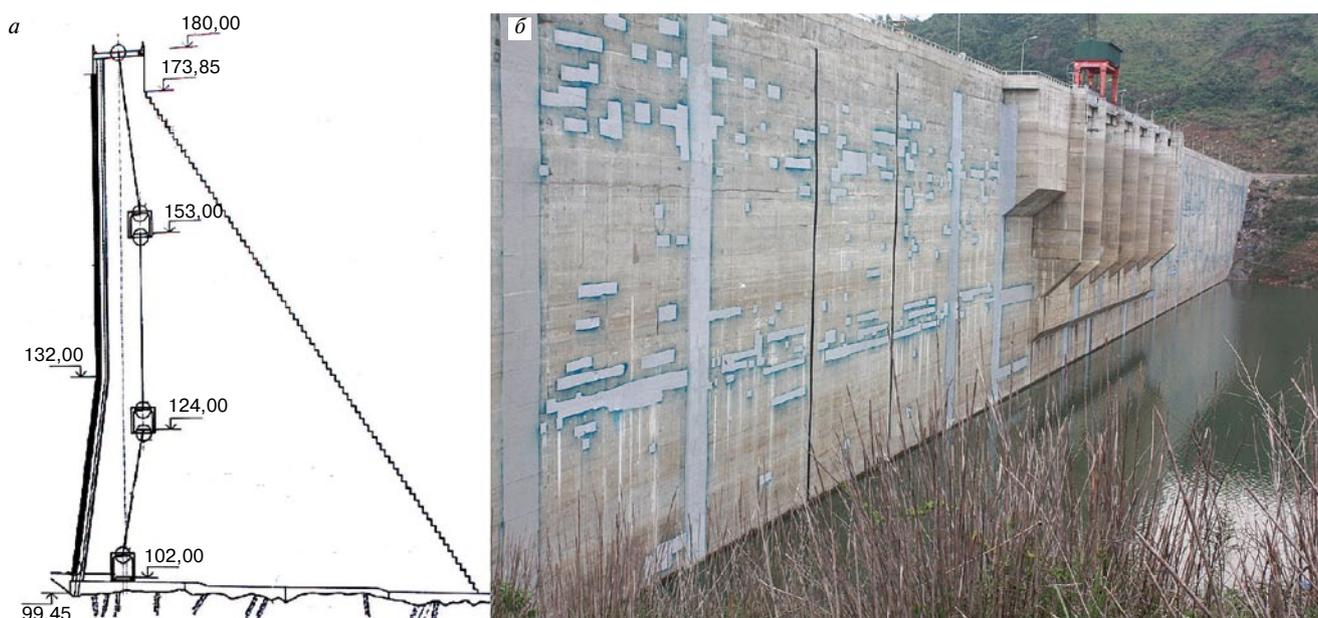


Рис. 1. Плотина Сон-Чань-2: а – разрез; б – вид со стороны верхнего бьефа, демонстрирующий результаты вычинок дефектов в теле плотины

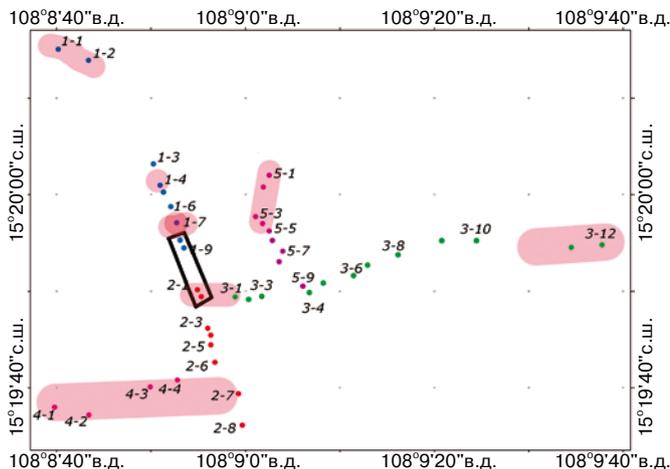


Рис. 2. Схема профилей ММЗ с указанием близвертикальных зон с пониженными скоростями горных пород; прямоугольник — основание плотины

дований регулярных по времени или после аварий и сильных землетрясений (по СТО 70238424.27.140.032–2009 после пятибалльного события), – проводится постоянный мониторинг, включающий не только геодезические наблюдения, но и измерения, отображающие напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта (пьезометрия, тензометрия, инженерная сейсмометрия и пр.). Такие измерения, свидетельствующие о состоянии объекта, позволяют, во-первых, оценить ситуацию до визуального проявления дефектов и, во-вторых, дают экспериментальную основу для создания расчетных моделей объектов, которые служат основой для оценки безопасности.

В соответствии с практикой инженерно-сейсмометрических наблюдений на ГЭС, принятой еще в конце 1980-х гг., в теле плотины и на ее бортах при инженерно-сейсмометрическом мониторинге устанавливаются малочувствительные сейсмодатчики (ТУ 4314-04-00129716-05 «Комплексы сейсмометрических наблюдений измеритель-



Рис. 3. Обследование состояния основания плотины Сон-Чань-2 со стороны нижнего бьефа с указанием линий профилей ММЗ: а – вблизи плотины; б – ниже по течению реки

ные КСНИ-ВНИИГ»). Это вызвано двумя причинами: относительно высоким уровнем техногенных микросейсм и аппаратурно-методическими возможностями прошлых лет.

В настоящее время в сейсмометрии произошла, по существу, техническая революция: цифровая регистрация позволяет реализовать широкополосные наблюдения с динамическим диапазоном от 130 дБ и более (Удаленный регистратор сейсмических сигналов ADAS3. Технические условия. ТУ 4314-71332728-003–2013), а также реализовывать нетривиальные способы обработки получаемых данных. Новые возможности в обработке сейсмического материала послужили толчком к созданию новых сейсмических методик и их комплексированию. Рассмотрим опыт применения двух методик: 1) сейсмического просвечивания тела плотины с помощью постоянно присутствующих техногенных механических вибраций, возникающих при работе турбин ГЭС; 2) выявление контрастных скоростных неоднородностей в грунтах основания и в береговых примыканиях плотины по методу микросейсмического зондирования (ММЗ) [1]. Описание методик приведено ниже. Существенно, что работы выполняются единой аппаратурой. Схемы наблюдений, обработки и интерпретации данных различны, результаты относятся к различным участкам среды, но их сопоставление позволяет предложить модель физических процессов в теле плотины.

Описание объекта, аппаратура и схемы полевых наблюдений. Плотина Сон-Чань-2 (Song Tranh-2) является бетонной гравитационной плотиной высотой около 80 м треугольного сечения с внутренними галереями (рис. 1, а). Основание плотины гранитно-гнейсовое, трещиноватое.

При проектировании плотина рассчитывалась на устойчивость при землетрясении с $M=5,5$. Расчет на сейсмические воздействия, выполненный при проектировании, показывает следующее:

- при колебаниях подвижны все части плотины, но особенно верхняя часть (примерно треть от высоты), т. е. в ней можно ожидать наибольших разрушений,
- в колебаниях участвует не только тело плотины, но и грунты основания, что требует тщательного изучения их современного состояния, т. е. после строительства плотины.

Результаты визуального обследования состояния плотины. После землетрясения с $M=4,7$ в районе водохранилища вода была спущена до минимально допустимой отметки. Сотрудниками ГЭС проведены визуальные обследования, которые выявили многочисленные участки ослабления прочности бетона (рис. 1, б). Дефекты присутствуют по всей поверхности плотины со стороны водохранилища (верхний бьеф), причем сгущение дефектов наблюдается в нижней части; иногда они объединяются в довольно протяженные зоны. В галереях в теле плотины отмечается повышенная фильтрация воды.

О состоянии грунтов основания и береговых примыканий можно судить при сопоставлении тектонической схемы района и результатов инженерных изысканий для строительства, предоставленных вьетнамскими коллегами. Присутствие крупных разломов, в том числе активных, отчетливо выделяемых в районе [2], на другом иерархическом уровне отражено в сетке разрывных нарушений вблизи дневной поверхности в основании плотины и ее береговых примыканиях. Очень важно, что мелкие разрывы близвертикальные, т. е. способны передавать флю-

ид на глубину и активизировать геодинамические процессы наведенной сейсмичности, как это наблюдалось на Нуреке [3] и известно по мировым данным. Эти особенности определили применение ММЗ для обследования грунтов основания.

Описание эксперимента. Работы выполнены в октябре-ноябре 2012 г. в связи с произошедшим в этом районе ощутимым землетрясением с $M=4,7$ и рядом более мелких сейсмических событий. Активизация сейсмичности вызвала опасения вьетнамского правительства в связи с обеспечением безопасности. Требование оперативного проведения работ определило использование аппаратуры, имеющейся в Институте геофизики Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ): четыре комплекта аналоговых велосиметров CMG-40T фирмы Guralp (Англия) и регистраторов SAMTAC-801H (Япония), обеспечивающие наблюдения сигнала в полосе частот 0,1–50 Гц с динамическим диапазоном 130 дБ. Привязка по времени – по GPS, при наблюдениях внутри плотины – по внутренним синхронизированным часам.

Исследования состояния тела плотины проводились путем последовательного прохождения ряда профилей: по гребню плотины, первой, второй и третьей галереям (рис. 5). Для каждого профиля выбиралась опорная неподвижная станция, расположенная по центру плотины. Кроме того, на протяжении всего цикла наблюдений – просвечиваний и профильной регистрации микросейсм (ММЗ) на гребне плотины в центральной ее части располагалась стационарная станция для сведения к единому уровню всех данных, полученных при исследовании.

Принята следующая схема прохождения профилей ММЗ (рис. 2): два профиля параллельно плотине – один практически по сочленению плотины с бортами и вдоль ее основания (рис. 3, а); другой – на расстоянии 250 м от нее (рис. 3, б). Кроме того, пройден перпендикулярный профиль, пересекающий два предыдущих. В непосредственном районе размещения плотины шаг между точками наблюдений 30 м, при удалении от нее до 50 м, далее до 100 м. Точки регистрации выбирались исходя из условий установки сейсмометрической аппаратуры.

Методики обследования и основные геофизические результаты. Идеология методики сейсмического просвечивания тела плотины техногенными вибрациями была заложена

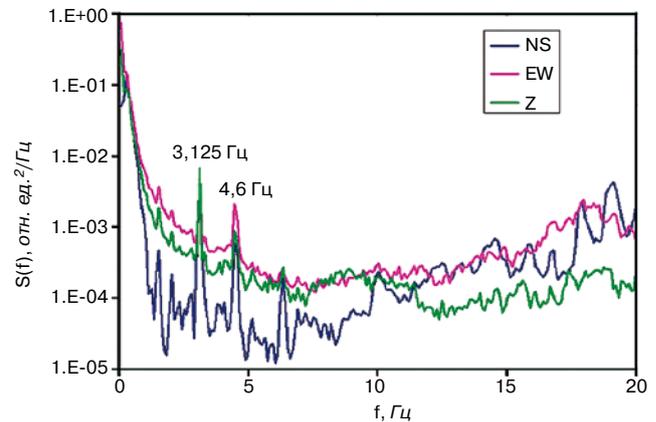


Рис. 4. Характерный пример спектра мощности микросейсм

в 1980-х гг. при выполнении программы «Вибрационное просвечивание Земли», когда была доказана возможность регистрации очень слабых гармонических сигналов на значительных удалениях от источника. Одними из таких сигналов являются механические вибрации, возникающие при работе турбин ГЭС, для выделения которых из помех на близких расстояниях достаточно выполнить расчет спектров мощности записи (с подбором нужного разрешения по частоте и осреднения); на удалениях в десятки километров требуется построение следящего фильтра с опорой на электросеть [3]. В нашем случае расстояния от работающих агрегатов ГЭС около 3 км. Вибрации от турбин отчетливо проявляются в спектрах мощности микросейсм в виде соответствующих пиков (рис. 4) на частотах 3,125 и примерно 4,6 Гц. Сигналы на этих частотах были выбраны для просвечивания плотины.

Значения амплитуд пиков меняются со временем, но расчет отношения значений амплитуд в точках наблюдения и контрольном пункте (A_i/A_0) позволяет устранить временные изменения и оставить только пространственную вариацию поля амплитуд. Заметим, что для вибраций турбин характерно небольшое изменение частоты, что приводит к изменению длины волны сейсмического сигнала. Важно, чтобы контрольный пункт и точки обследования находились на расстояниях, сравнимых с длиной волны сигнала, тогда при «уплывании» частоты и соответственно изменении дли-

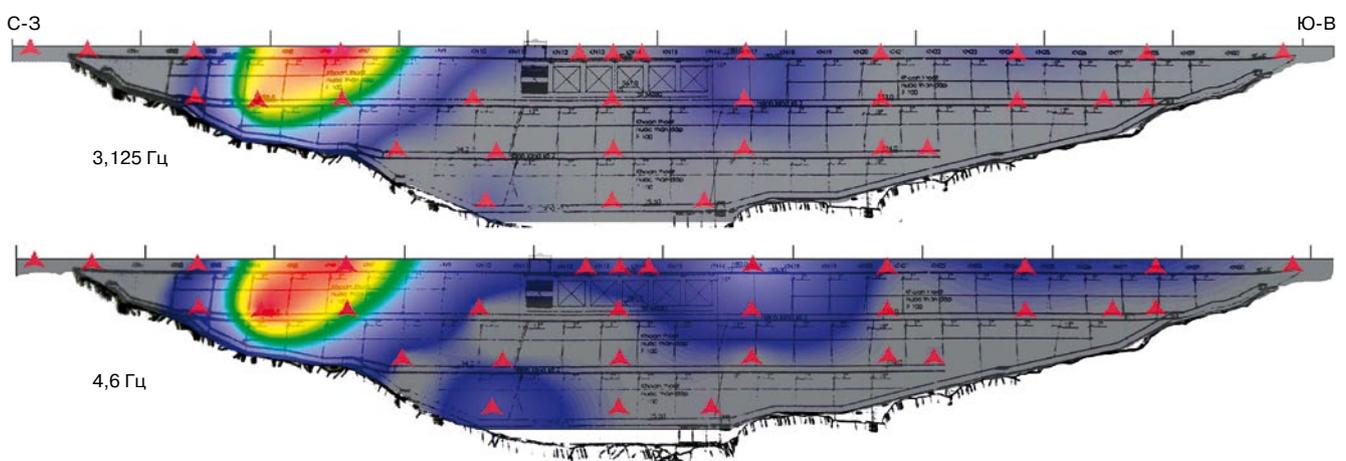


Рис. 5. Результаты просвечивания тела плотины вибрациями на частоте 3,125 и 4,6 Гц. Желто-красная область отмечает аномалию, связанную с пониженной прочностью

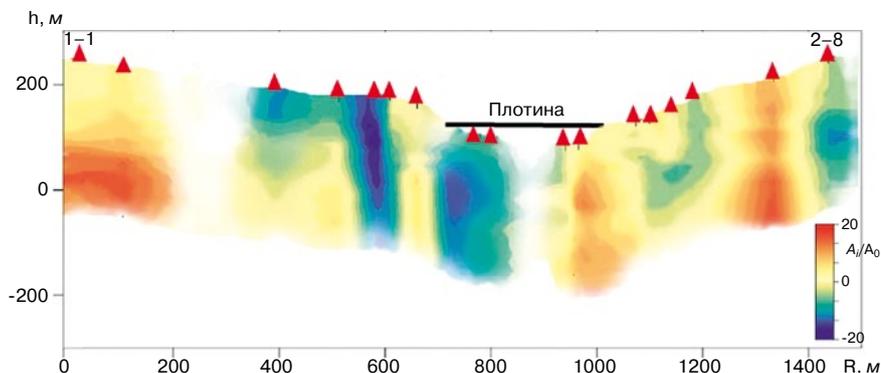


Рис. 6. Разрез ММЗ по сводному профилю (1 и 2), отображающий скоростную дифференциацию верхней части земной коры; большие значения A_i/A_0 соответствуют низким значениям скоростей, т. е. более «слабым» породам основания сооружения

ны волны погрешности в отношении амплитуд будут невелики. Это позволяет избежать заметного искажения пространственной картины относительных значений амплитуд. Именно поэтому контрольный пункт при обследовании располагался на сооружении.

На рис. 5 представлены пространственные распределения относительных амплитуд сигналов на частотах 3,125 и 4,6 Гц. Тип волн, составляющих техногенные вибрационные сейсмические сигналы, используемые для просвечивания, авторы не исследовали, поэтому трудно связать получаемые значения со скоростями в теле плотины. Тем не менее однородная пространственная картина соответствует однородному по прочностным свойствам материалу, а аномалии – зонам измененных свойств. Как видно из рис. 5, в северо-западной части плотины присутствует яркая аномалия, которая по результатам визуального обследования и параметрам фильтрации флюида обрисовывает зону пониженной прочности в плотине. Намечаются ослабленные зоны и в центральной части тела плотины (синие пятна на рис. 5).

Обследование грунтов основания с использованием ММЗ. Описание методики и тестовые примеры приведены в [4]. Метод основан на интерпретации поверхностных волн Рэлея, присутствующих в микросейсмах. Амплитуда поверхностной волны зависит от значения скорости ее распространения в среде, причем малым скоростям соответствуют большие амплитуды, и наоборот. Интерпретация набора волн Рэлея на разных частотах позволяет получать сведения о скоростях на разных глубинах. Существенно, что ММЗ нацелен на выделение близвертикальных неоднородностей. Была разработана полевая модификация ММЗ, усовершенствованы приемы обработки данных, реализованные в программном комплексе [5]. Результаты обработки одного из профилей, проходящих через плотину, представлены на рис. 6.

Анализ разреза на рис. 6 показывает присутствие контрастных близвертикальных неоднородностей, природа которых связана с трещиноватостью горных пород, отмеченной еще на стадии инженерных изысканий, а также с разломной тектоникой района. Обратим внимание на желто-красные участки, соответствующие низкоскоростным зонам, по-видимому, «ослабленным» трещинами. Основные зоны вынесены на карту рис. 2. Их расположение указывает на присутствие в районе плотины системы разрывов разной пространственной ориентации, что может служить указанием на повышенную геодинамическую активность этого блока. Из рис. 6 видно, что основание и бор-

товые примыкания плотины для разных ее концов характеризуются существенно различными скоростными и, следовательно, прочностными свойствами. Северо-западный борт прочный высокоскоростной, юго-восточный – более низкоскоростной, т. е. «ослабленный».

Сравним результаты, представленные на рис. 5 и 6. Ослабленное основание плотины на юго-восточном крыле вызывает изменение напряженно-деформированного состояния плотины, появляются компоненты, характерные для консольного закрепления плотины (в северо-западной части). Такие напряжения могут сопрово-

ждаться появлением системы трещин в направлениях, совпадающих с геометрией основного пятна «ослабления» (рис. 5). Таким образом, привлечение даже простых сооружений к работе конструкций позволяет получить хорошее согласие данных двух независимых методик: ослабленное основание приводит к нарушениям в теле плотины.

Выводы. Показана возможность и приведены методы проведения сейсмического экспресс-обследования плотины Сон-Чань-2, позволяющие оперативно получать данные о состоянии плотины, грунтах основания и позволяющие определить основу для дальнейших мероприятий по обеспечению целостности ее состояния. Экспериментальные материалы являются ключевыми для понимания природы процессов деформирования тела плотины, которые связаны в первую очередь с состоянием основания. Полученные данные позволяют планировать мероприятия по реконструкции плотины и указывают на необходимость общего мониторинга геодинамического состояния района и детальных повторных обследований, которые целесообразно проводить по приведенной схеме.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников Института геофизики ВАНТ и персонал плотины Сон-Чань-2 за помощь в работе.

Список литературы

1. Пат. 2271554 РФ. Способ сейсморазведки / А.В. Горбатов. Оpubл. 10.03.2006. Бюл. № 7.
2. Ngô Thị Lư, Rogozhin E.A. Phân tích đặc điểm địa động lực hiện đại khu vực biển Đông. Địa chất số 305. 3–4/2008. Tr. 43–50.
3. Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 416 с.
4. Горбатов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
5. Попов Д.В., Данилов К.Б., Иванова Е.В. Использование оригинального программного комплекса DAK для обработки цифровых записей микросейсм // Материалы VI Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 263–266.