

## Об одной возможности применения мощных низкочастотных сейсмических вибраторов для диагностики физического состояния зданий и сооружений

Чичинин И. С., Институт Геофизики СО РАН, г. Новосибирск

**1. Мощные низкочастотные вибрационные источники** В 1980-х годах усилиями ряда институтов Сибирского отделения Академии Наук СССР (СО АН СССР) было развито научное направление в области сейсмологии, основанное на использовании вибрационного источника сейсмических волн [2]. Был разработан дебалансный вибратор с амплитудой силы около 100 тонн ( $100 \cdot 10^4$  Н). Рабочие частоты этого вибратора могут настраиваться на полосы 1,5 - 3 Гц, 3 - 6 Гц, 5 - 10-12 Гц. Потом для целей ГСЗ был сделан 40-тонный передвижной вибратор, который в настоящее время настраивается на полосу 5 - 12-15 Гц.

Длительность вибрации может быть задана от нескольких минут до любого времени. На практике обычно ограничивались длительностью до одного часа. В варианте, когда 100-тонный вибратор настроен на полосу от 5 до 10-12 Гц, при 45-минутном сеансе получают кондиционные импульсные сейсмограммы на расстояниях до 350 км. По интенсивности они эквивалентны взрыву 5 тонн тротила на дневной поверхности. В монохроматическом режиме надежное выделение амплитуды и фазы сейсмических колебаний, излучаемых вибратором на берегу Обского моря, было осуществлено на берегу озера Балхаш (на расстоянии 1400 км).

Следует отметить, что мощные низкочастотные вибраторы представляют собой увеличенную в размерах копию сейсморазведочного вибратора комплекса "Вибролокатор", который был создан в 1970-х годах по инициативе автора при активном творческом участии Юшина В.И., Кулакова В.Ф., Евчатова Г.П., Комлягина А.Г., Михаэлиса Ю.В., Сагайдачного В.К. и других. Внедрить тогда "Вибролокатор" в широкую практику сейсморазведки не удалось. Была предпринята отчаянная попытка наладить изготовление "Вибролокаторов" в США. По инициативе американского бизнесмена Т. Рассела и МинГеоСССР (в лице Р. И. Шустова) в декабре 1989 г. "Вибролокатор" был доставлен в Техас. Там на "Вибролокаторе" параллельно с наиболее мощным тогда американским вибратором Y-2400 типа "Вибросейс" был отработан профиль ОГТ. Полученные разрезы ОГТ оказались на глаз не

отличимыми друг от друга. Существенное различие между вибраторами было в цене: стоимость "Вибролокатора" по расчетам в 5 - 7 раз меньше, чем "Вибросейса".

На рис. 1 приведено фото "Вибролокатора" работающего на профиле в Техасе. Вибраторы Y-2400 и "Вибролокатор" сравнивались лишь при вертикальной ориентации силы вибратора, так как вибраторов "Вибросейс" с горизонтальной ориентацией тогда еще не было. После развала СССР эти переговоры прекратились. В настоящее время реанимировать "Вибролокатор" пока нет возможности, хотя теперь при наличии компьютерной техники он был бы еще проще и еще дешевле.

Таким образом, "Вибролокатор" живет в настоящее время в виде мощных низкочастотных вибраторов. Они предназначены для решения следующих задач.

1. Мониторинг земной коры в сейсмически активных регионах с целью поиска предвестников землетрясений.

2. Глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) для уточнения строения земной коры.

3. ГСЗ для калибровки пунктов приема сейсмических сигналов при решении задачи контроля выполнения международных соглашений о запрете ядерных взрывов.

4. Сейсмическое микрорайонирование территории при выборе площадок для строительства зданий и сооружений.

5. Диагностика физического состояния каркаса и фундамента существующих промышленных сооружений (высоких плотин ГЭС, жилых зданий, мостов, атомных электростанций и др.).

Опыт применения передвижных 40-тонных вибраторов при работах по ГСЗ описан в настоящем сборнике, в статье "Технология региональных исследований методом ГСЗ вибрационным источником". Остальные задачи, как видим, представляют собой задачи научного характера, много "посадочных мест" для геофизиков там не предвидится. Исключением может быть 5-я задача, которая в будущем по своей "кадроемкости" может оказаться одного порядка с сейсморазведкой нефтяных и газовых месторождений. Фронт работ в этом направлении не будет уменьшаться. А когда будет заканчиваться срок службы "хрущевок", надо будет "латать" и геофизики должны будут указывать, что и как "лечить", в каждом доме индивидуально. Здесь и электроразведчики найдется много работы: места утечки в трубах, смонтированных в стены, кто же может найти, кроме электроразведчиков!

**2. Исследование существующих инженерных сооружений на микросейсмах.**

Технология обработки длительных вибросейсмических сигналов натолкнула исполнителей на описываемых ниже работ на открытие очень оригинального способа применения микросейсм.

В работе [1] описаны экспериментальные исследования при помощи метода, который позволяет увидеть колебания протяженных сооружений (плотин, мостов, домов и т.п.) так, как будто бы в этих объектах с густым шагом было установлено много сотен трехкомпонентных сейсмодатчиков. Здесь говорится "как будто бы", так как поставить большое количество



Рис. 1 Сибиряки в Техасе. Январь 1990 г., "Вибролокатор" работает в молодой бамбуковой роще, на ранчо бизнесмена Т. Рассела. На нем стоит В.К. Сагайдачный - один из разработчиков его конструкции и программ обработки на советских ЭВМ

сейсмоприемников практически невозможно. В указанном методе используется следующий способ: один 3-х компонентный сейсмоприемник, установленный в некоторой точке, остается неподвижным. Несколько таких же сейсмоприемников переставляются от точки к точке. Источником колебаний являются всевозможные микросейсмы (уличный шум, топот людей и т.д.). Оказалось, что авто- и взаимно-корреляционные функции колебаний от этих датчиков стабилизируются по форме при длительности наблюдения микросейсм около 5-7 минут. Таким образом, 2-3 человека за несколько дней могут произвести съемку колебаний протяженного сооружения, никому при этом не мешая, не останавливая работы на объекте. Потом, при компьютерной обработке, эти записи "сшиваются", и в результате получается такая картина, как будто бы во всех точках наблюдения приемные датчики стояли все время.

На записях, получаемых при помощи микросейсм, хорошо выделяются десяток первых мод и формы этих мод по длине и высоте исследуемого сооружения. По ним можно определить "усиление" колебаний от подвального этажа до чердака, а также добротность колебаний на каждой моде. (Если, например, какое-то перекрытие или элемент здания держится "на честном слове", то на соответствующей моде этот элемент раскачается с большой амплитудой.)

Моды явно соответствуют изгибным колебаниям объекта [3]. Заметим, что "формами" и "модами" в разных источниках называют одно и то же: это колебания объекта на своих "собственных" частотах, то есть на своих резонансных частотах. То, что эти колебания можно вызвать при помощи различных источников и, в частности, при помощи микросейсм, хорошо видно на камертоне: он будет колебаться на своей "собственной" частоте при любом воздействии на него. А то, что эти колебания изгибные, видно невооруженным глазом. При этом никто не сомневается, что первопричиной этих колебаний являются упругие волны, только самих волн (продольных и поперечных) там не видно. Видно только, что эти колебания "как бы стоят", поэтому они называются "стоячими".

По своей оперативности метод, основанный на использовании микросейсм, можно называть экспресс-методом. Более трудоемким является метод, основанный на использовании волн, приходящих от удаленного сейсмического вибратора. Чем эти методы дополняют друг друга, будет ясно из дальнейшего.

### **3. Метод диагностики физического состояния инженерных сооружений при помощи волн, приходящих от удаленного сейсмического вибратора.**

Для определенности рассуждений предположим, что исследуемое сооружение имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Длинная сторона этой "коробки" расположена по оси  $x$ , короткая сторона - по оси  $y$ , ось  $z$  направлена вверх. Предполагается, что нижняя часть параллелепипеда выполняет функции фундамента, то есть эта часть на какую-то глубину внедрена в породы, служащие основанием фундамента.

Съемка колебаний сооружения производится путем перестановки 3-х компонентных сейсмоприемников по "профилям"  $x$  (по коридорам этажей, включая чердак и подвальный этаж). Процедура съемки колебаний, возбуждаемых микросейсмами и удаленным вибратором, может быть совмещена во времени, по можно это делать и в разное время. (Для выделения вибросейсмических сигналов съемку лучше проводить ночью, когда уровень уличного шума минимален.) По зарегистрированным вибросейсмическим колеба-

ниям от удаленного вибратора восстанавливается импульсная сейсмограмма. Значительная удаленность источника необходима, чтобы приходящие волны были почти плоскими, а так же чтобы продольные и поперечные волны хорошо разделились во времени.

В начальной части сейсмограммы обычно наблюдаются продольные волны, которые подходят к поверхности земли от удаленного источника по лучам, близким к вертикали. Реакция исследуемого сооружения на продольные волны будет приблизительно такой же, как при испытании этого сооружения силами, действующими по вертикали. В последующих вступлениях сейсмограммы наблюдаются поперечные волны, которые имеют интенсивные горизонтальные компоненты. Характер колебания элементов сооружения на временах прихода поперечных волн будет близок к тому, как если бы это сооружение подвергали горизонтальным смещениям. Из сказанного ясно видно, чем отличаются друг от друга оба метода. Возьмем тот же камертон. Если колебания придут вдоль ножек камертона, то камертон будет, конечно, колебаться на своей собственной частоте, но слабо. Если те же колебания придут поперек ножек, в плоскости их изгиба, то ножки размахнутся с большой амплитудой. Но опыт, полученный экспресс-методом, будет полезен и во втором методе, так как мы заранее будем знать величины собственных частот и тем самым будем знать, какой вибратор нам нужен. Из сказанного ясно также и то, что нам нужен именно сейсмический вибратор, так как по вибросейсмическим колебаниям потом надо будет восстанавливать импульсную сейсмограмму.

Смещения в элементах сооружения регистрируются с достаточно густым шагом, чтобы можно было определить деформацию в этих элементах по разностям смещений в точках регистрации. Самих трехкомпонентных сейсмоприемников требуется немного: расставили сейсмоприемники, и по радиотелефону просим включить вибратор. Зарегистрировали сеанс вибрации, переставили приемники на следующие точки и опять просим включить вибратор и т.д. После выделения на сейсмограммах продольных и поперечных волн, по смещениям в этих волнах строятся карты деформаций на нескольких собственных частотах, то есть на частотах, на которых колебания имеют преобладающую амплитуду. Составляется прогнозная карта, отвечающая (в линейном приближении) на вопрос, как будут колебаться те или иные элементы здания при приходе землетрясения с силой  $N$  баллов. (В линейном приближении предполагается, что вид карты деформаций для слабых и сильных землетрясений остается неизменным, различаясь лишь масштабным множителем.)

По полученной прогнозной карте определяются места, где при приходе землетрясения с силой  $N$  баллов деформации выйдут за линейный участок. (Для хрупких материалов это означает, что на этом месте появится трещина. Для многих материалов верхним пределом упругих деформаций является величина порядка 0,001 - 0,002. За этой зоной закон Гука не выполняется.) Кроме того, определяются мониторинговые признаки для слежения за состоянием пород, служащих основанием фундамента.

Калибровка импульсных сейсмограмм, восстановленных из вибросейсмических колебаний, производится следующим образом. Обозначим расстояние от вибратора до исследуемого сооружения через  $R$ . По круговому профилю  $R = \text{const}$  с 3-х компонентными сейсмоприемниками выполняют наблюдения и получают импульсные



# **ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ ИННОВАЦИЯ**

сейсмограммы, восстановленные из вибросейсмических колебаний, возбуждаемых при "стандартном" сеансе вибрации. На этом профиле в точке, где нет крупных зданий, необходимо получить запись сигналов от какого-либо удаленного землетрясения при помощи тех же 3-компонентных сейсмоприемников, которые использовались для регистрации вибросейсмических колебаний. Эту точку регистрации будем называть "стационарной точкой". Специалисты-сейсмологи должны определить балльность наиболее интенсивной волны, зарегистрированной на сейсмограмме от естественного землетрясения. Удаленность стационарной точки от крупных зданий необходима из-за того, что такие здания искажают приходящие сигналы, так как они начинают колебаться на своих собственных частотах. Получаемые при этом записи будут такими, как если бы не искаженную сейсмограмму "пропустили" через фильтры, которые "прозрачны" лишь на частотах в окрестности собственных частот.

Имея сейсмограммы от удаленного землетрясения и от вибратора, полученные в "стационарной точке" на одних и тех же приемниках, можно будет утверждать, что в сейсмограмме, полученной от "стандартного" сеанса вибрации в исследуемом сооружении, группа волн, например, в области первых вступлений, слабее (или сильнее во столько-то раз) сигналов землетрясения интенсивностью  $M$  баллов. На вибрационных сейсмограммах, регистрируемых в точках исследуемого сооружения, эта волна будет искажена, тем не менее ее можно будет распознать по времени прихода и утверждать, что эти колебания соответствуют землетрясению в  $M$  баллов.

Вибратор для описанных экспериментов, как говорилось выше, должен быть установлен на значительном расстоянии от исследуемого сооружения. Из опыта предыдущих работ исполнителей известно, что 40-тонным передвижным вибратором можно освещать территории в радиусе до 100 - 200 км. Но в городских условиях на исследуемых объектах уровень шумов будет высоким, поэтому расстояние вибратор-сооружение не должно быть больше 30 - 40 км. В то же время вибратор должен стоять на удалении не менее 10 км от жилых домов, чтобы жители не чувствовали, работает наш вибратор или нет. (Для сведения: на Быстровском полигоне, который находится на берегу Обского моря, работу 100-тонного вибратора человек может ощутить в тихую ночь на расстоянии до 2 - 3 км.)

Приведенные выше рассуждения в формулах, в очень сжатом изложении, выглядят следующим образом.

В импульсной сейсмограмме, восстановленной из вибросейсмических колебаний точки  $(x, y, z)$ , смещения по направлениям  $x, y, z$  обозначим  $X(x, y, z, t)$ ,  $Y(x, y, z, t)$ ,  $W(x, y, z, t)$ . Сначала рассмотрим вертикальную компоненту колебаний,  $W(x, y, z, \omega)$ , на какой-то собственной частоте  $\omega$ , которую можем заранее определить по наблюдениям микросейсм. Рассматриваем эту компоненту в вертикальной плоскости, проходящей посередине здания.

Забегая несколько вперед, спросим, какую информацию несет эта компонента. Представим себе, что в левой половине здания, в точках  $x \leq x_0$ , породы, лежащие под фундаментом, перестали выполнять роль "постели", то есть эта часть здания просто висит над "пустотой". Когда снизу придет плоская волна с вертикальной ориентацией смещения, то "висящая" часть здания начнет колебаться с большей амплитудой.

В плоскости нормального сечения  $(x=x_0)$  на

чердаке здания ( $z=h_{\max}$ ) и в нижней границе нашего параллелепипеда ( $z=h_{\min}$ ) возникнут растягивающие и сжимающие по направлениям деформации  $\epsilon_{xx}$ . При какой-то амплитуде колебаний  $W(x, y, z, \omega)$  эти деформации приблизятся к границе области деформации, линейный закон Гука не выполняется, за которой возникнет трещина. На какой-то высоте  $z=z_{\max}$  (точка нам неизвестна) растягивающие и сжимающие деформации будут равны нулю. Эта высота является функцией  $x$  в сопропите, называется "нейтральной линией" (или, что то же самое, "нейтральной" описывать углом  $\phi=W_x$ , где  $W_x$  - производная смещения  $W$  по  $x$ ). Растягивающие и сжимающие по направлению  $x$  деформации описываются формулой

$$\epsilon_{xx}=(z-z_{\max}) \cdot (d/dx) \phi=(z-z_{\max}) W_x$$

где  $W_{xx}$  - вторая производная смещения. В верхней границе параллелепипеда деформация будет максимальной,  $\epsilon_{xx,\max}=(h_{\max}-z_{\max}) \cdot (d/dx) \phi=(h_{\max}-z_{\max}) W_x$ . Если на каком-либо участке здание просто висит над пустотой, то на этом участке нейтральная линия будет проходить на средних этажах здания. Если же "постель" здания (то есть породы, являющиеся основанием фундамента) хорошо выполняют свои функции, то нейтральная линия будет проходить гораздо ниже, возможно, на подвальному этажу. Таким образом, положение нейтральной линии по высоте является важным параметром, характеризующим состояние "постели".

Из физических соображений ясно, что наибольшую амплитуду будут иметь изгибные колебания по оси  $y$ . Сейсмограммы, полученные на приборах  $y$ -ориентацией, мы обозначили  $Y(x, y, z, t)$ . Рассмотрим сначала сейсмограммы, полученные на высоте  $z=z_0$ .

Пусть нейтральная линия проходит по точке  $y=y_{\max}$ . При изгибе здания возникнут растягивающие и сжимающие деформации  $\epsilon_{yy}=(y-y_{\max}) Y_{xx}(x, z_0, \omega)$ , то есть при изгибе здания в точках  $y_{\max}$ ,  $y_{\min}$   $y_{\max}$  растягивающие и сжимающие деформации будут максимальными. Если плоскость  $z=z_{\min}$  здания, соприкасающаяся с породами, являющимся основанием фундамента, равномерно сцеплена с "постелью", то нейтральная линия будет проходить посередине здания. Если же она сцеплена только по одной длинной стороне здания, а другая длинная сторона здания скользит по "постели" без сопротивления, то нейтральная линия будет смещена в ту сторону, где имеется хорошее сцепление.

Пусть в результате выполненного обследования здания узнали, что какие-то стены держат неплохо, потолок - слабо, а перекрытия - очень плохо, на честном слове. Для хозяина сооружения это мало: он должен также узнать, что же надо сделать, чтобы все было хорошо. Здесь открывается большой фронт работы для геофизиков материального склада ума: ведь надо рассмотреть различные варианты устранения недостатков и выбрать из них наиболее надежный и дешевый.

## Литература

1. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. и др. Пересечение стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях. Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 3.
2. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М., Недра, 1984.
3. Чичинин И.С. Изгибные колебания и волны наблюдаемые в зданиях и сооружениях, с точки зрения сейсмика. Геофизика, 2004, № 1.