

Е. Я. Бубнов¹, В. В. Гуцин², А. К. Миннегулов³, С. Н. Рубцов²

¹ Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волжская государственная академия водного транспорта», Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: rector@aqu.sci-nnov.ru

² Федеральное государственное научное учреждение «Научно-исследовательский радиофизический институт, Н. Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25, e-mail: guvladimir@nirfi.sci-nnov.ru

³ Специальное конструкторско-технологическое бюро прикладной робототехники при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана Москва, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: akm53@mail.ru

Использование упругих полей для обнаружения приповерхностных неоднородностей

Получена 19.11.2008, опубликована 03.02.2009

В настоящей работе изложены результаты экспериментальной апробации предложенных авторами методов сейсмоакустического обнаружения подповерхностных неоднородностей. Идея методов основана на наличии так называемых установочных резонансов объектов, зависящих от геометрических и физических характеристик самой неоднородности, а также от характеристик вмещающего ее грунта. Возбуждение резонансных колебаний возможно различными путями. В работе рассмотрено два технически реализуемых способа возбуждения неоднородности: акустической волной и вибратором. Экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики колебаний поверхности различных типов грунтов при наличии в них локальных неоднородностей и рассмотрен способ контактного съема колебаний грунта с подвижного носителя.

Ключевые слова: упругие поля, виброисточник, локальная неоднородность, обнаружение.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск подповерхностных неоднородностей, в качестве которых могут выступать предметы археологии, валуны, неразорвавшиеся снаряды и т. п., является актуальной задачей в различных областях науки и техники. Существует множество методов и подходов к решению указанной задачи. К сожалению, все они имеют ограничения в своем применении. Поэтому многие исследователи видят выход в комплексном использовании физических полей различной природы. В данной работе в качестве вспомогательного метода предлагается использовать упругие волны, распространяющиеся по воздуху и проникающие в грунт, а также возбуждаемые в грунте различными поверхностными источниками. Их взаимодействие с объектом поиска приводит к его характерным колебаниям позволяющим производить

идентификацию цели. Предложенный метод [1] мы назвали резонансным сейсмоакустическим. Явления, лежащие в его основе, известны в сейсмологии [2–4]. Так в ряде работ по измерительной сейсмологии [5] указывается на нежелательный для исследователей факт изменения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) датчиков при их постановке на грунт. При этом форма АЧХ зависит от свойств грунта и, главное, от формы и массы самого приемника. Аналогичными свойствами должны обладать любые неоднородности, находящиеся на поверхности или внедренные в слой земли. Предварительно измерив АЧХ целевых объектов в различных условиях их размещения можно построить систему обнаружения. Реализация этой идеи требует разработки методов возбуждения колебаний заглубленных объектов, а также создания схем съема АЧХ их колебаний.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПОИСКА ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

Техническая реализация способов возбуждения колебаний грунта предполагает много вариантов. Мы рассмотрим два наиболее простых с точки зрения технического использования — это инициирование вибрации объекта акустическим излучателем и виброисточником. Съем колебаний осуществляется с поверхности земли. Следует отметить, что при этом колебания поверхности грунта, хотя и не соответствуют в точности колебаниям целей, но в той или иной степени отражают их особенности, достаточные для принятия решения об обнаружении.

Рассмотрим более подробно явления, происходящие в грунте при размещении в приповерхностном слое какой-либо локальной неоднородности (см. рис. 1). Сам факт установки объекта приводит к изменению механических параметров грунта из-за разрыхления почвы. Кроме того, механические характеристики объекта и грунта также отличаются между собой, следовательно, при акустическом возбуждении колебания неоднородности и грунта будут отличаться по спектрально-амплитудным характеристикам. В общем случае можно говорить о наличии двух колебательных систем со своими резонансными частотами.

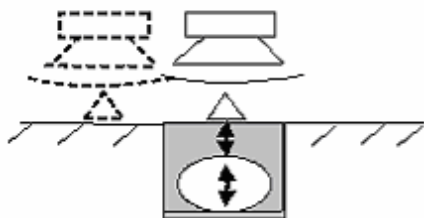


Рис. 1.
Методика проведения испытаний с использованием акустического источника

Для проверки физических предположений были проведены натурные измерения.

В эксперименте низкочастотный громкоговоритель излучал звуковой сигнал в полосе 20...300 Гц. Колебания грунта регистрировались датчиком скорости смещения СВ-10Ц, установленном на поверхности грунта, затем преобразовывались в электрический сигнал, который подвергался спектральной обработке. На рис. 2

приведены АЧХ колебаний поверхности грунта (кривые 1, 2, 3), полученные при установке одной и той же неоднородности в разные типы грунтов. По вертикальной оси отложены величины электрического напряжения, пропорционального скорости смещения грунта. Совокупность остальных кривых (4) отвечает отклику сейсмического датчика, установленного на невзрыхленный грунт без неоднородности.

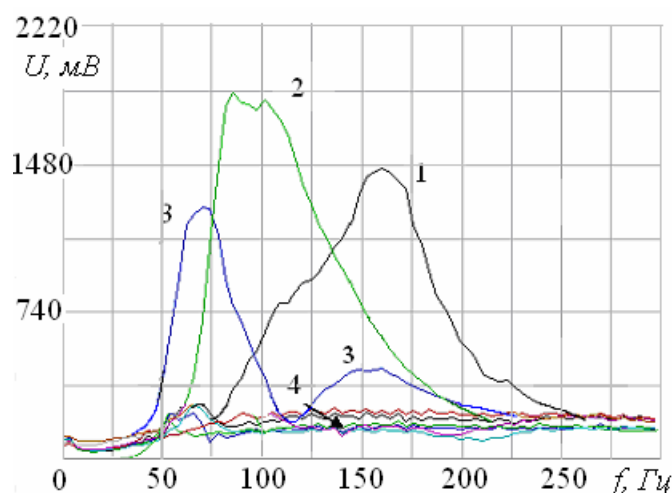


Рис. 2. Резонансные кривые сейсмического сигнала, принятого над неоднородностью для трех типов грунтов.

1 — песок, 2 — суглинок (сухой), 3 — супесь (влажный),
4 — материковый грунт

Анализ приведенных амплитудно-частотных характеристик колебаний поверхности грунтов позволяет сделать следующие выводы. Все эти характеристики оказываются чувствительными к изменению механических свойств грунта. В отсутствие неоднородности на выходе регистрирующего сейсмического датчика, помещенного на ненарушенный грунт, наблюдается слабый сигнал практически не меняющий свою величину при изменении частоты акустического источника. Наличие вырытой ямки и вскопанного грунта приводит к появлению ярко выраженных резонансных кривых, соответствующих колебаниям массы измельченного грунта и неоднородности. Так кривая 3 имеет два хорошо наблюдаемых резонанса, а для кривой 2 оба резонанса практически совпадают. Такое поведение спектральных кривых согласуется с приведенной выше физической моделью. Соотношение сигнал/шум изменяется при этом от 8 до 15 дБ, что позволяет уверенно обнаруживать неоднородность.

Для практической реализации мобильных подвижных систем обнаружения необходимо осуществлять бесконтактный съем колебаний с поверхности грунта. В настоящее время в литературе рассматриваются возможности такого съема с помощью доплеровских радио и оптических систем. Однако осуществление такого съема с подвижного носителя встречает целый ряд трудностей. В то же время возможна реализация контактного съема колебаний с подвижного носителя путем размещения вибрационного датчика на оси колеса.

При реализации контактного устройства необходимо решить задачи уменьшения вибрационного шума, создаваемого при вращении оси колеса, а также помехи, возникающей в процессе движения колеса по неровной поверхности. Экспериментальная апробация метода была проведена в лабораторных условиях при отсутствии неровностей грунта. Результаты эксперимента в виде текущей спектрограммы вибрационного сигнала приведены на рис. 3. Здесь по оси y отложены значения наблюдаемой частоты, а по оси x текущее время, яркость отражает амплитуду частотной составляющей.

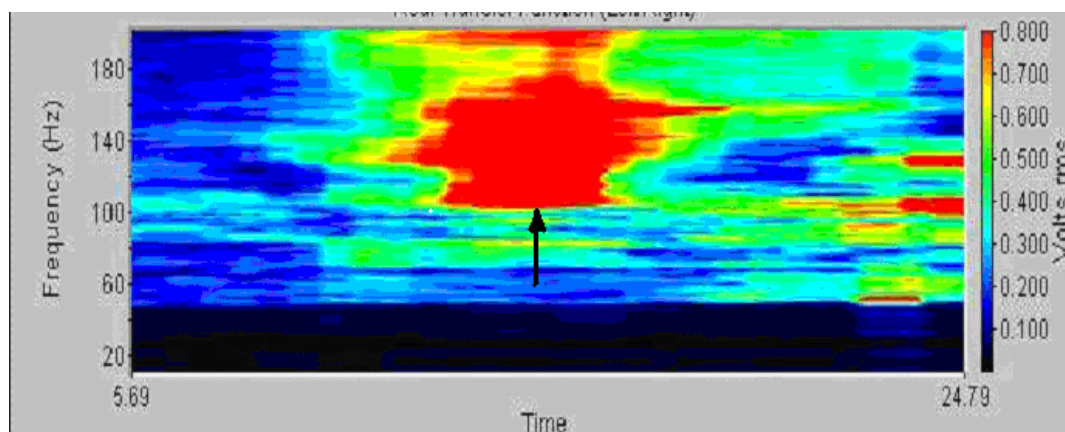


Рис. 3. Текущая спектрограмма нормированного сигнала, принятого датчиком на оси колеса при его движении

Колесо перемещается по поверхности грунта, одновременно с этим производится дистанционное озвучивание грунта акустическим излучателем, нормированный электрический сигнал с датчика в реальном масштабе времени обрабатывается компьютером. Истинное местоположение неоднородности указано стрелкой. Для определения перспективности этого направления необходимо дальнейшее продолжение исследований.

Возбуждение колебаний механической системы неоднородность-грунт можно осуществлять и сейсмической волной поверхностного типа. В этом случае источник сейсмического сигнала размещается на некотором удалении от приемника.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПОИСКА ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИОННОГО ИСТОЧНИКА

Как отмечалось, практически удобным способом возбуждения колебаний грунта с внедренной в него неоднородностью является постановка излучателя с перестраиваемой частотой на поверхности грунта. Принцип работы такого обнаружителя основан на том, что форма спектральной кривой колебаний вибратора зависит от механических свойств грунта и резонансных частот помещенной в грунте неоднородности [1]. На рис. 4 приведена структурная схема проведения испытаний по методу сейсмического источника, а на рис. 5 представлены характерные спектры

вибрационного сигнала, принимаемого на излучателе для различных условий возбуждения.

Особенностью схемы, представленной на рис. 4, является расположение приемного датчика 2 на вибрационном источнике 1. В этом случае влияние твердой среды, оказываемое на излучающие параметры источника, отражается приемником 2 в виде спектральных и амплитудных характеристик его колебаний.

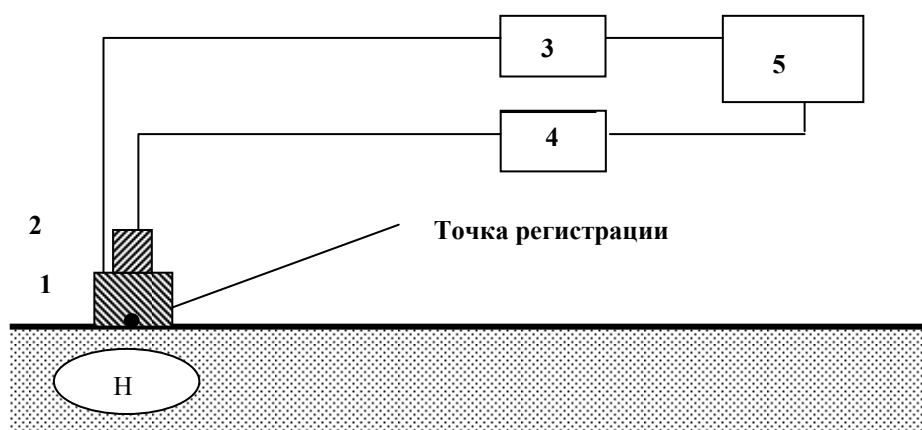


Рис. 4. Схема испытаний: 1 — виброисточник, 2 — приемник, 3 — задающий генератор и усилитель мощности, 4 — предварительный усилитель сигнала с приемника, 5 — персональный компьютер, Н — неоднородность

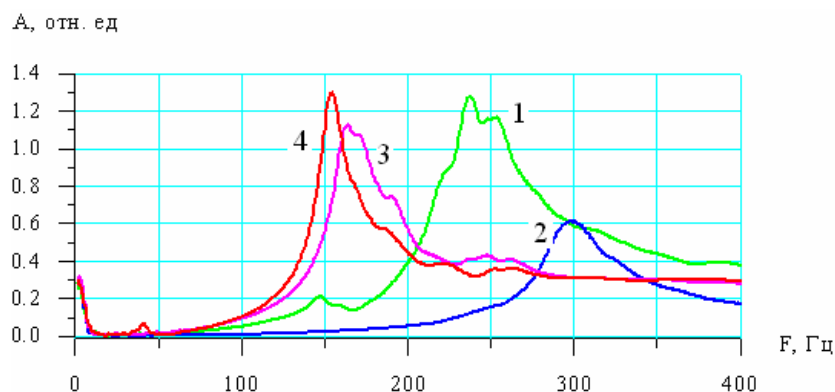


Рис. 5. АЧХ виброисточника СВ-10Ц для различных условий:
1 — на ненарушенном грунте, 2 — на дне выкопанной ямы, 3 — на присыпанной яме,
4 — на яме, в которую помещена неоднородность

Как следует из анализа кривых, приведенных на рис. 5, имеет место существенное изменение резонансных частот и добротностей колебаний в зависимости от свойств среды и локальной неоднородности. Анализ других экспериментальных данных показал, что влияние неоднородности или локального нарушения структуры грунта на

частотные характеристики колебаний вибратора быстро спадает с удалением от точки расположения объекта поиска и на расстояниях более чем 30 см становится несущественным.

Таким образом, показано, что сейсмические и акустические резонансные методы могут эффективно использоваться как для обнаружения, так и для классификации типа неоднородности. Следует отметить, что предложенный метод может быть использован как самостоятельно, так и как вспомогательный при других методах обнаружения неоднородностей — индуктивных, электромагнитных и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батанов А. Ф., Бубнов Е. Я., Гушин В. В., Миннегулов А. К., Рубцов С. Н. Патент РФ №2275657, 2006 г. Способ обнаружения и распознавания неоднородностей в поверхностном слое грунта (варианты) и виброшуп для его реализации.
2. В. А. Бабешко, А. Л. Собисевич, С. Ю. Шошина. Исследование условий возникновения резонансов на неоднородностях в неограниченной среде // Докл. РАН, 1994, т. 335, №6, с. 716–718.
3. А. А. Ляпин, М. Г. Селезнев, А. Л. Собисевич. Локальное резонирование среды в окрестностях полостей в слоистом пространстве. // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики. Вып. 2. М.: ОИФЗ РАН. ГНИЦ ПГК Минобразования России, 1996, с. 313–329.
4. В. В. Гушин, Л. Е. Собисевич, В. В. Чернов. Устройство поиска повреждений в сплошных средах Авторское свидетельство №1280521, 1984.
5. Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды // Физика Земли, 1967, №2, с. 23–31.