

**Федин Константин Владимирович**  
младший научный сотрудник,  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3  
Тел. +7-913-799-09-09  
e-mail: [fedin.konstantin@gmail.com](mailto:fedin.konstantin@gmail.com),  
[FedinKV@ipgg.sbras.ru](mailto:FedinKV@ipgg.sbras.ru)

**Fedin Konstantin Vladimirovich**  
The Institute of Petroleum Geology and Geophysics.  
AA Trofimuk SB RAS, Junior Researcher  
630090, Novosibirsk,  
Academician Koptyug avenue, 3, Russia.  
Tel. +7-913-799-09-09  
e-mail: [fedin.konstantin@gmail.com](mailto:fedin.konstantin@gmail.com),  
[FedinKV@ipgg.sbras.ru](mailto:FedinKV@ipgg.sbras.ru)

## РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА (ВЧР) ПО ДАННЫМ ФИЗИЧЕСКОГО МО- ДЕЛИРОВАНИЯ

## RESONANCE PROPERTIES OF THE UPPER PART OF THE SECTION ACCORDING TO DATA OF PHYSICAL MODELING

### *Аннотация:*

На данных трехмерного физического моделирования исследуются возможности определения резонансных свойств верхней части разреза (ВЧР) по записям микросейсм. Для получения и обработки экспериментальных данных применялась лабораторная модификация развиваемой в последние годы методики выделения стоячих волн из микросейсмического поля, регистрируемого на плотной системе наблюдений с использованием малоканальной аппаратуры. Экспериментально исследовались несколько типов ВЧР с пониженной скоростью (слой постоянной мощности, слой над границей блоков, выклинивающийся слой, сферическая линза). Показано, что рассматриваемая методика позволяет по зарегистрированным на поверхности ВЧР микросейсмам исследовать распределение частот и амплитуд отдельных мод стоячих волн на участке, где проводятся измерения.

*Ключевые слова:* стоячие волны, физическое моделирование, верхняя часть разреза

### *Abstract:*

On the data of three-dimensional physical modeling the possibilities of determining the resonance properties of the upper part of the section (UPS) according to the records of microseisms are investigated. For obtaining and processing the experimental data the laboratory modification of the procedure of selection standing waves from microseismic field recorded on a dense system of observations using thin-route equipment was applied, the procedure being developed in recent years. Experimentally several types of the section's upper part were studied at a reduced speed (constant power layer, the layer above the boundary blocks, thinning layer spherical lens). It is shown that the technique under view allows to study the distribution of frequencies and amplitudes of the individual modes of standing waves in the area where the measurements are being performed according to the microseisms registered on the surface of the upper part of the section.

*Key words:* standing waves, physical modeling, the upper part of the section

Один из способов повышения точности сейсмического микрорайонирования с использованием записей микросейсм реализован в методике, описанной в работах [1, 2]. В отличие от большинства других методов, базирующихся на предположении о том, что в микросейсмах преобладают колебания, связанные с поверхностными волнами, данная методика основана на выделении из микросейсмического поля его когерентных составляющих – формирующихся в ВЧР стоячих волн. Авторы [1, 2] показали, что детальный анализ стоячих волн, выделенных из микросейсмического поля, позволяет определять резонансные характеристики разреза с контролируемой точностью.

Однако очевидно, что без опробования на объектах с известными строением и свойствами ВЧР, подтверждающего достоверность получаемых результатов, правомерность применения такой методики не может считаться в достаточной мере обоснованной. В данной работе представлены результаты тестирования методики [1, 2] на данных физического моделирования для нескольких моделей с контролируемым строением и свойствами ВЧР.

Методика проведения экспериментов, как и процедура обработки экспериментальных данных, отличалась от методики, применявшейся для сейсмического микрорайонирования реальной территории [1, 2], только тем, что измерения проводились в ультразвуковом диапазоне частот на масштабных моделях ВЧР. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

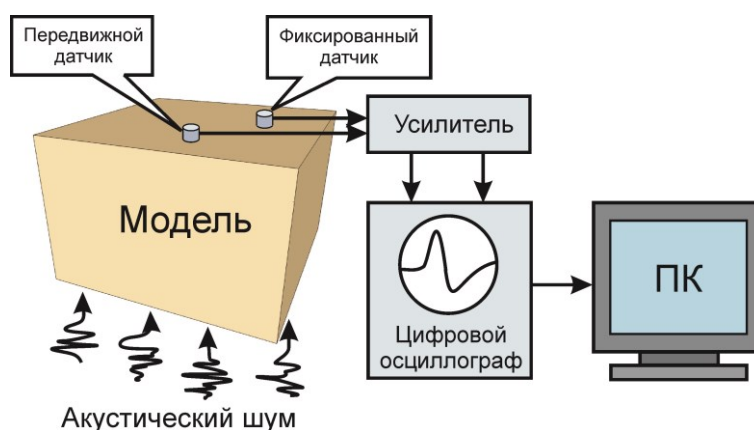


Рис. 1 – Схема экспериментов

Регистрация шумовых сигналов производилась на верхних поверхностях моделей двумя широкополосными датчиками поршневого типа, изготовленными на основе дисков из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм. Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы перпендикулярно поверхностям, на которых проводились измерения, поэтому регистрировались преимущественно вертикальные колебания.

Как и в методике сейсмического микрорайонирования [1, 2], один датчик использовался как опорный – в экспериментах с каждой моделью он крепился неподвижно в одной из точек на ее верхней поверхности и его положение в течение всего эксперимента не менялось. Второй датчик в ходе экспериментов последовательно устанавливался также на верхней поверхности модели в узлах квадратной сетки размерностью  $23 \times 23$ . Шаг сетки составлял 1 см. После установки передвижного датчика в каждой точке системы наблюдений производилась синхронная запись шумовых сигналов от обоих датчиков – после предварительного усиления они регистрировались двухканальным цифровым осциллографом В-423 и записывались на жесткий диск персонального компьютера (ПК) для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении передвижного датчика составляла примерно 2 с при частоте дискретизации 1 МГц.

Применение одного или нескольких датчиков в качестве опорных позволяет использовать разновременные данные, полученные с помощью малоканальной (в нашем случае двухканальной) аппаратуры для имитации одновременных наблюдений в большом числе точек. Алгоритм пересчета данных к «единому» времени, программная реализация которого использовалась при обработке данных физического моделирования, описан в [1, 2]. Этот алгоритм позволяет по шумовым данным, полученным при разновременных наблюдениях в разных точках исследуемого объекта, и дополнительным данным, синхронно записанным в одной или нескольких неподвижных опорных точках, эффективно выделять когерентные колебания, связанные со стоячими волнами, на фоне некогерентного шума.

Эксперименты проводились на объемных физических моделях, изготовленных из трех видов бетона, для приготовления которых использовался речной песок с размерами частиц до 2 мм и цемент марки М400 в разных весовых соотношениях. Состав использованных при изготовлении моделей цементных смесей и измеренные в модельных материалах скорости продольных волн  $V_p$  и плотности  $\rho$  приведены в таблице.

### Значение продольных скоростей бетона различных составов

№ бетона	Песок/цемент	$V_p$ , м/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
1	4:1	1350	1.48
2	2:1	2760	1.94
3	1:1	4450	2.27

Модели имели форму, как правило, близкую к прямоугольным параллелепипедам. Схематическое изображение исследованных моделей показано на рис. 2.

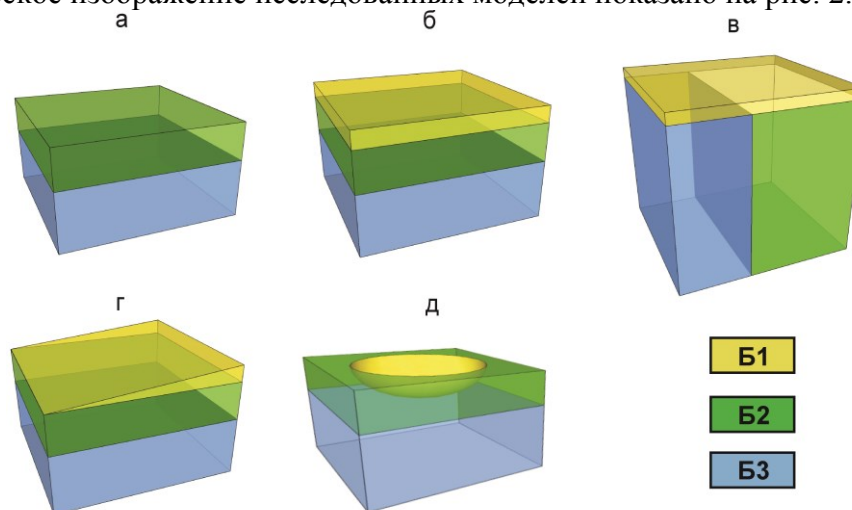


Рис. 2 – Геометрия моделей: *а* – двухслойная и *б* – трехслойная среды; *в* – слой над вертикальной границей блоков; *г* – выклинивающийся приповерхностный слой; *д* – линза над слоями. 1 – 3 – номера бетонов (см. таблицу)

Накопление по времени амплитудных спектров исходных двухсекундных шумовых записей, разбитых на участки по 4096 отсчетов, и их осреднение по всем точкам наблюдения для каждой из этих моделей показало, что на суммарных спектрах появляются резонансные пики именно на частотах, кратных 18,4 и 27 кГц. В то же время на спектре для трехслойной модели заметных пиков, связанных с резонансами в среднем слое, не наблюдается, хотя эта модель была изготовлена из двухслойной модели путем добавления к ней сверху еще одного слоя. Также ни для одной, ни для другой модели в спектрах нет явных пиков, связанных с резонансами в нижнем слое (при его толщине 8 см и скорости  $V_p = 4450$  м/с частоты этих пиков должны быть кратны 27,8 кГц). Это свидетельствует о том, что из всевозможных резонансов, возникающих в геологической среде, наиболее сильно на дневной поверхности должны проявляться резонансные явления в ВЧР.

При сейсмическом микрорайонировании, в том числе и с использованием микросейсм, обычно определяется усиление колебаний в разных местах исследуемого участка относительно колебаний на поверхности некоторого эталонного грунта. Так как поле микросейсм в общем случае имеет нестационарный характер, методы сейсмического микрорайонирования, основанные на его разновременных измерениях малоканальной аппаратурой, могут приводить к большим погрешностям. Методика [1, 2], в которой, как отмечалось выше, реализован пересчет разновременных данных к «единому» времени с использованием синхронных записей в опорных точках, позволяет существенно повысить точность микрорайонирования по микросейсам без проведения дорогостоящих многоканальных синхронных измерений.

Это и показали результаты, полученные на первых двух моделях (рис. 2, а, б) для распределения амплитуд низшей моды стоячих волн по площади наблюдений для двухслойной и трехслойной модели сред до и после пересчета к «единому» времени. Точность определения амплитуд после пересчета возрастает в 5 – 10 раз. Результаты для двухслойной среды приведены на рис. 3.

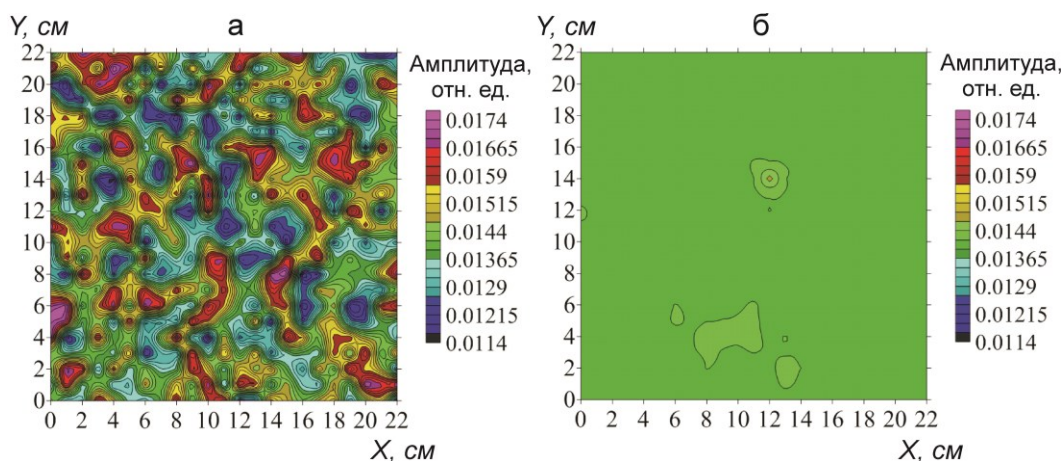


Рис. 3 – Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели двухслойной среды до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени

Результаты, полученные для трехслойной среды, получились аналогичными, поэтому их здесь не приводим.

Результаты, полученные для еще одной модели слоя постоянной мощности (рис.2, в), залегающего над вертикальной границей двух блоков из разных материалов, показывают влияние подстилающей среды на резонансные свойства приповерхностного слоя. Частота низшей моды стоячих волн на всей площади наблюдений в этом случае была порядка 10,4 кГц (рис. 4).

В то же время амплитуда низшей моды над блоком из бетона-2 на 30 – 40% выше, чем над более жестким блоком из бетона-3, примерно такая же закономерность наблюдается и для мод более высоких порядков.

Рис. 4 также иллюстрирует, как свойства подстилающей среды влияют на амплитуды резонансов в приповерхностном слое. Как видно из рисунка, амплитуда низшей моды над блоком из бетона Б2 примерно на 10 % ниже, чем над более жестким блоком из бетона Б3. Похожая закономерность наблюдается и для мод более высоких порядков. Эти результаты хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования, проведенного для данной модели (рис. 5), что говорит о высокой эффективности исследуемого метода определения резонансных свойств верхней части разреза по шумовому полю.

Более сложный тип ВЧР с изменяющейся по латерали мощностью в наших экспериментах моделировался равномерно выклинивающимся слоем, лежащим над двумя более высокоскоростными горизонтальными слоями постоянной мощности (рис. 2, г). В отличие от однородных слоев, резонансные свойства выклинивающегося слоев должны меняться от точки к точке с изменением их мощности (в направлении выклинивания) и быть неизменными для каждой поперечной выклиниванию линии (рис. б).

Это подтверждают экспериментальные данные, полученные нами для выклинивающегося слоя. Распределение частот низшей моды стоячих волн на верхней грани модели показало, что в направлении выклинивания слоя возрастание частоты имеет гиперболический характер, в то время как перпендикулярно этому направлению изменение частоты практически не наблюдается.

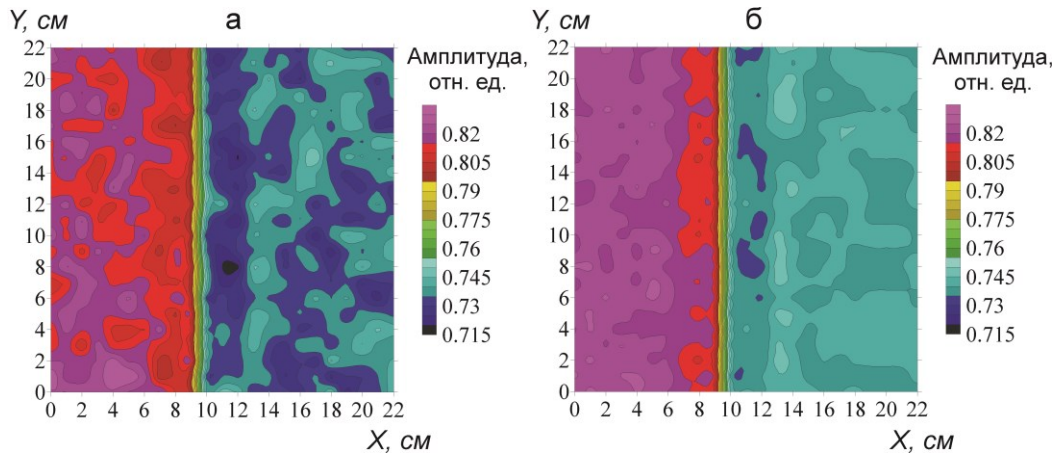


Рис. 4 – Распределение амплитуд низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над вертикальной границей блоков до (а) и после (б) пересчета разновременных данных к «единому» времени. Вертикальная граница в подстилающей среде соответствует  $X=9,5$  см, зона повышенных амплитуд слева от границы находится над более жестким бетоном БЗ

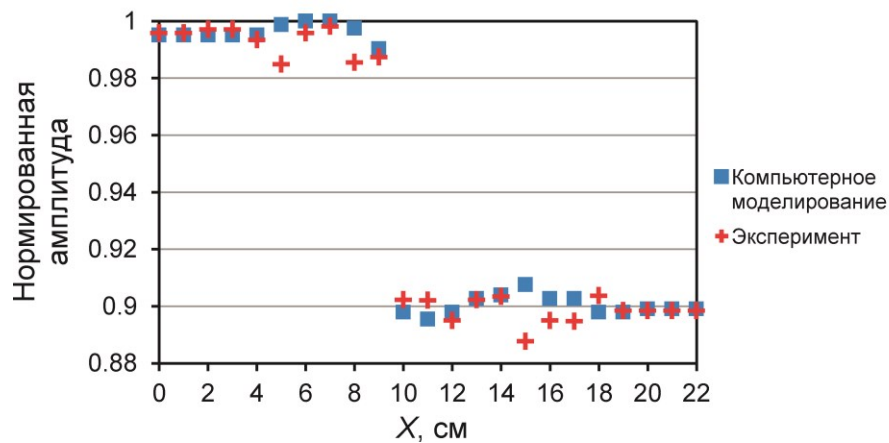


Рис. 5 – Амплитуды низшей моды стоячих волн на верхней грани модели слоя над границей блоков, полученные для линии  $Y=11$  см экспериментально и при компьютерном моделировании

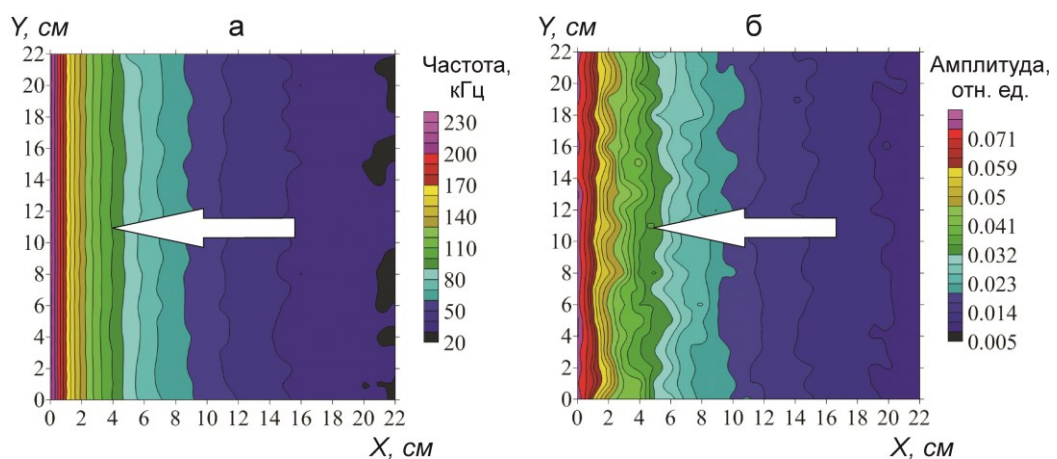


Рис. 6 – Распределение частот (а) и амплитуд (б) низшей моды стоячих волн на верхней грани модели выклинивающегося слоя. Стрелками показано направление выклинивания

Модель (рис. 2, д) имитировала линзовидную впадину, заполненную осадками с пониженными сейсмическими скоростями. Распределение частот и амплитуд низшей моды стоячих волн модели (рис. 2, д) показано на рис. 7.

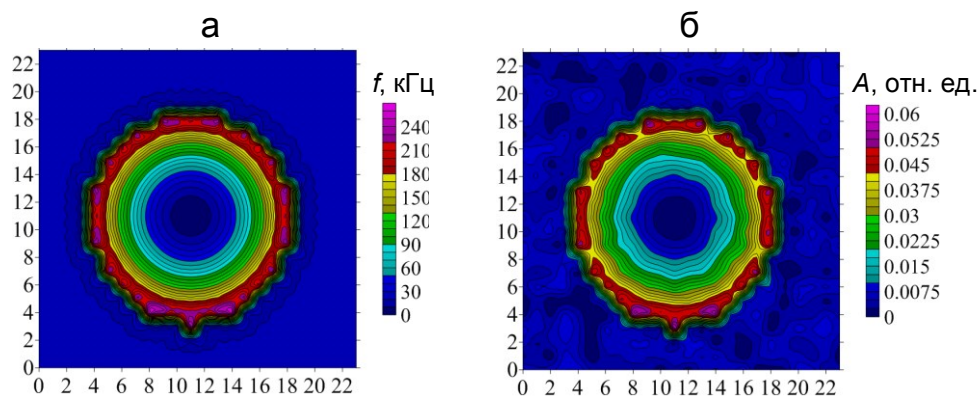


Рис. 7 – Распределение частот (а) и амплитуд (б) низшей моды стоячих волн на верхней грани модели линзы над слоями (рис. 2, д)

Как видно из рис. 6, для модели линзы над горизонтальными слоями (рис. 2, д) изолинии как частот, так и амплитуд низшей моды стоячих волн на ее верхней грани в основном имеют форму, близкую к концентрическим окружностям. При этом, как и в случае выклинивающегося слоя, увеличение частот и амплитуд, относительно плавное в центральной части линзы, происходит с резко возрастающим градиентом при уменьшении мощности линзы от ее центра к краям.

#### Заключение

В работах на результатах физического моделирования иллюстрируется возможность выделения стоячих волн из шумового поля в килогерцовом диапазоне частот. Эффективным инструментом для такого выделения может служить методика, разработанная в АСФ ГС СО РАН для обследования зданий и сооружений стоячими волнами, допускающая проведение несинхронных измерений на плотной сети наблюдений малоканальной аппаратурой с последующим приведением разновременных данных к единому времени. Экспериментальные результаты показали, что данная методика может с успехом применяться и для обследования относительно небольших объектов, например, различных конструктивных элементов сооружений, таких как балки или трубопроводные системы.

Физические данные хорошо согласуются с данными компьютерного моделирования, что говорит о правильности экспериментов.

По результатам трехмерного физического моделирования исследованы возможности определения резонансных свойств верхней части разреза по записям микросейсм. Показано, что реализованный в данной методике пересчет разновременных данных к «единому» времени позволяет в значительной мере нивелировать искажения, связанные с нестационарным характером микросейсмического поля. Экспериментально исследованы модели ВЧР нескольких видов: двухслойная и трехслойная среды. Показано, что рассматриваемая методика позволяет по зарегистрированным на поверхности ВЧР микросейсам исследовать распределение частот и амплитуд отдельных мод стоячих волн на участке, где проводятся измерения. Карты спектральных амплитуд, построенные для фиксированных частот, могут быть использованы для выделения участков с повышенными для данных частот резонансными свойствами.

#### Литература

1. Еманов А.Ф. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании / А.Ф. Еманов и др. // Геология и геофизика. - 2002. - Т. 43. - № 2. - С. 192–207.
2. Еманов А.Ф. Резонансные свойства верхней части разреза / А.Ф. Еманов и др. // Физическая мезомеханика. - 2008. - Т. 11. - № 1. - С. 26–36.