

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН В ЦЕЛИКАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ДАННЫМ ПАССИВНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ (ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

*Юрий Иванович Колесников*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, тел. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

*Константин Владимирович Федин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики, тел. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты физического моделирования, проведенного с целью оценки возможности выявления ослабленных зон в целиках горных выработок по записям сейсмоакустического шума. Показано, что накопление амплитудных спектров последовательных участков шумовых записей позволяет выделить из шума стоячие волны, по частотам и амплитудам которых можно локализовать ослабленные зоны, если скорости упругих волн в них и в целике различаются.

**Ключевые слова:** целики горных выработок, ослабленные зоны, сейсмоакустический шум, стоячие волны, физическое моделирование.

## **DETECTION OF WEAKENED ZONES IN THE MINE WORKING PILLARS USING PASSIVE SEISMO-ACOUSTIC MEASUREMENTS (PHYSICAL MODELLING)**

*Yury I. Kolesnikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, Doctor of Science, Principal Research Scientist, Associate Professor, tel. (383)333-31-38, e-mail: KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

*Konstantin V. Fedin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptug Prospect 3, PhD, Research Scientist, tel. (383)333-34-19, e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

We present the results of physical modelling, carried out to estimate the ability of detecting weakened zones in the mine working pillars using seismo-acoustic noise. It is shown, that accumulation of amplitude spectra of successive areas of noise records allow to extract the standing waves from a noise field. Their frequencies and amplitudes can be used for locating weakened zones, if elastic velocities in these zones and in the pillar are different.

**Key words:** mine working pillars, weakened zones, seismo-acoustic noise, standing waves, physical modeling.

При проведении подземных горных работ в выработанных пространствах часто оставляют целики – нетронутые участки рудного тела, пласта или вмещающих горных пород. Целики могут иметь различное назначение, но в боль-

шинстве случаев они предназначены для предотвращения разрушения окружающих горных пород. Потеря несущей способности целика может привести к разрушению других целиков на соседних участках, что в лучшем случае осложнит проведение дальнейших горных работ, а в худшем – может иметь катастрофические последствия. Этим обстоятельством обусловлена необходимость разработки эффективных методов контроля состояния целиков.

В настоящее время для такого контроля используют как прямые методы измерения деформаций, перемещений, напряжений и др., так и косвенные геофизические методы в разных модификациях. Из последней группы наиболее часто применяют сейсмические и сейсмоакустические методы, причем как активные (с использованием искусственных источников упругих волн), так и пассивные.

Активными сейсмическими и сейсмоакустическими методами оценивают упругие свойства горных пород, которые отражают, в частности, изменение их трещиноватости, флюидонасыщенности, напряженно-деформированного состояния и т. д. Пассивные методы (регистрация сейсмоакустической эмиссии, микросейсмичности и др.) применяются для изучения активности горных пород, связанной с их прочностными свойствами и напряженно-деформированным состоянием. В работе представлены результаты трехмерного физического моделирования, демонстрирующие возможность оценки состояния целиков в горных выработках по данным пассивных сейсмоакустических измерений.

Предлагаемый метод выявления ослабленных зон в целиках основан на предположении, что в пространстве между боковыми поверхностями целика под действием сейсмоакустических шумов должны формироваться стоячие волны, которые можно выделить из шумового поля при его обработке. Подобный метод описан в работе [1], где моделировались стоячие волны, генерируемые шумами над приповерхностными пустотами. В случае возникновения стоячих волн в целике горной выработки на его свободных боковых поверхностях должны наблюдаться пучности колебаний, а между ними чередоваться узлы и пучности, подобно стоячим волнам в незакрепленном стержне [2]. При этом между границами целика должно укладываться целое число полудлин упругих волн.

Учитывая известную корреляционную связь прочности при сжатии горных пород со скоростью прохождения в них продольных волн [3], естественно предположить, что при неизменной толщине целика снижение скорости упругих волн в его ослабленных зонах должно приводить к соответствующему понижению частот стоячих волн в этих местах. Следовательно, выделяя стоячие волны из шумового поля, по их частотам можно оценивать неоднородность породного массива, а по понижению частот при повторных измерениях выявлять потенциально опасные ослабленные зоны целика.

В лабораторных экспериментах моделировались две параллельные выработки, разделенные ленточным целиком (рис. 1). Модель с внешними размерами  $30 \times 30 \times 30$  см<sup>3</sup> была изготовлена из бетона на основе смеси цемента и речного песка в пропорции 1:1. Толщина целика составляла 10 см, высота «выработка» также 10 см. В центральной части целика (начиная с 9 см от торца модели)

на всю его высоту и толщину было оставлено сквозное отверстие прямоугольного сечения длиной 11 см, которое в трех экспериментах заполнялось разными материалами, имитирующими ослабленную зону целика. Материалы и измеренные импульсным методом скорости продольных волн  $V_p$  в целике и трех «ослабленных» зонах приведены в таблице.

Сейсмоакустический шум моделировался с помощью установленных на торцах модели двух громкоговорителей, на которые с двухканального аудио-

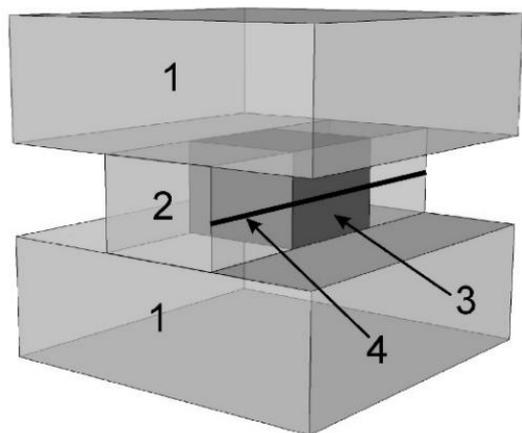


Рис. 1. Структурная схема модели:

- 1 – вмещающая среда, 2 – целик,
- 3 – «ослабленная» зона в целике,
- 4 – профиль наблюдений

выхода компьютера подавались генерируемые программой Audacity (<http://audacity.sourceforge.net/>) в режиме белого шума независимые электрические сигналы. Для регистрации шумовых сигналов использовался широкополосный пьезокерамический датчик поршневого типа диаметром 2 мм. Регистрация проводилась с шагом 1 см на продольном линейном профиле длиной 29 см в средней части одной из боковых поверхностей целика (см. рис. 1). Ось максимальной чувствительности датчика была ориентирована по нормали к поверхности наблюдений, поэтому регистрировались преимущественно колебания типа сжатия-растяжения.

Сигналы от датчика, оцифрованные с частотой дискретизации 1 МГц, с помощью цифрового осциллографа В-423 записывались на жесткий диск компьютера для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении датчика составляла примерно 2 с.

Таблица

Материалы целика и «ослабленных» зон, скорости  $V_p$  и частоты  $f_i$  трех низших мод стоячих волн в них

	Материал	$V_p$ , м/с	$f_1$ , кГц	$f_2$ , кГц	$f_3$ , кГц
Целик	Бетон (песок/цемент 1:1)	4450	22.5	45.1	67.5
Зона 1	Бетон (песок/цемент 2:1)	2760	14.0	28.1	42.1
Зона 2	Бетон (песок/цемент 4:1)	1350	7.1	14.1	21.3
Зона 3	Высушенная глина	1220	6.3	12.6	18.8

Для выделения стоячих волн из шумового поля, как и в работе [1], проводилось накопление амплитудных спектров последовательных участков шумовых записей длительностью 8192 отсчета каждый. Примеры накопления 240 спектров в «ненарушенном» целике и трех «ослабленных» зонах приведены на рис. 2. Как можно видеть, на всех спектрах после накопления уверенно выделяются три резких пика, соответствующих трем низшим модам стоячих волн

сжатия-растяжения. В том, что это именно стоячие волны сжатия-растяжения, можно легко убедиться, сравнив полудлины волн, соответствующие частотам пиков, с толщиной целика.

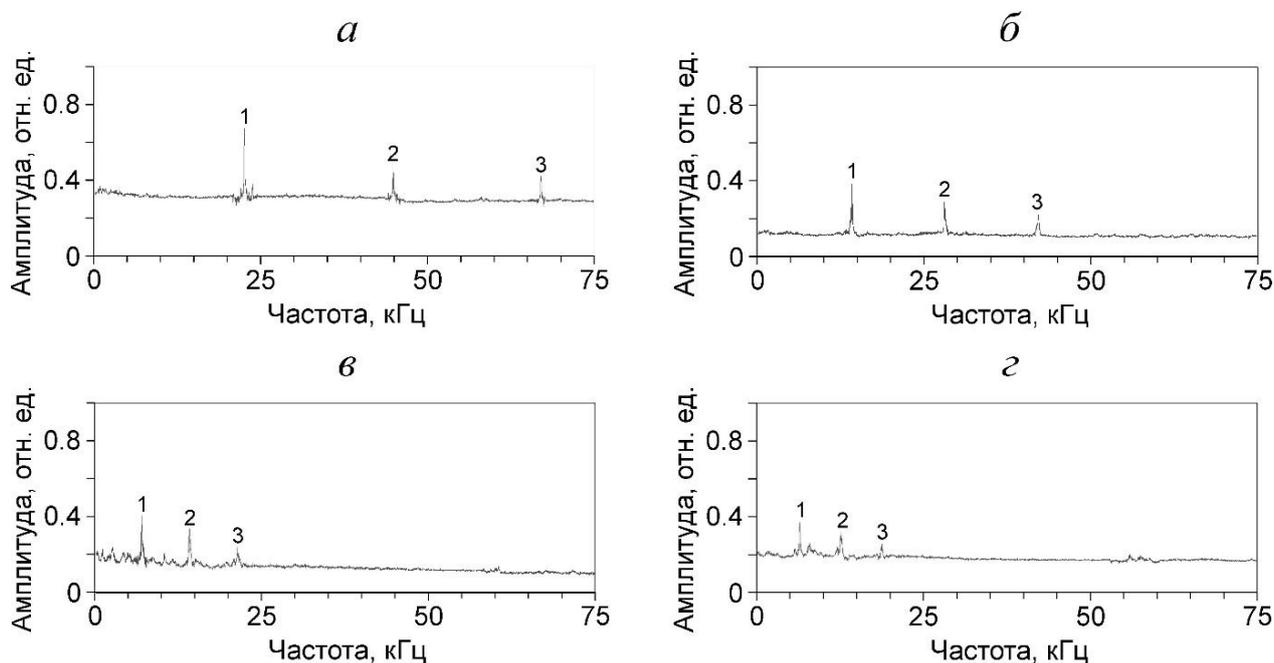


Рис. 2. Результаты накопления амплитудных спектров шумовых сигналов, зарегистрированных на боковых поверхностях «ненарушенного» целика (а) и «ослабленных» зон (см. табл. 1): зоны 1 (б), зоны 2 (в) и зоны 3 (г). Цифрами обозначены номера мод стоячих волн сжатия-растяжения

Например, для «ненарушенного» целика при скорости продольных волн в нем 4450 м/с частоте первой моды (см. табл. 1) соответствует определяемая формулой  $\lambda_1/2 = V_p/2f_1$  полудлина волны 9.9 см, что примерно равно толщине целика, частоте второй моды – полудлина 4.9 см (примерно половина толщины), частоте третьей моды – полудлина 3.3 см (примерно треть толщины). Аналогичные результаты дает и анализ стоячих волн в «ослабленных» зонах.

Наконец, на рис. 3 представлены графики изменения частоты и амплитуды низшей (первой) моды стоячих волн вдоль профиля наблюдений для трех моделей «ослабленных» зон. Как можно видеть, такое профилирование вдоль целика позволяет уверенно выделять в нем «ослабленные» зоны по графикам как частот, так и амплитуд стоячих волн. Тем не менее предпочтительнее, особенно при небольшом контрасте упругих свойств целика и ослабленной зоны, использовать в качестве информативного параметра не амплитуды, а частоты стоячих волн, так как они намного меньше зависят от параметров используемой аппаратуры и спектральных характеристик сейсмоакустического шума.

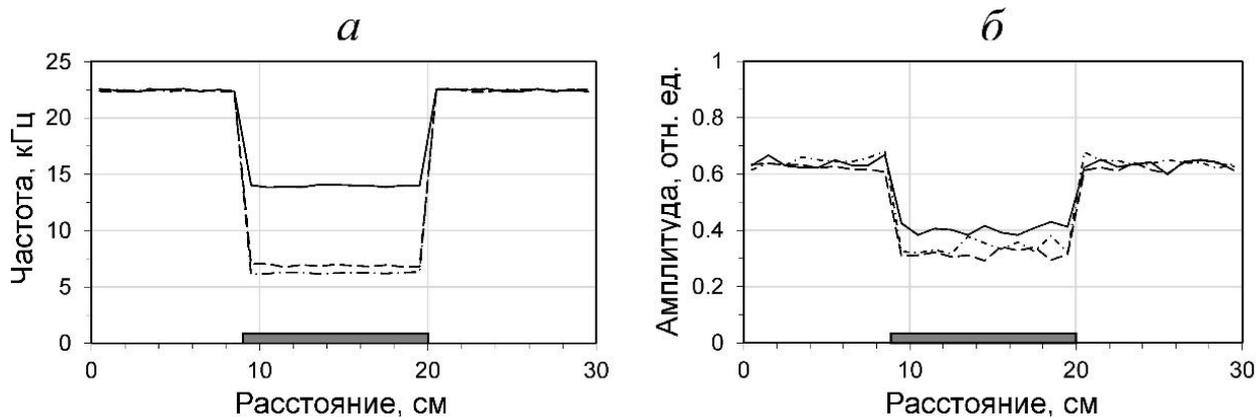


Рис. 3. Распределение частот и амплитуд нижней моды стоячих волн вдоль линии профиля для моделей (см. табл. 1): с зоной 1 (сплошная линия), с зоной 2 (пунктир) и с зоной 3 (штрихпунктир). Положение зон на профиле показано жирной линией над горизонтальной осью

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. - 2015. - № 4. - С. 89-96.
2. Лепендин Л.Ф. Акустика. - М.: Высшая школа, 1978. - 448 с.
3. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / под ред. Н.Б. Дортман. - М.: Недра, 1992. - 391 с.

© Ю. И. Колесников, К. В. Федин, 2016