

УДК 622.611.4:620179.16

А.А. Закиров, В.Н. Иньков, Е.Б. Черепецкая
АЛГОРИТМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ
ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ОПТИКО-
АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлен алгоритм для построения изображения внутренней структуры образцов горных пород на основе изучения процесса распространения термооптически возбужденного импульса в слоистой среде.

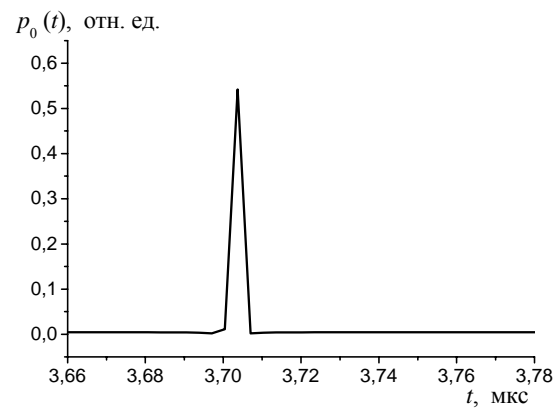
Ключевые слова: слоистая среда, горные породы, коэффициент отражения, фильтрация сигнала.

Исследование влияния факторов выветривания на свойства и структуру горных пород на сегодняшний день является актуальной задачей. Для решения этой задачи в работах [1, 2, 3] было предложено оценивать степень нарушенности горных пород по уровню акустического «структурного» шума.

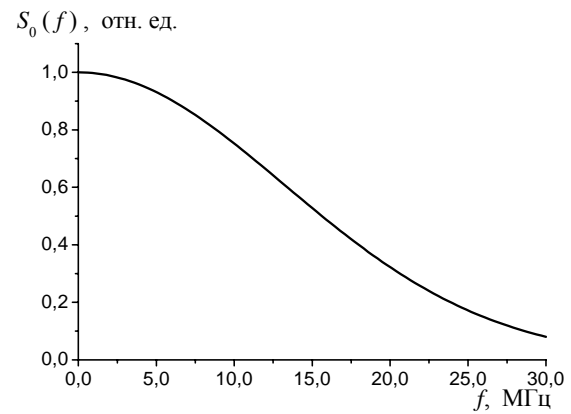
В настоящей работе представлен алгоритм для построения изображения внутренней структуры образцов горных пород на основе изучения процесса распространения термооптически возбужденного импульса в слоистой среде. С использованием данного алгоритма по измеренным акустическим трекам в режиме эхо-скопии построены изображения внутренней структуры образцов пироксенов Ковдорского ГОКа, подвергнутых полному циклу воздействия факторов выветривания.

Пусть ультразвуковой импульс возбуждается лазером в оптико-акустическом генераторе (ОАГ), выполненном из полиэтилена высокого давления. Коэффициент поглощения света для данного полиэтилена равен 200 см^{-1} , а большое значение коэффициента объемного расширения позволяет получить достаточно мощный ультразвуковой импульс. Длительность такого импульса определяется в основном произведением коэффициента поглощения света на скорость распространения упругих волн в ОАГ и составляет 100 нс. Это значение соответствует пространственной протяженности сигнала 0,2 мм и, соответственно, такой же величине мертвой зоны.

Для последующих расчетов необходимо измерить его временную форму. Чтобы избежать возможных искажений при измерении, ОАГ жестко приклеивают к призме из плексигласа, акустический импеданс которого близок к акустическому импедансу полиэтилена высокого давления. В отсутствие разности акустических импедансов не возникает переотражения акустической волны от их границы, и на пьезодатчик через призму поступает оптоакустический сигнал, который в дальнейшем будем называть опорным. Характерная временная форма $p_0(t)$ этого сигнала и его амплитудный спектр $S_0(f)$, рассчитанные для ОАГ из полиэтилена высокого давления, изображены на рис.1.

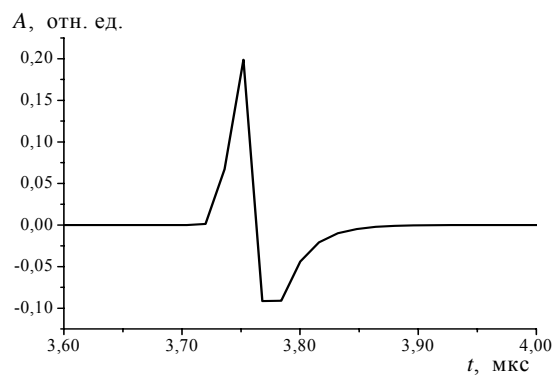


а)

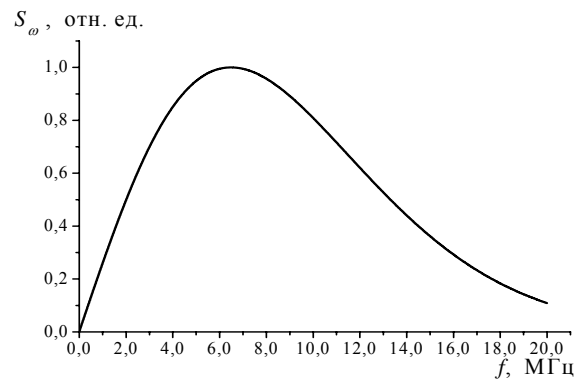


б)

Рис. 1. Временной профиль (а) и амплитудный спектр (б) опорного сигнала



а)



б)

Рис. 2. Временной профиль (а) и амплитудный спектр (б) опорного сигнала с учетом дифракции

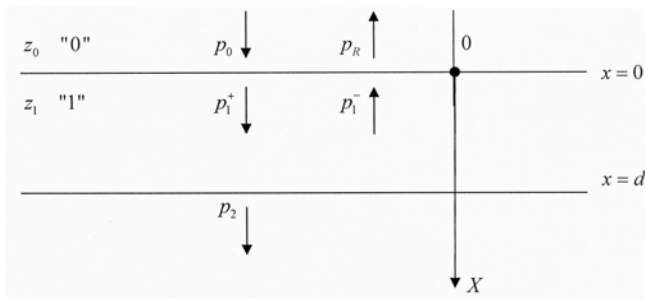


Рис.3. Модель слоистой среды для случая одного слоя

За счет дифракции в импульсе появляется фаза разрежения, при этом амплитуда фазы сжатия уменьшается. Также немного увеличивается длительность импульса [3]. Влияние дифракции сказывается и на амплитудном спектре опорного сигнала. Практически исчезают низкие частоты, и частотный диапазон становится уже (рис. 2).

Второй ультразвуковой импульс от ОАГ распространяется в глубь исследуемого образца. После многократных переотражений от неоднородностей он рассеивается назад и принимается пьезодатчиком. Форма его зависит от геометрии образца, а также от расположения акустических неоднородностей внутри него. При этом импульс, рассеянный назад, несет информацию о пространственном расположении неоднородностей внутри среды. Для расчета параметров среды с использованием слоистой модели необходимо получить коэффициент отражения среды, то есть величину, характеризующую только строение исследуемой среды и не зависящую от формы опорного сигнала. Воспользуемся тем фактом, что спектр отраженной волны равен произведению спектра опорного сигнала на коэффициент отражения среды

$$S_R(\omega) = R(\omega) \cdot S_0(\omega).$$

Рассчитаем коэффициент отражения сначала в случае одного слоя для каждой гармоники $S_0(\omega)$ опорного импульса в соответствии со схемой на рис.3.

Пусть $z_0 = \rho_0 c_0$ - акустический импеданс среды "0", $z_1 = \rho_1 c_1$ - среды "1". Тогда в среде "0" распространяются две волны: падающая и отраженная. Обозначим давление в падающей волне p_0 , а давление в отраженной волне - p_R . В среде "1" распространяются волны, давление в которых обозначим p_1^+ (для волны, распространяющейся от границы со средой "0") и p_1^- (для волны, распространяющейся к границе со средой "0"). В полупространстве с акустическим импедансом $z_2 = \rho_2 c_2$ существует только бегущая вдоль оси X волна с давлением p_2 . Давления в волнах, указанных выше, описываются выражениями:

$$p_0 + p_R = S_0(\omega) \cdot (e^{ik_0x} + R \cdot e^{-ik_0x}), \quad (1)$$

$$p_1 = p_1^+ + p_1^- = S_0(\omega) \cdot (A e^{ik_1x} + B e^{-ik_1x}), \quad (2)$$

$$p_2 = S_0(\omega) C e^{ik_2x}, \quad (3)$$

где $k_i = \frac{\omega}{c_i}$ - волновое число соответствующего слоя $i = 0, 1, 2$. При записи вы-
ражений (1)-(3) предполагалось, что за счет малой толщины слоя d (рис. 3)
затухание волн отсутствует.

С учетом граничных условий для Фурье-компонент, учитывающих непре-
рывность давлений и смещений на всех границах, решение системы уравнений
(1) – (3) для коэффициента отражения имеет вид:

$$R(\omega) = \frac{z_1 q_1 - z_0}{z_1 q_1 + z_0}, \quad (4)$$

где

$$q_1 = \frac{1 + (z_2 - z_1)(z_2 + z_1)^{-1} \cdot \exp(2i k_1 d)}{1 - (z_2 - z_1)(z_2 + z_1)^{-1} \cdot \exp(2i k_1 d)}.$$

Проведя аналогичные рассуждения для двух и более слоев, можно
получить рекуррентную формулу для вычисления коэффициента отраже-
ния для случая n слоев:

$$R(\omega) = \frac{z_1 q_j - z_0}{z_1 q_j + z_0}, \quad (5)$$

где

$$q_j = \frac{1 + (q_{j+1} z_{j+1} - z_j)(q_{j+1} z_{j+1} + z_j)^{-1} \exp(2i k_j d_j)}{1 - (q_{j+1} z_{j+1} - z_j)(q_{j+1} z_{j+1} + z_j)^{-1} \exp(2i k_j d_j)} \text{ для всех } j = 1, \dots, n-1, \quad (6)$$

$$q_j = \frac{1 + (z_{j+1} - z_j)(z_{j+1} + z_j)^{-1} \exp(2i k_j d_j)}{1 - (z_{j+1} - z_j)(z_{j+1} + z_j)^{-1} \exp(2i k_j d_j)} \text{ для } j = n. \quad (7)$$

Временной профиль оптико-акустического импульса, отраженного от внеш-
ней границы слоистой среды, задается выражением:

$$p_R \left(\tau = t + \frac{z}{c_0} \right) = \frac{\beta_0 I_0 c_0^2}{c_p} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\omega) K_D(\omega) S_0(\omega) \exp(i\omega\tau_0 + ikz) d\omega. \quad (8)$$

Численное моделирование было проведено для $n = 5$ слоев. Значения аку-
стических импедансов слоев (табл.1) соответствуют значениям импедансов
конкретных горных пород: гранита, мрамора, гранита, пироксена. Акустиче-
ский импеданс $z_0 = \rho_0 c_0$ нулевого слоя соответствует плексигласу. Толщина
слоев принималась равной 1,2 мм. Длительность лазерного импульса составля-
ла 100 нс.

Таблица 1

Номер слоя	0	1	2	3	4	5
Значение акустического им- педанса, $\times 10^6$, кг/м ² с	4	13	20	15	26	4

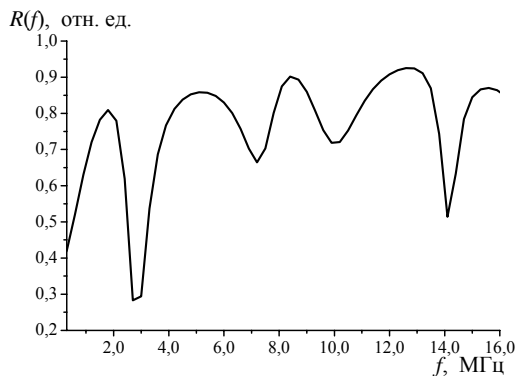


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения $R(f)$

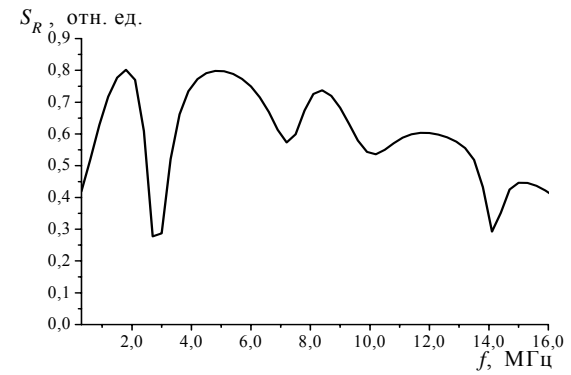
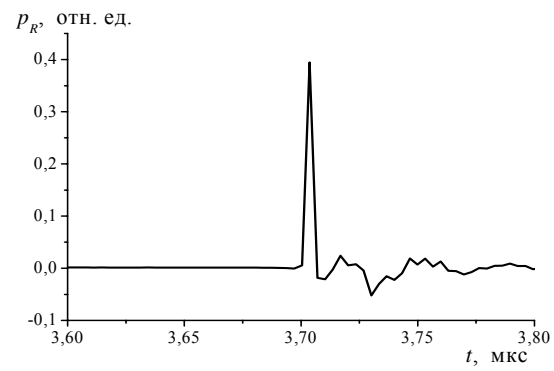
зывает, что такое изменение полярности происходит при отражении УЗ сигнала от границы со слоем, имеющим больший акустический импеданс (в рассматриваемом случае с первым и с четвертым слоями). Кроме того, длительность отраженного сигнала зависит от чередования слоев, точнее, от их комбинации. В слоях с большим значением акустического импеданса скорость распространения ультразвука меньше. Следовательно, длительность той части отраженного сигнала, которая соответствует таким слоям, больше.

Теперь становится ясен способ расчета коэффициента отражения. Для этого необходимо, во-первых, рассчитать спектры опорного и отраженного сигналов, иными словами взять от них дискретное прямое Фурье-преобразование. После этого следует поделить поточечно спектр отраженного сигнала на спектр опорного. К полученной величине остается только применить обратное преобразование Фурье. Однако в высокочастотной области спектры обоих сигналов (опорного и отраженного) принимают почти нулевые значения, соответственно, при делении одного спектра на другой в области больших частот неизбежно возникают ошибки. Более того, при измерениях уровень шумов начинает превышать амплитуды соответствующих гармоник полезных сигналов. Поэтому для обеспечения корректности описанной процедуры полученное отношение следует фильтровать от шумов. Форма частотного фильтра может быть выбрана различным образом, однако необходимо помнить, что домножение на фильтр вызывает некоторое изменение значения обратного преобразования Фурье и, соответственно, временного профиля акустического спектра.

В разработанной модели и в возбуждаемом упругом импульсе верхняя граница частотного диапазона составляла 30 МГц. Однако, как показали предварительные измерения, горные породы поглощают частоты выше 8 МГц. Прямоугольный фильтр позволяет полностью занулить сигнал, начиная с заданной частоты. Параметры прямоугольного фильтра: нижняя частота $\nu_{\min} = 1$ кГц, верхняя частота $\nu_{\max} = 8$ МГц. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) гауссовского фильтра имеет вид убывающей экспоненты, и при его применении не удастся корректно воспроизвести спектр полезного сигнала в достаточно широком частотном диапазоне.

На рис. 4 приведена частотная зависимость коэффициента отражения $R(f)$, на рис. 5 временной профиль $p_R(t)$ и амплитудный спектр $S_R(f)$ принятого сигнала (включающего опорный и отраженные от слоев импульсы).

На рис. 5, а видно, что имеет место двукратное изменение полярности отраженного ультразвукового (УЗ) сигнала. Анализ показывает,



а

б

Рис. 5. Временной профиль (а) и амплитудный спектр (б) отраженного от слоистой среды сигнала

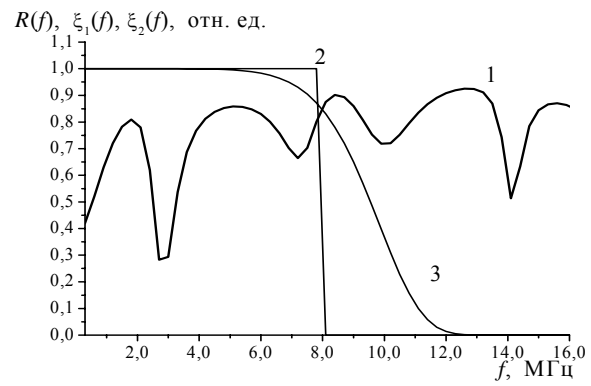
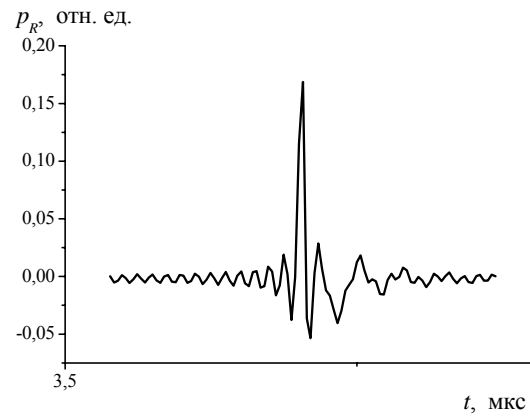
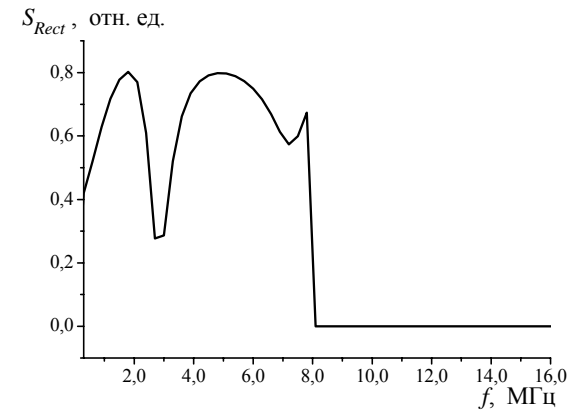


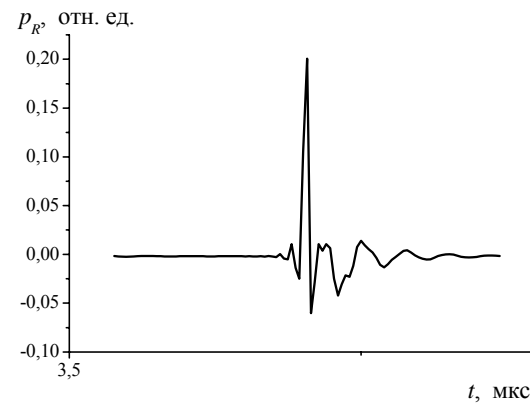
Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения $R(f)$ (1), спектры прямоугольного $\xi_1(f)$ (2) и «супергауссовского» $\xi_2(f)$ (3) фильтров



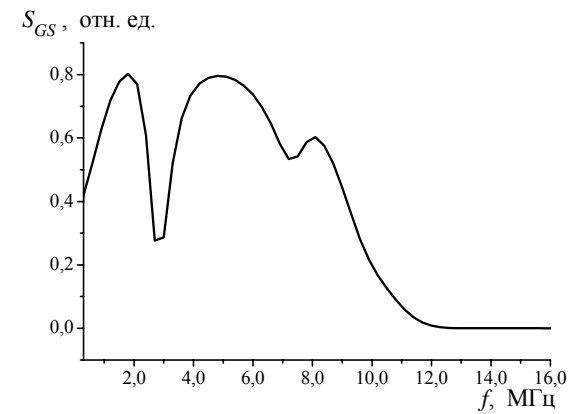
а



б



в

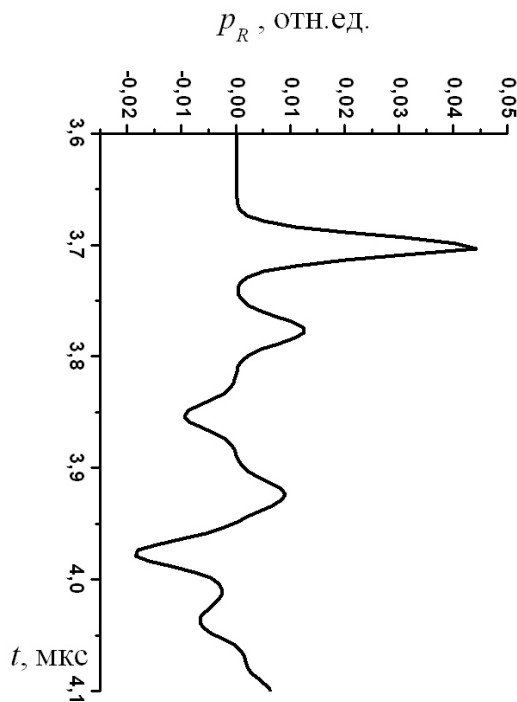


г

Рис. 7. Результаты фильтрации отраженного сигнала: временной профиль (а) и амплитудный спектр (б) отраженного сигнала после воздействия прямоугольного фильтра; временной профиль (в) и амплитудный спектр (г) отраженного сигнала после воздействия «супергауссовского» фильтра



А



Б

Рис. 8. Изображение модели слоистой среды (а) и временной профиль отраженного сигнала (б)

Таким образом, применение фильтра такого типа приводит к искажению отраженного сигнала. Этого недостатка лишен «супергауссовский» фильтр, который позволяет эффективно очищать сигнал от шума, оказывая при этом минимальное влияние на форму сигнала. Сравнивая временные

Поэтому для фильтрации отраженного сигнала применялся фильтр с АЧХ в виде двух экспонент с различными показателями степени, который в дальнейшем будем называть «супергауссовским» фильтром. Данный тип фильтра позволяет получить широкую полосу пропускания в начале частотного диапазона аналогично прямоугольному фильтру и резкое (экспоненциальное) затухание, начиная с заданной частоты, аналогично гауссовскому фильтру. Были выбраны следующие параметры «супергауссовского» фильтра:

$$\Phi(f) = e^{-(f/f_a)^2} - e^{-(f/f_b)^8},$$

$f_a = 1$ кГц, $f_b = 10$ МГц. На рис. 6 приведены в одном масштабе частотная зависимость коэффициента отражения (кривая 1), спектр прямоугольного (кривая 2) и спектр «супергауссовского» фильтра (кривая 3) для рассматриваемой комбинации слоев.

Временные профили и амплитудные спектры отраженного сигнала, подвергнутого фильтрации с использованием прямоугольного и «супергауссовского» фильтров приведены на рис. 7.

На рис. 7, а отчетливо видно, что в результате использования прямоугольного фильтра на низких частотах появляются осцилляции.

профили отраженного от слоистой среды и отфильтрованного сигналов (рис. 7, а, в), легко увидеть, что они одинаково передают информацию о слоях, поэтому «супергауссовский» фильтр оказался более предпочтительным для построения модели слоистой среды.

Далее, ставя в соответствие величине интенсивности отраженного сигнала (рис. 8, б) различные оттенки серого цвета (от белого – для максимальной интенсивности, до черного – при полном отсутствии сигнала), было построено изображение рассматриваемой модели слоистой среды (рис. 8, а). На рис. 8, б четко видны импульсы, отраженные от границ слоев. При этом полярность отраженного импульса определяется значениями импедансов слоев в соответствии с (6), (7).

Таким образом, разработанная модель позволяет строить изображение внутренней структуры неоднородных сред.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 08-05-00281-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкуратник В.Л., Колодина И.В. Расчет электроакустического тракта при оценке выветривания плит облицовочного камня ультразвуковым эхо-методом. ГИАБ, № 1, 2001, с.11-15.
2. Колодина И.В. Оценка степени выветривания горных пород на основе акустопляризационных измерений на образцах. ГИАБ, № 3, 2001, с. 39-42.
3. Закиров А.А., Иньков В.Н., Простяков Р.Г., Черепецкая Е.Б. Оценка степени выветривания горных пород по мощности структурных акустических шумов. ГИАБ, № 10, 2010, с.
4. Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. – 198с.: ил.

ГИАБ

Коротко об авторах

Закиров А.А. – старший преподаватель кафедры математики,
 Иньков В.Н. – кандидат технических наук, доцент кафедры физики,
 Черепецкая Е.Б. – доктор технических наук, профессор кафедры ФТКП,
 Московский государственный горный университет,
 Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
ШТЕЙНЦАЙГ Михаил Романович	Обоснование высоты уступа при углубочно-сплошных системах разработки свит угольных пластов	25.00.21	к.т.н.

