

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

научный журнал

Основан в 1965 г.
Выходит 6 раз в год

Учредители:
Сибирское отделение РАН
Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН

Главный редактор

член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф. **В. Н. Опарин**

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н. **Л. А. Назаров**

Ответственный секретарь

д.т.н., проф. **В. М. Серяков**

Редакционная коллегия

Д.т.н., проф. А. А. Барях, академик, д.ф.-м.н., проф. И. В. Бычков, член-корр. РАН, д.т.н., проф. Г. И. Грицко, д.т.н., проф. С. Г. Емельянов, член-корр. РАН, д.т.н., проф. Д. Р. Каплунов, член-корр. РАН, д.т.н., проф. В. И. Клишин, д.т.н., проф. А. А. Козырев, д.т.н. С. А. Кондратьев, д.т.н., проф. С. В. Корнилов, д.т.н., проф. А. В. Корчак, академик, д.т.н., проф. М. В. Курленя, д.т.н., проф. В. П. Мазикин, академик, д.т.н., проф. Ю. Н. Малышев, академик, д.т.н., проф. Н. Н. Мельников, д.т.н., проф. В. Е. Миренков, д.т.н. А. А. Ордин, д.т.н. Н. А. Попов, д.т.н., проф. В. П. Потапов, член-корр. РАН, д.т.н., проф. Л. А. Пучков, д.т.н., проф. И. Ю. Рассказов, д.ф.-м.н., проф. А. Ф. Ревуженко, д.т.н. А. Г. Секисов, д.т.н. Б. Ф. Симонов, д.т.н., проф. Б. Н. Смоляницкий, д.т.н. А. П. Тапсиев, д.т.н. С. М. Ткач, академик, д.т.н., проф. К. Н. Трубецкой, д.т.н., проф. А. М. Фрейдин, академик, д.т.н., проф. В. А. Чантурия, д.ф.-м.н., проф. А. И. Чанышев, к.т.н. В. И. Ческидов, д.ф.-м.н. Е. Н. Шер, д.т.н., проф. В. Л. Шкуратник, член-корр. РАН, д.т.н., проф. В. Л. Яковлев, д.т.н., проф. Д. В. Яковлев

Международный редакционный совет

Д.т.н., проф. М. В. Айзенберг-Степаненко (Израиль), член-корр. НАН Украины, д.т.н., проф. А. В. Анциферов (Украина), академик НАН КР, д.т.н., проф. И. Т. Айтматов (Кыргызстан), д.ф.-м.н. А. А. Баймухаметов (Казахстан), проф. В. Буш (Германия), академик, проф. С. Вуйич (Сербия), проф. Р. Гангули (США), проф. О. Гювен (Турция), проф. П. Дауд (Австралия), проф. Р. Димитракопулос (Канада), проф. К. Дребенштедт (Германия), проф. Й. Дубинский (Польша), проф. А. Касали (Чили), проф. П. Кноль (Германия), проф. М. Коли (Италия), член-корр. НАН КР, д.т.н., проф. К. Ч. Кожоголов (Кыргызстан), проф. Д. Колимбас (Австрия), д.т.н. В. А. Мансуров (Казахстан), проф. Р. Миннит (Южная Африка), проф. Пан И-Шан (Китай), проф. К. Пинто (Бразилия), проф. Л. Тотев (Болгария), академик, проф. Цянь-Циху (Китай)

Журнал переводится на английский язык и издается в США Международной академической компанией "Наука / Интерпериодика" по контракту с Kluwer Academic / Plenum Publishers под названием "Journal of Mining Science"

Заведующая редакцией В. Н. Валиева

Адрес редакции: Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия.
Тел.: (383) 217-00-48. Факс: (383) 217-06-78. E-mail: edit@misd.nsc.ru
<http://www.sibran.ru/ftprpw.htm>, www.misd.nsc.ru/publishing/jms

Новосибирск
Издательство Сибирского Отделения РАН

© Сибирское отделение РАН, 2014
© Институт горного дела СО РАН, 2014

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

НОМЕР 4, 2014

ИЮЛЬ – АВГУСТ

ГЕОМЕХАНИКА

М. В. Курленя, А. С. Сердюков, А. А. Дучков, С. В. Сердюков

Волновая томография очагов аккумуляции метана в угольном пласте 3

В. В. Адушкин, В. Н. Опарин

От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III 10

А. П. Бобряков, А. Ф. Ревуженко

Экспериментальное определение степени разности тензоров напряжений и деформаций в сыпучих средах 39

С. Д. Викторов, Ю. И. Головин, А. Н. Кочанов, А. И. Тюрин, А. В. Шуклинов, И. А. Шуварин, Т. С. Пирожкова

Оценка прочностных и деформационных характеристик минеральных компонентов горных пород методом микро- и наноиндентирования 46

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

О. А. Микенина, А. Ф. Ревуженко

Критерии предельного состояния и разрушения идеально связных и сыпучих тел 55

А. А. Еременко, В. М. Серяков, Л. Н. Гахова

Геомеханическое обоснование параметров и способа создания демферного слоя в окрестности выработки для снижения уровня горного давления 61

П. К. Федотов

Моделирование процесса разрушения руды в слое частиц под давлением 71

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

А. П. Тапсиев, В. А. Усков

Об основных критериях выбора типа крепи горизонтальной выработки в зоне влияния очистных работ рудника “Заполярный” 78

В. И. Ческидов, В. К. Норри, Г. Г. Саканцев

Расширение области применения систем открытой разработки угольных месторождений с перевалкой вскрыши драглайнами 89

А. А. Ордин, И. В. Васильев

Выбор оптимальной глубины перехода от открытых работ к подземным при отработке угольного месторождения 97

<i>Е. В. Фрейдина, А. А. Ботвинник, А. С. Коваленко</i>	
Методологические основы и инструментарий для развития робастного управления горными работами на карьерах. Ч. II. Развитие робастного управления техническими ресурсами	109
<i>Г. Г. Саканцев, М. Г. Саканцев, В. И. Ческидов, В. К. Норри</i>	
Совершенствование систем разработки глубоких залежей на основе оптимизации элементов их вскрытия и параметров карьеров	117
РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА	
<i>П. Т. Пономарев, Н. А. Попов</i>	
Направленные ионизированные потоки воздуха в энергосберегающих технологиях вентиляции производственных помещений	123
БОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	
<i>В. А. Чантурия, Ю. Е. Брыляков, Е. В. Копорулина, М. В. Рязанцева, И. Ж. Бунин, И. А. Хабарова, А. Н. Краснов</i>	
Современные методы изучения сорбции жирнокислотных собирателей на минералах апатит-штаффелитовых руд	136
<i>С. А. Кондратьев, Н. П. Мошкин</i>	
Селективность флотационного разделения минералов, обусловленная химически закрепившимся реагентом	150
<i>Г. П. Двойченкова</i>	
Формирование минеральных образований на поверхности природных алмазов и метод их деструкции на основе электрохимически модифицированных минерализованных вод	159
<i>С. И. Евдокимов, В. С. Евдокимов</i>	
Извлечение металлов из лежалых хвостов с целью утилизации	172
ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ	
<i>Н. И. Грехнев, Л. Н. Липина</i>	
Особенности геомеханических реакций окисления в зоне гипергенеза в климатических условиях юга Дальнего Востока	183
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ	
<i>М. В. Курленя, Т. В. Шилова, С. В. Сердюков, А. В. Патутин</i>	
Герметизация дегазационных скважин угольных пластов методом барьерного экранирования	189
ЮБИЛЕЙ	
С 80-летием со дня рождения член-корреспондента РАН Д. Р. Каплунова	195

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.7+ 622

ВОЛНОВАЯ ТОМОГРАФИЯ ОЧАГОВ АККУМУЛИРОВАНИЯ МЕТАНА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

М. В. Курленя¹, А. С. Сердюков², А. А. Дучков³, С. В. Сердюков¹

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлен метод волновой томографии, являющийся конечно-частотным аналогом классической лучевой сейсмической томографии. Приведены результаты численных исследований. Предлагаемый подход позволяет определять скоростные аномалии в трещиноватых зонах аккумуляции метана, размеры которых сравнимы с доминирующей длиной волны, применяемой для просвечивания.

Угольный пласт, метан, трещиноватые зоны, сейсмическое просвечивание, волновая томография

Исследована задача поисков очагов аккумуляции метана в угольном пласте методом сейсмического просвечивания. В качестве исходных данных взяты времена пробега сейсмических волн, поскольку использование их динамических характеристик проблематично из-за значительной изменчивости упругих свойств горных пород в окрестности горных выработок. В таких условиях сложно учесть контактные условия в местах установки источников и приемников сейсмических колебаний и оценить, какая часть энергии возбуждаемого поля уходит в угольный пласт.

В работе [1] рассмотрена возможность применения классической лучевой томографии для поисков трещиноватых зон, моделируемых с помощью эффективных анизотропных упругих параметров. Малые размеры зон аккумуляции метана по сравнению с длинами сейсмических волн накладывают на данный метод существенные ограничения. Это связано с тем, что лучевая томография основана на высокочастотной (лучевой) аппроксимации решений соответствующих волновых уравнений.

Метод волновой томографии, предложенный в [2], решает обратную кинематическую задачу без использования высокочастотной аппроксимации. Невязки времен пробега определяют по корреляции наблюдаемых и синтетических сейсмограмм. Это дает возможность выявлять

невязки, вызванные возмущениями скорости в среде, размеры которых сравнимы с доминирующей длиной волны. Такой способ более устойчив к техногенным помехам на сейсмограммах, чем методы лучевой томографии.

Для расчета синтетических сейсмограмм обычно применяют конечно-разностные схемы решения соответствующих уравнений, способные моделировать полное волновое поле в заданной целевой области в требуемом временном интервале [3]. Это позволяет достаточно точно вычислять распространение упругих колебаний в неоднородных средах без использования лучевой аппроксимации. Недостатком являются высокие требования к вычислительным ресурсам и большое время вычислений из-за многократного решения прямой задачи распространения сейсмических волн в неоднородной среде. Заметим, что скорость обработки данных, в частности решения прямых задач в режиме реального времени, особенно важна для поиска газонаполненных зон, способных к внезапному выделению больших объемов метана в процессе разработки угольных пластов.

Для решения этой проблемы предлагается выполнять расчет динамических характеристик отдельных волн, а не всего поля целиком, за счет чего удастся добиться ускорения решения прямой задачи на несколько порядков [3].

Моделирование поисков очагов аккумуляции метана в угольном пласте методом сейсмического просвечивания проводится в два этапа. Сначала выполняется расчет времен пробега и фронтов целевых волн на основе конечно-разностного решения уравнения эйконала. На втором этапе решаются уравнения упругости в узкой полосе, привязанной к бегущему волновому фронту. Такой подход позволяет проводить выборочное моделирование отдельных волн в неоднородных средах значительно быстрее по сравнению с решением уравнений упругости во всей модельной области. При этом уравнения в окрестности фронта решаются без использования высокочастотной аппроксимации.

Представлены результаты численных экспериментов, демонстрирующие способность предлагаемого подхода обнаруживать трещиноватые газонаполненные неоднородности, размер которых несколько меньше длин волн, используемых для сейсмического просвечивания продуктивного пласта.

Волновая томография. В волновой томографии, в отличие от лучевой [4], времена пробега волн определяются путем корреляции зарегистрированных сейсмограмм с волновыми формами, вычисленными в синтетической скоростной модели среды. Каждый шаг итерационной процедуры восстановления скоростной модели состоит из построения “ядер чувствительности” (sensitivity kernel) на основе расчета сопряженного поля, получаемого с помощью продолжения наблюдаемых сейсмограмм в обратном времени со сдвигом, равным разнице времен пробега. Таким образом, удастся избавиться от ограничений лучевой теории.

Рассмотрим простой случай распространения продольных колебаний, моделируемых двумерной системой уравнений акустики:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} &= c(x)^2 \rho(x) \nabla \cdot \mathbf{v}, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= \frac{1}{\rho(x)} \nabla p,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = (v_x, v_z)$ — вектор скорости смещения точек среды; $p(\mathbf{x}, t)$ — объемное сжатие среды (давление); $c(\mathbf{x})$ — скорость распространения волн.

Для восстановления среды решается задача минимизации целевого функционала невязок времен пробега: