

УДК 622:624.191:550.83

*А.Ю. Бауков*

**ОПЫТ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО  
КОНТРОЛЯ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ  
ОБЪЕКТОВ И ПАМЯТНИКОВ КУЛЬТУРЫ г. МОСКВЫ**

Семинар № 2

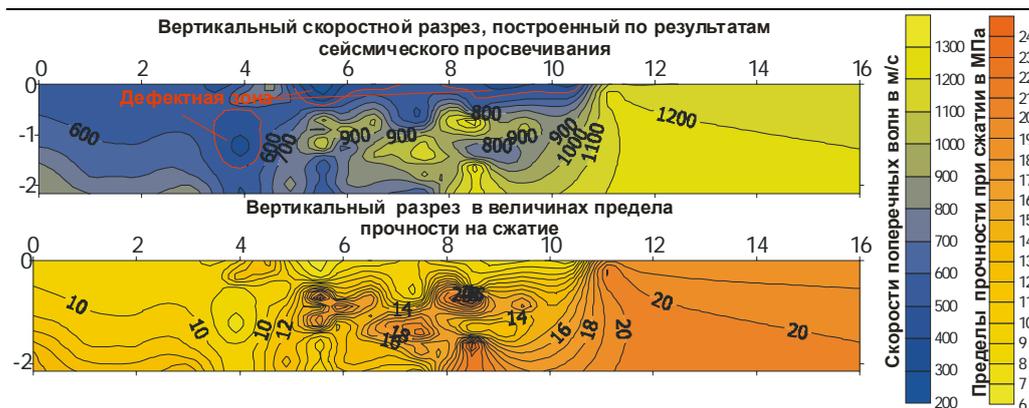
---

**В** настоящее время при выполнении ремонтно-восстановительных и реставрационных работ объектов городского строительства или различных памятников архитектуры, культуры и истории обязательной предварительной процедурой является проведение по возможности наиболее полного контроля состояния такого сооружения. Как правило, обследование объектов производится комплексом различных методов, начиная от визуального обследования и классических разрушающих методов, заканчивая методами неразрушающего контроля, число и конкретный характер которых зависит от решаемых задач контроля и технических возможностей организаций, выполняющих такие работы.

В отличие от разрушающих методов неразрушающие методы контроля позволяют выявлять в конструкциях различного вида скрытые дефекты, а также определять или уточнять внутреннюю структуру обследуемого объекта. При решении таких задач наилучшими возможностями, в частности оперативностью и проникающей способностью в самых различных диапазонах глубин, характеризуются геофизические методы. К наиболее часто применяемым при неразрушающем контроле указанного класса объектов можно отнести сейсмические методы, методы высокочастотного электромагнитного зондирования (георадар) и виброакустический методы.

При решении ряда конкретных задач неразрушающего контроля, например, при выявлении скрытых приповерхностных вертикальных трещин, или при оценке пространственной неоднородности объекта, указанные геофизические методы используются в комплексе с традиционным методом неразрушающего контроля – ультразвуковым. Кроме того при наличии в исследуемых конструкциях металлических фрагментов в комплексе с геофизическими методами применяются индукционные неразрушающие методы, позволяющие выявлять внутри конструкций также металлические элементы и оценивать их характеристики (размеры, степень коррозируемости и т.п.). Наиболее широко применяются геофизические методы при обследовании памятников культуры, так как в этом случае, как нигде, основным требованием к неразрушающему контролю является соблюдение не только полной целостности обследуемой конструкции, но и часто целостности ее свободной поверхности.

Сложность проведения контроля в производственных условиях, необходимость определения с достаточной точностью при производстве контроля различных физических параметров и характеристик сооружений, необходимость оперативности проведения контроля с учетом большого объема исследований обуславливает применение геофизических методов с их адаптацией к конкретным усло-



**Рис. 1. Результаты сейсмического просвечивания конструкций резервуара**

виям контроля строительных объектов и памятников культуры.

С другой стороны, возможность использования таких методов при комплексном неразрушающем контроле указанных типов объектов предполагает наличие специализированной измерительной аппаратуры, а также соответствующих методик проведения натурных съемок.

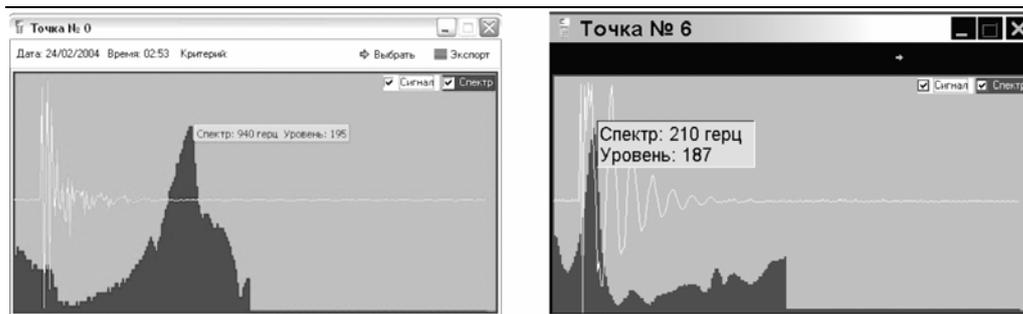
Ниже приведены результаты комплексного неразрушающего контроля подземных объектов городского строительства и памятников культуры г. Москвы с применением ряда геофизических методов, выполненного на базе лаборатории диагностики ЗАО «Триада-Холдинг» в 2004 г.

Так при контроле подземных сооружений городского строительства, например заглубленных резервуаров питьевой воды, коллекторов различного назначения, подвальных помещений, необходимо определение прочностных характеристик бетонных конструкций, степени изменения упругих свойств бетона, качества арматуры, состава бетона, степени сохранности швов, наличия внутренних дефектов железобетонных конструкций, в частности зон внутренних расслоений в многослойных конструкциях, а также качества связи между железобетонной обделкой и окружающими объект горными породами, т.е.

наличия полостей непосредственно за обделкой сооружения.

Особенностью проведения контроля в таких объектах является значительная их протяженность (до нескольких километров), поэтому оценка прочностных характеристик и степени их изменчивости в пределах всего исследуемого участка производится с использованием сейсмического высокочастотного метода. При этом применяется методика линейного профилирования на фланговой системе при ударном возбуждении с десятикратным накоплением. Длина профиля варьируется от первых метров до первых десятков метров. Шаг измерения от 1 до 2 м. При сейсмических съемках используется 24 канальная переносная цифровая сейсмостанция «Диоген».

По результатам съемок строятся годографы первых вступлений сейсмоимпульса и с использованием программы «Surfer» - карта распределения изолиний скоростей продольных волн. Пример таких карт, полученных при обследовании резервуара чистой воды Восточной водопроводной станции, представлен на рис. 1. По годографам и картам на исследованной площади днища выделяются зоны аномальной прочности. В пределах данных зон оценивается динамическая прочность бетонных конструкций  $R_d$  и путем сравнения ее со средней прочностью вдоль всей конструкции и с проектной прочностью на основе методов математической статистики оценива-



**Рис. 2. Спектрограммы и осциллограммы виброакустических импульсов**

ется степень неоднородности прочностных свойств конструкции вдоль ее простираения. При этом значения динамической прочности сравниваются с прочностью, определяемой по выборочной методике склерометрическим методом с помощью молотков DIGI-SHMIDT швейцарской фирмы «Pросец».

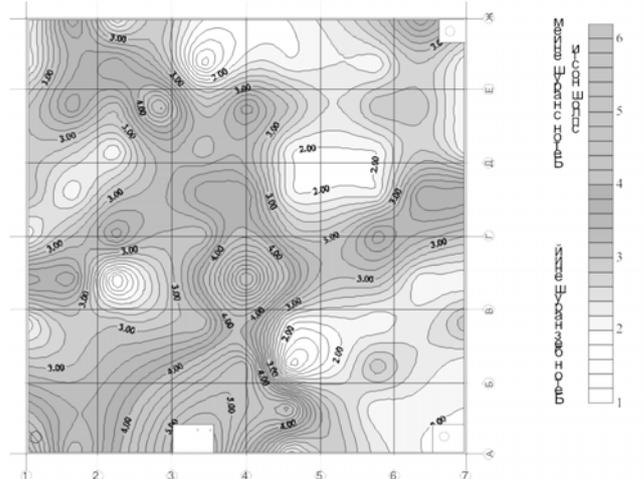
Выявление зон с возможными полостями под днищем сооружения, а также участков с внутренними расслоениями четырехслойной конструкции днища производилось с использованием виброакустического метода. Методика съемок, измерительная аппаратура и способы интерпретации данного метода описаны в [1]. Измерения производились по методике площадной съемки вдоль линейных профилей. Расстояние между профилями составляло 3 м. Шаг точек возбуждения – 1,5 м. По результатам съемок на компьютере в каждой точке получали спектрограмму виброакустического импульса (рис. 2), все спектрограммы анализировались, и по специальным программам на плане исследуемого участка строились зоны расположения возможных полостей и

**Рис. 3. Карта дефектности днища резервуара, полученная в результате виброакустических исследований**

внутренних дефектов конструкции. Пример построения карты дефектности днища представлен на рис. 3.

При обследованиях памятников культуры (церквей, музеев, старинных особняков и зданий и т.п.) одной из основных задач неразрушающего контроля является изучение внутреннего строения стен, перекрытий, полов и оснований исследуемого сооружения, так как в большинстве случаев не сохранились чертежи или другая проектная документация объекта. При этом особенностью изучения таких конструкций является значительное разнообразие материалов, из которых выполнены конкретные подлежащие контролю фрагменты памятника.

Другой важнейшей особенностью проведения обследований данных объектов является особенно бережное отношение к ним, о чем уже упоминалось выше. В качестве иллюстрации к данному положе-



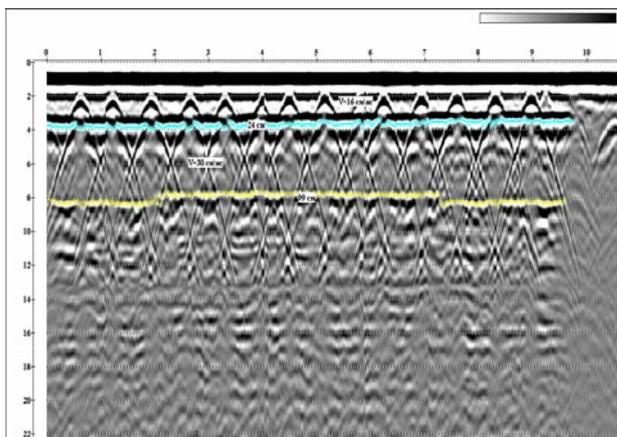
нию можно привести пример исследования внутреннего строения стен и купола Благовещенского Собора в Московском Кремле, выполненные в ноябре-декабре 2004 г., когда во время проведения контроля могли быть повреждены бесценные фрески 16 столетия.

В связи с указанными особенностями выбор методов неразрушающего контроля при обследованиях памятников культуры определяется не только техническими задачами контроля и методическими условиями исследований (односторонний или двусторонний доступ; качество исследуемой поверхности – шероховатость и т.д.; длина доступной поверхности; затухание волн в материале и т.п.), но и возрастом и художественной или культурной ценностью, а также степенью сохранности объекта. Данные обстоятельства зачастую значительно сужают диапазон возможных методов, которыми можно пользоваться при контроле, а значит весьма сильно усложняют решение поставленных задач.

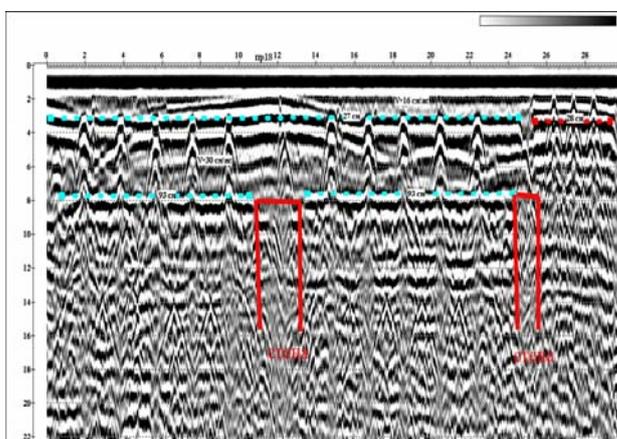
По указанным выше причинам при неразрушающем контроле памятников культуры наиболее часто применяются следующие методы: метод радиолокационного зондирования (георадар); ультразвуковой метод и сейсмический метод. Ограничениями при применении ультразвукового метода контроля является достаточно малая глубинность исследований при одностороннем доступе к объекту и необходимость использования акустической смазки. К факторам, сужающим круг применения сейсмического метода относятся: необходимость ударного возбуждения, что категорически запрещено при исследовании ветхих участков памятника, а также требования достаточной протяженности поверхности, на которой производится сейсмическое профилирование, что весьма часто невозможно выполнить в условиях старинных построек. Наиболее перспективным при исследовании памятников культуры является метод георадара, характеризующийся возможностью применения

при одностороннем доступе к исследуемой поверхности, значительной проникающей способностью (до нескольких метров в зависимости от электромагнитных свойств исследуемой конструкции), хорошей разрешающей способностью, изменяющейся при использовании сменных приемно-передающих антенн с различными собственными частотами, и отсутствием необходимости применения промежуточных сред, в частности смазки, при проведении электромагнитных съемок. Кроме того отличительной особенностью электромагнитной локации является возможность уверенного выделения в исследуемой конструкции элементов с хорошей электрической проводимостью, например, металлических элементов, обводненных полостей и т.п. На основании измеренных фазовых скоростей электромагнитных волн и взаимосвязи их значений с диэлектрической проницаемостью среды с использованием данного метода можно определять тип материала, слагающего исследуемый объект. К достоинствам данного метода относится также простота проведения георадарных съемок и оперативное получение информации об объекте в виде электромагнитных волновых трасс, на которых четко выделяются электрические неоднородности [2].

В качестве примера применения геофизических методов при неразрушающем контроле памятников культуры приведем результаты обследования перекрытий здания ГМИИ им. Пушкина в г. Москве. Задачей данных исследований являлось изучение внутреннего строения перекрытий. Здание музея построено в 1912 году. Техническая документация на указанные конструкции объекта отсутствует. Поэтому ни внутреннее строение перекрытий, ни типы материалов, из которых они изготовлены были неизвестны. По причине исторической и культурной ценности объекта, а также отсутствия оценки степени его сохранности применение разрушающих методов контроля, в частности кернового бурения, категорически исключалось.



*Рис. 4 Георадиолокационный разрез перекрытия 1-го этажа здания ГМИИ им. А.С. Пушкина. На профиле отчетливо видны дифрагирующие отражения от металлических балок*



*Рис. 5 Георадиолокационный разрез перекрытия 1-го этажа здания ГМИИ им. А.С. Пушкина. На профиле четко выделяются горизонтальные границы перекрытия*

диолокационного зондирования различных перекрытий музея.

Так на радиограмме рис. 4 четко выделяются металлические несущие конструкции в верхней части перекрытия, а также его промежуточные слои. Характерной особенностью конструкции данного перекрытия является также наличие воздушного пространства в нижней части перекрытия, что также уверенно обнаруживается на плоскости радиограммы в виде соответствующих групп зон синфазности.

На рис. 5 видно, что помимо тонкой структуры внутреннего строения перекрытия, четко выделяются несущие горизонтальные конструкции, очерченные на радиограмме соответствующим контуром.

Приведенные примеры комплексного использования геофизических и традиционных методов неразрушающего контроля позволяют сделать выводы о перспективности применения различных геофизических методов для исследований не только подземных сооружений городского строительства, но и памятников культуры, а также о необходимости расширения круга других геофизических методов для решения указанных задач и совершенствования методик применения данных методов применительно к специфическим условиям таких объектов.

В данных условиях единственно приемлемым методом неразрушающего контроля был выбран георадиолокационный метод. Исследования перекрытий с использованием данного метода производилось георадаром «ОКО» с электромагнитными антеннами с собственной частотой 1700 МГц и 700 МГц.

Измерения выполнялись по системе взаимно перпендикулярных профилей. В результате на каждом участке съемок наблюдалось полное перекрытие фронтов отраженных электромагнитных волн.

В качестве иллюстрации полученных результатов на рис. 4 и рис. 5 приведены радиограммы при корреляционной обработке радиоволнового поля в процессе ра-

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бауков Ю.Н., Чумичев А.М., Бауков А.Ю. Особенности применения вброакустического метода при контроле многослойных покрытий, обделок и закрепного пространства в подземных выработках. // Горный информационный бюллетень, МГГУ, 2002, №3.
2. Рубан А.Д., Бауков Ю.Н., Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Высокочастотные электромагнитные методы. Учебное пособие – М.: МГГУ, 2002.

### Коротко об авторах

Бауков А.Ю. – аспирант, Московский государственный горный университет.



---

© М.Д. Молев, 2005

УДК 53.082:622.83

*М.Д. Молев*

### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ЗАБОЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СКВАЖИНЫ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

Семинар № 2

**В** Восточном Донбассе, начиная с 1994 г., проводится реструктуризация угольной отрасли, характерной чертой которой является массовое закрытие неперспективных угольных шахт. Принятие оптимальных управленческих решений по ликвидации предприятий возможно только при наличии всестороннего научно-технического сопровождения. Как показывает опыт проведения горнотехнических работ, для регулирования гидрогеологического режима в углепородном

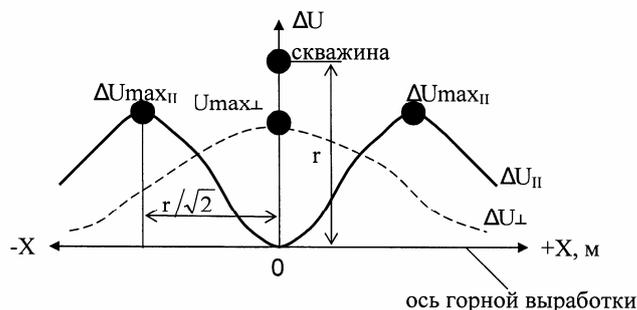
массиве достаточно часто требуется пробурить водоперепускные скважины с дневной поверхности в горную выработку или между двумя подземными выработками. При производстве буровых работ нередко забои скважин отклоняются от проектных координат, что связано с неоднородностью строения геологической среды и недостаточным уровнем контроля за направлением бурения. Для нахождения «потерянных» скважин приходится дополнительные горные работы.

**Определение координат забоя скважины**

В России и за рубежом разработаны методы и аппаратура, позволяющие из горных выработок шахт определять расстояния до невыбурившихся скважин и их координаты на основе измерений и анализа физических (акустических, электрических) полей [1].

Нами накоплен определенный опыт интроскопии скважин, пробуренных на шахтных полях Донбасса. Для поиска забоев скважин, не выбурившихся в горные выработки, использовались низкочастотные электрический и сейсмический методы. Опытные работы показали, что наиболее эффективным является электрический метод, основанный на регистрации электрического поля заряженного проводника («метод заряда» – МЗ).

Материалы, накопленные за пятнадцатилетний период экспериментальных исследований, позволили разработать технологию измерений и методику интерпретации полученных результатов. Физическая основа определения координат забоя скважины состоит в том, что электрическое поле заряженного тела может быть охарактеризовано потенциалом или градиентом потенциала, величины которых зависят от пространственного положения источника поля и профиля наблюдений [2, 3]. Разность потенциалов электрического поля  $\Delta U$ , согласно теоретическим представлениям, при расположении приемных электродов напротив забоя равна нулю для продольной составляющей поля и максимальна – для поперечной. Продольная составляющая электрического поля достигает максимального значения при удалении точки регистрации от проекции забоя на профиль наблюдений на расстояние



$$x = \pm \frac{r}{\sqrt{2}} \quad (\text{см. рис.}).$$

Исходя из указанных теоретических предпосылок, была разработана методика шахтных наблюдений. Электрическое поле задавалось с помощью обсадной трубы скважины и спуска питающего электрода на забой. В качестве источника поля использовался генератор переменного тока частотой 22 Гц и выходной мощностью 50 Вт. Измерения проводились в два этапа. На первом, поисковом, этапе осуществлялась шахтная съемка градиента потенциала (продольной и поперечной составляющей поля) в предполагаемом районе нахождения забоя. При этом для надежной оценки продольная составляющая  $E_{||}$  измерялась по обеим стенкам горной выработки. Затем выполнялась детализация с уменьшением шага наблюдений  $\Delta U$  до 1 м. Согласно классической теории электрического поля глубина  $r$  до забоя скважины от профиля наблюдений определяется по формуле

$$r = \sqrt{2} x ,$$

где  $x$  – расстояние между минимальным и максимальным значением на графике продольной составляющей  $\Delta U_{||}$ . Из анализа имеющихся в нашем распоряжении материалов вытекает, что для условий Восточного Донбасса в случае разных значений  $x_1$  и  $x_2$  (на левой и правой ветвях графика) величина  $r$  находится в интервале

$$\sqrt{2} x_1 \leq r \leq \sqrt{2} x_2 .$$

Технико-экономическая эффективность электрического метода поиска забоя скважин можно охарактеризовать следующими показателями. Исследования были проведены с целью поиска забоев 43 невыбурившихся скважин. В 42 случаях геофизический прогноз был проверен и искомые скважины были вскрыты дополнительными горными выработками согласно указанным координатам. При этом ошибка определения координаты забоя по оси  $x$  не превышает 1,5 м, что находится в пределах принятой ширины поисковой горной

выработки (3 м) и связано с электрической анизотропией углепородного массива.

Анализ полученных материалов также показал возможность определения методом заряда координат забоя не только

скважин, но и горных выработок (стволов, штреков, разрезных печей и т.п.) на расстоянии до 30 м от профиля наблюдений. Метод позволяет оценить нахождение забоя скважины по вертикальной оси.

Для выполнения шахтных измерений применяется стандартная электроразведочная аппаратура: ИКС-50, ШЭРС-4, ЭРА. Затраты времени на производство геофизических работ составляют 2-5 часов, при этом основную часть занимают подготовительные операции.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о хороших перспективах использования МЗ для поиска забоев скважин и горных выработок при ликвидации шахт.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферов М.С.* Звукометрический поиск скважин из горных выработок / Применение сейсмоакустических методов в горном деле: Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1964.

2. *Хмелевской В.К.* Основной курс электроразведки. – М.: Изд-во МГУ, 1970.

3. *Родионов П.Ф.* Электроразведка методом заряда. – М.: Наука, 1971.

#### Коротко об авторах

*Молев М.Д.* – доктор технических наук, заведующий кафедрой Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса, г.Шахты, Ростовской обл.



---

© В.Н. Захаров, А.П. Аверин,  
2005

УДК 534:622.8

**В.Н. Захаров, А.П. Аверин**

## МЕХАНИЗМЫ ЗАТУХАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ\*

Семинар № 2

Данная статья является развитием работы [1], где предложен подход определения эффективного коэффициента затухания по полной энергии сигнала по данным ультразвукового каротажа (УЗК) и направлена на увеличение количества информативных параметров, характеризующих строение и состояние массива горных пород, получаемых при ультразвуковых исследованиях.

В общем случае затухание энергии упругих волн, обуславливает уменьшение амплитуд волн при их распространении в поглощающей среде по экспоненциальному закону:

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

где  $A_x$  – амплитуда на расстоянии  $x$  от источника;  $\alpha$  – коэффициент затухания.

Очевидно, что определяемый по указанной формуле коэффициент затухания является интегральной величиной. Известно, что в общем случае затухание обусловлено тремя причинами.

1. Поглощением колебательной энергии, связанным с неидеальной упругостью среды, которое вызывает необратимый переход сейсмической энергии в тепловую.

2. Рассеянием энергии упругих волн на внутренних неоднородностях и аномалиях среды, которая определяется не только внутренними физическими свойствами среды, но и ее структурным строением.

3. Расхождением волнового фронта, которое главным образом связано со свой-

ствами источника колебаний и геометрией.

Каждая из указанных причин затухания упругих волн по-своему определяет характер изменения энергии волны с расстоянием и дает свой вклад в результирующее изменение поля с расстоянием. В связи с этим представляет интерес определение количественных значений каждой из составляющих коэффициента затухания для расчетов физико-механических и реологических параметров среды.

Общепринятым подходом учета величины расхождения волнового фронта является подбор коэффициентов уравнения вида [2]:

$$A_x = \frac{A_0 e^{-\alpha_{эф} x}}{x^n}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель расхождения волнового фронта.

Анализ результатов подбора коэффициентов указанного уравнения показал, что наиболее устойчиво процесс подбора происходит для уравнения

$$A_x = \frac{A_0 e^{-\alpha_{эф} x}}{\sqrt{x}}. \quad \text{Для других уравнений}$$

возникали случаи подбора положительного коэффициента затухания, что противоречит физическому смыслу этого явления, поэтому во всех дальнейших расчетах принято именно это уравнение. Сравнивая результаты определения коэффициента затухания по уравнениям (1) и (2) получили, что затухание, обусловленное расхождением волнового фронта, достигает 50 % от

\*Работа выполнена при поддержке государственной программы «Ведущие научные школы» (проект НШ – 1467.2003.05).

величины эффективного коэффициента затухания.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению затухания упругих волн, все попытки оценки составляющих эффективного коэффициента затухания, определяемых поглощением и рассеянием, носят частный характер, и единый подход к их оценке пока не разработан.

В работе [3] разработана методика определения интегрально усредненных параметров горного массива: коэффициентов пористости и проницаемости, декрементов поглощения, плотности, коэффициентов вязкости среды, упругих постоянных Ламе и времени релаксации на основе сейсмических (от 100 до 1000 Гц) исследований угольных пластов и вмещающих пород.

Декремент затухания находим по формуле:

$$\mathcal{G} = \frac{a_{pac} V_S}{f}, \quad (3)$$

где  $f$  - видимая преобладающая частота S-волны.

Значение относительной плотности скелета породы определяется выражением:

$$\gamma = 1 + \mathcal{G}^2 - \sqrt{(1 + \mathcal{G}^2)^2 - 1} \quad (4)$$

Коэффициент пористости находится по формуле

$$K_{II} = \frac{\varphi}{1 + \varphi} 100\%, \quad (5)$$

$$\text{где } \varphi = \frac{\rho_1 \left( \frac{1}{\gamma} - 1 \right)}{\rho_2 p}.$$

(6)

Значение средней плотности на исследуемом участке, определяется зависимостью

$$\bar{\rho} = \rho_1 (1 - K_{II}) + \rho_2 p K_{II}. \quad (7)$$

Величина времени релаксации составляет

$$\tau_S = \frac{2\alpha V_S}{(1 + \gamma) f^2},$$

(8)

а постоянную релаксации рассчитываем

$$\text{по формуле } \theta_S = \frac{1}{f^2 \gamma \tau_S} \quad (9)$$

Значение коэффициента проницаемости, характеризующего способность максимально насыщенной породы при наличии градиента давления пропускать однородный флюид, найдем по выражению

$$K_{III} = \frac{\nu \tau_S}{\rho_2}, \quad (10)$$

где  $\nu$  - величина коэффициента вязкости флюида.

Эффективные упругие константы Ламе определяются по формулам:

$$\mu = \bar{\rho} V_S^2 \quad (11)$$

$$\lambda = \bar{\rho} (V_P^2 - 2V_S^2) \quad (12)$$

Очевидно, что величина коэффициента затухания входящая в указанные зависимости характеризуется рассеянием энергии упругих волн на неоднородностях. Таким образом, используя данные зависимости, для разделения поглощения и рассеяния предлагается следующий подход.

Составляющую эффективного коэффициента затухания, определяемую рассеянием, можно представить в виде  $\alpha_{pac} = K \cdot \alpha_{эф}$ , где  $K$  - коэффициент, характеризующий долю общей энергии волны, теряемую ею за счет рассеяния на неоднородностях. Зная из лабораторных определений физико-механических свойств пород коэффициент пористости, плотность скелета и плотность флюида и решая затем обратную задачу, по формулам 3 - 5 можно рассчитать величину  $\alpha_{pac}$ . Значения скорости и частоты получаем из экспериментальных данных ультразвукового каротажа, относящиеся к сохранному массиву. Отбросив случайные отскоки

значений скорости и  $\alpha_{эф}$ , определяем их средние значения. Отношение рассчитанного значения  $\alpha$  по формуле 3 к среднему значению  $\alpha_{эф}$  и является переходным коэффициентом  $K$ .

В случае отсутствия достоверной информации о коэффициенте пористости для изучаемого массива можно воспользоваться величинами  $K$ , полученными эмпирическим путем. Анализ большого количества экспериментальных данных УЗК, полученных на различных объектах и типах горных пород, показал, что величина  $K$  для изверженных и метаморфических пород колеблется около 0,1, а для осадочных и глинистых пород  $K$  близок к 0,06.

Таким образом, на основании изложенного, можно дать обобщенные количественные оценки составляющих величину коэффициента затухания, определяемого по формуле 1 при ультразвуковых исследованиях (от 20 до 80 кГц): 45 % - поглощение энергии за счет неидеальной упругости среды (переход в тепловую энергию); 5 % - рассеяние энергии на неоднородностях и 50 % - потери энергии за счет геометрии расхождения волнового фронта.

Выполненные исследования позволили провести обработку данных ультразвукового каротажа на основе информации о динамических параметрах сигналов. Наиболее показательными представляется Саяно-Шушенская ГЭС на которой проводилось два цикла измерений и Богучанская ГЭС измерения на которой проводились в обсаженных металлической трубой скважинах.

#### Саяно-Шушенская ГЭС

Полевые работы по изучению напряженно-деформированного состояния береговых примыканий Саяно-Шушенской ГЭС выполнялись в левобережной цементационно-дренажной галереи в 2002 г. На-

блюдения проводились в два цикла: весной при минимальном уровне верхнего бьефа (УВБ ~ 500 м) и осенью при максимальном УВБ (~ 534 м). Скважины расположены на оси галереи на расстоянии 15, 25, 40 и 60 м от примыкания плотины и обозначены Л-1, Л-2, Л-3 и Л-4 соответственно.

В результате подъема УВБ отмечается общее снижение уровня скоростей упругих волн и значительное увеличение коэффициента затухания на участках относительно сохранных пород, что может объясняться увеличением порового давления и как следствие раскрытие микротрещин (см. рис. 1 и 2).

Отмечаемое наиболее четко в скважине Л1 на глубине 13 м и в скважине Л3 на глубинах 2, 4, 7 и 16-18 м уменьшение коэффициента затухания на крупных геологических нарушениях, свидетельствует о значительной пригрузке массива, приведшей к уменьшению трещинной пустотности (см. рис. 3).

По результатам повторных измерений отмечается более чувствительное изменение величины коэффициента затухания к изменениям в массиве, вызванным повышением уровня воды в водохранилище. Что доказывает возможность оценки текущего состояния

#### Богучанская ГЭС

Ультразвуковые измерения выполнены в пьезометрических скважинах диаметром 50 мм, разбуренных в цементационной галерее в секциях №№ 18–25. Все они обсажены стальными трубами. Волновая картина осложнена высокоскоростными трубными волнами, распространяющимися по металлу. В мировой практике имеется опыт выделения поперечных волн в обсаженных скважинах [4].

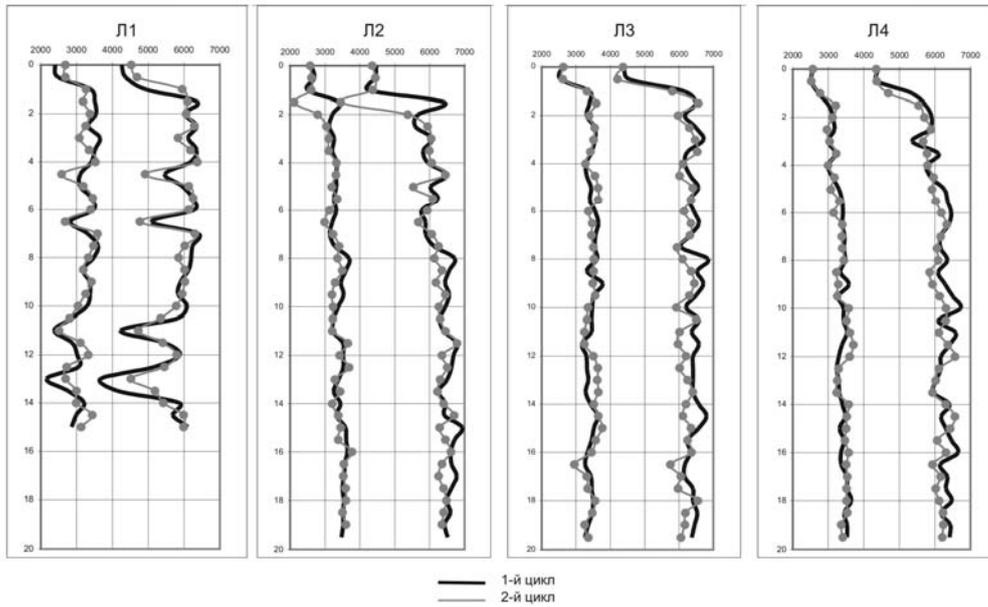
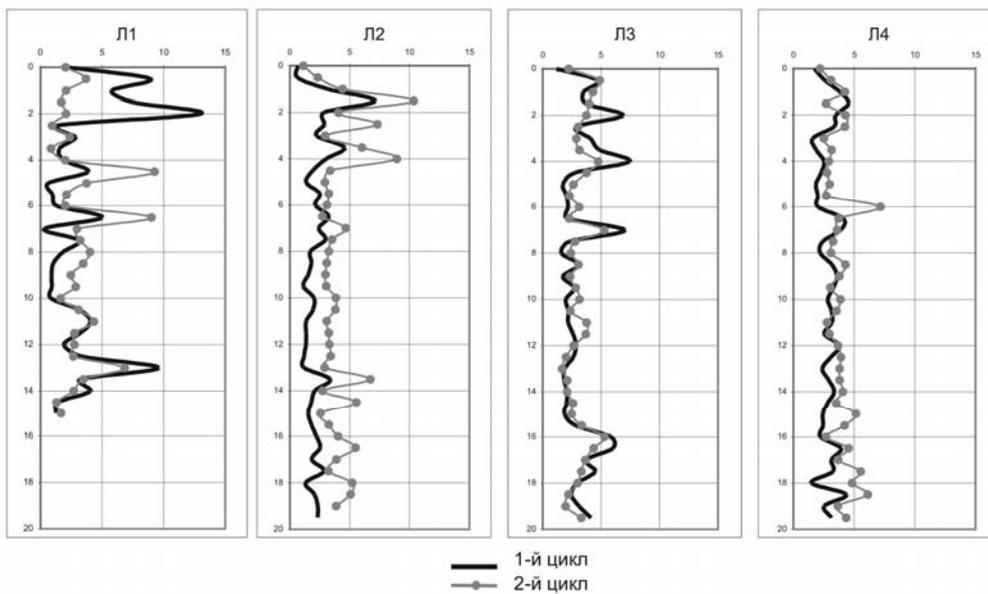


Рис. 1. Скорости упругих волн  $V$ , м/с. Саяно-Шушенская ГЭС

В результате стандартной обработки [5] на фоне помех удалось выделить только поперечную волну  $V_s$ , для которой были построены скоростные графики  $V_s = f(h)$ , отличающиеся сильной изрезанностью, вызванной неоднородно-

Рис. 2. Эффективный коэффициент затухания,  $m^{-1}$ . Саяно-Шушенская ГЭС



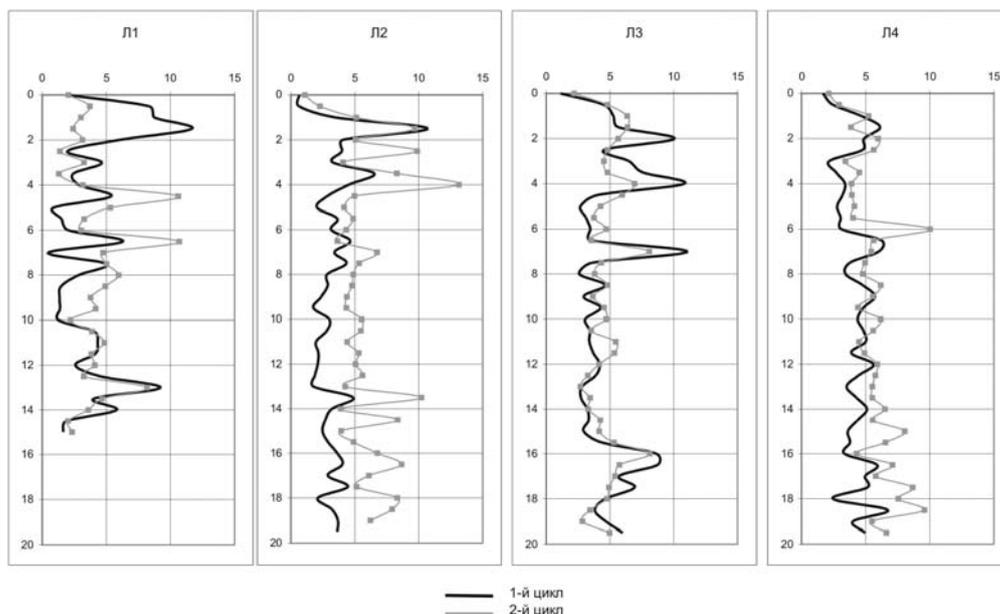


Рис. 3. Коэффициент пористости, %. Саяно-Шушенская ГЭС

стью геологического строения исследуемого массива. Отсутствие данных о скоростях продольной волны  $V_p$  не позволило оценить упругие и деформационные характеристики скалы для отдельных интервалов скважин. Графики  $V_s = f(h)$  были использованы лишь для уточнения информации о размерах зоны разгрузки.

Расчитанные по формулам 3-12 параметры и их диапазоны изменения приведены в таблице.

По геологическим данным коэффициент трещинной пустотности для долеритов групп сохранности Б и В составляет 1-5 % [6], результаты наших расче-

тов удовлетворительно согласуются с этими величинами.

Выводы:

Полученные результаты разделения составляющих коэффициента затухания не противоречат физическому смыслу этого явления.

Применение указанного подхода к выделению составляющих коэффициента затухания позволяют получать дополнительный ряд физико-механических и реологических параметров при обработке данных УЗК, что существенно повышает его информативность.

Скорость поперечных волн, $V_s$ м/с	<u>2.25-3.42</u> 2.82	Время релаксации, $\tau$ $10^{-6}$ с	<u>0.35-4.19</u> 1.13
Коэффициент затухания, $\alpha$ м <sup>-1</sup>	<u>1.47-14.11</u> 3.59	Постоянная релаксации, $\theta$ $10^{-3}$ с	<u>0.12-1.18</u> 0.50
Коэффициент пористости, $K_p$ %	<u>1.2-11.9</u> 3.7	Коэф. проницаемости, $K_{пр}$ $10^{-10}$ м <sup>2</sup>	<u>0.63-7.55</u> 2.03
Плотность, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	<u>2.22-2.77</u> 2.68	Модуль сдвига, $\mu$ $10^3$ МПа	<u>5.34-32.0</u> 21.96

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверин А.П.* Исследование параметров затухания при ультразвуковых наблюдениях. Горно-информационный бюллетень, №10, – М.: Изд-во МГГУ, 2004.
2. *Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийская Г.Н., Стародубровская С.П.* Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Изд. АН СССР, М., 1962.
3. *Захаров В.Н.* Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств массива горных пород при разработке угольных месторождений. – М.: ФГУП ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского, 2002.
4. Sonic logging through casing for porosity and fluid characterization in the Wilmington Field, CA. / Moos Daniel, Dvorkin Jack // SEG / DENVER'96: SEG Int. Expo. and 66<sup>th</sup> Annu. Meet., Denver, Colo, Nov.10-15, 1996 Vol.1 - Tulsa (Okla), 1996.- с. ВГ 2.5.\
5. *Савич А.И., Контев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г.* Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. – М.: Недра, 1969.
6. *Смульский П.Я.* Богучанская плотина на р. Ангаре. В кн. Геология и плотины. Вып. XII - М.: Энергоатомиздат, 1992.

---

### Коротко об авторах

*Захаров В.Н.* – ИПКОН РАН,  
*Аверин А.П.* – ЦСГНЭО.

---

## НОВИНКИ

### ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Пучков Л.А., Сластунов С.В., Федунец Б.И.** Перспективы добычи метана в Печорском угольном бассейне. — 556 с.: ил.  
ISBN 5-7418-0336-9 (в пер.)

Изложены результаты исследований, в ходе которых собрана и обобщена горно-геологическая и горно-техническая информация по Воркутинскому месторождению, основные принципы и методология оценки участков угольных месторождений и конкретных шахтных полей Воркутинского месторождения по метанодобываемости. Дан анализ распределения метана по месторождению. Описаны подготовка геодинамического районирования объектов для выявления перспективных участков работ по добыче угольного метана и методика метанодобываемости угольных пластов с определением показателей природной газоотдачи угольных пластов в скважины. Рассмотрены перспективы использования угольного метана. Изложены основные экологические аспекты рассматриваемого вопроса и первичные результаты натурных исследований, проведенных на двух скважинах поля доразведки шахты «Комсомольская».

*Для инженерно-технических работников топливно-энергетического комплекса, специалистов научно-исследовательских и проектных организаций угольной и газовой промышленности.*

УДК 622.411.33

УДК 622.831

*Г.И. Кулаков, Н.А. Бритков*

**ОСОБЕННОСТИ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В СКВАЖИНАХ\***

Семинар № 2

**Р**удник Таймырский Норильского горнометаллургического комбината ведет отработку медноникелевых руд на глубине до 1050 м слоевой системой с твердеющей бетонной закладкой. Рудная залежь представлена пологопадающим пластом большой мощности. На руднике в целях доразведки отдельных участков регулярно бурится значительное количество скважин. Широко применяется бурение скважин и как способ разгрузки приконтурной зоны горных выработок на участках с повышенными напряжениями. Длина таких скважин от нескольких метров до десятков метров, диаметр 112 мм. Все это позволяет считать перспективным развитие методов контроля напряженного состояния обрабатываемых массивов и степени удароопасности приконтурных зон на удароопасных участках по регистрации электромагнитного излучения массива в скважинах.

В Институте горного дела СО РАН разрабатывается способ регистрации упомянутого излучения с использованием специальных скважинных зондов. Последний состоит из регистрирующего прибора типа РЭМИ-2 и антенны-преобразователя напряженности электромагнитного поля. На одном конце деревянной штанги размещается регистратор излучения, на втором антенна. В используемой в шахтных экспериментах конст-

рукции зонда снятие показаний регистратора производится визуально. Длина зонда составляла 1,7 м.

Методика измерений включала размещение зонда в скважине и постепенное перемещение в обратном направлении. Отсчеты обычно снимались через 0,1 м. Ниже приводятся сведения об экспериментах, выполненных на руднике Таймырский. Измерения проведены на шахте № 1, восток, в слоевом штреке 45-12.

В горизонтальной выработке длиной около 20 м в обоих бортах были пробурены разгрузочные скважины через 0,8 м. Скважины располагались по правому борту на высоте 0,8 м от почвы выработки, по левому борту на высоте 1,6 м. В правом борту пробурено 19 скважин, в левом более 20. Длина скважин не менее 5-8 м. Измерения выполнены в устье скважин на участках длиной 1,7 м. Результаты регистрации электромагнитного излучения в скважинах правого борта приведены в табл. 1, в скважинах левого борта в табл. 2.

Рассмотрим экспериментальные данные при измерениях в правом борту. Основная особенность – величины интенсивности излучения в пределах скважины измерения оставались примерно постоянными по ее длине. Так, в скважине № 1 (табл. 1) отсчеты составляли

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционных проектов СО РАН № 73, № 129.



$x_i = 65$  отн.единиц, в скважине № 2  $x_i = 64$  отн.единиц, в скважине № 14  $x_i = 61$  отн.единиц. Для скважины № 16 приведено три отсчета, сделанные с некоторым перерывом во времени. Аналогичные данные приведены для скважины 18. По мере перехода от скважины 1 до скважины 18 интенсивность излучения постепенно снижалась от  $x_i = 65$  отн.ед. до  $x_i = 55-57$  отн.ед. Имеются незначительные колебания в отсчетах на глубине 0,2-0,4 м от устья скважин, т.е. вблизи возможных точек максимума опорного давления.

После замеров в скважине № 18 правого борта проведены некоторые подготовительные замеры по скважинам левого борта, где интенсивность излучения оказалась выше. Было принято решение повторить часть измерений в скважинах правого борта. (В табл. 1 это замеры после 12<sup>30</sup>). Обнаружилось, что интенсивность излучения в скважинах правого борта к этому времени возросла. В скважинах 15, 17, 18 отсчеты в устье и вблизи него составили  $x_i = 68$  отн.ед. Отсчет по скважине № 19 составил  $x_i = 69$ . Отсчеты по скважинам №№ 12, 13 составили  $x_i = 70$ , по скважине № 14  $x_i = 69$ . Все эти величины заметно выше, чем в начале смены. Выпишем начальные величины и замеренные после 12<sup>30</sup> (см. табл. 3). Прочерки здесь связаны с тем, что первоначально, в начале смены, замеры выполнялись через одну скважину.

Выпишем величины замеров для скважин, где проставлены прочерки, используя замеры в соседних скважинах: выше черты – предыдущая скважина, ниже черты – последующая. В последней строке приведены данные разности между второй и первой строками, видно, что отсчеты после времени 12<sup>30</sup> возросли на 7-11 отн.ед.

Рассмотрим замеры по скважинам борта выработки (табл. 2). Здесь ситуация аналогичная. Отсчеты по длине скважин от их устья до глубины 1,6 м практически одинаковые. В табл. 2: замеры выписаны не во всех точках вследствие того, что по-

казания прибора при его продвижении по скважине не изменялись. Последнее видно на примере скважин № 1 и № 2. Начиная со скважины № 20 отсчеты несколько возросли, составив  $x_i = 68$  отн.ед.; по скважине № 24  $x_i = 70$  отн.ед.; по скважине № 27  $x_i = 71$  отн.ед.

Отметим некоторые особенности электромагнитного излучения в скважинах, установленные в проведенном эксперименте.

1. Интенсивность излучения по длине скважины на участках, прилегающих к устью скважины (область исследования составляла 1,7 м от устья скважины) остается постоянной и примерно равной ее величине перед устьем. Поскольку интенсивность излучения в устье скважины и вблизи него совпадает с величиной фонового электромагнитного излучения в подготовительной выработке, из которой пробурена скважина, то интенсивность фонового электромагнитного излучения в скважине совпадает с интенсивностью фонового электромагнитного поля в горной выработке, из которой исследуемая скважина пробурена. Сказанное справедливо, по крайней мере, для области выработки, примыкающей к устью скважины.

2. Интенсивность фонового электромагнитного поля в скважине отражает изменение напряженного состояния примыкающего к ней участка массива горных пород.

3. Интенсивность фонового электромагнитного излучения в скважинах, а следовательно и в горных выработках, может изменяться, что свидетельствует о процессах изменения напряженного состояния массива.

В день экспериментов в массиве происходили следующие процессы. В начале смены интенсивность излучения находилась на уровне  $x_i = 65$  отн.ед. Затем интенсивность постепенно снижается вплоть до минимальной величины

$x_i = 55-58$  отн.ед. фиксировавшейся, примерно в  $11^{00}$ , по скважине № 18 (табл. 1).

Таблица 3

Отсчеты в начале смены	№№ скважин						
	12	13	14	15	17	18	19
	60; 61	$\frac{60}{61}$	61; 62	$\frac{61}{60}$	$\frac{60}{58}$	58; 56	$\frac{58}{-}$
Отсчеты после 12 <sup>30</sup>	70; 70	70; 70	69; 69	68; 68	68; 68	68; 68	69
Возрастание отсчетов	10.9	10.9	8.7	7.8	8.1	10.1	11

Далее с момента времени 12<sup>30</sup> интенсивность излучения начинает возрастать. Это фиксируется по скважинам №№ 15; 17; 18; 19 (табл. 1), а также по скважинам №№ 1; 2 левого борта (табл. 2). Синхронно происходит изменение напряжений в массиве пород (поскольку, в конечном счете, напряжения ответственны за процессы трещинообразования, порождающего электромагнитную эмиссию).

С момента времени 13<sup>20</sup> (табл. 2) начинается процесс снижения интенсивности электромагнитного излучения. Минимальная интенсивность фиксируется по скважине № 8 примерно в 13<sup>40</sup>. Затем начинается процесс возрастания интенсивности излучения, который продолжается примерно до 14<sup>30</sup> (скважины №№ 27 и 28 по табл. 2). Примерно с момента времени 14<sup>45</sup> начинается снова процесс снижения интенсивности излучения, при этом минимальное значение достигнуто в 15<sup>00</sup> по скважине № 32. Описанный процесс изменения интенсивности электромагнитного излучения по скважинам в виде графика приведен на рисунке. Очевидно этот график отражает и изменение напряжений в рассматриваемом массиве.

Приведенный график удовлетворительно согласуется с технологическими процессами на руднике. В начале смены

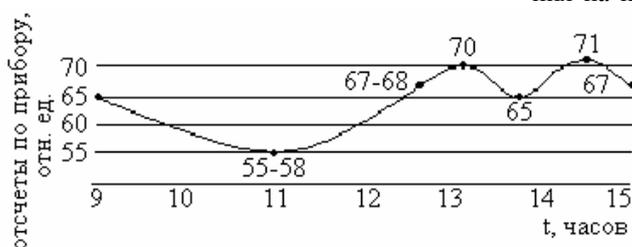


График изменения интенсивности электромагнитного излучения в слоевом штреке 45-12 и в скважинах, пробуренных в его бортах

наблюдается некоторое затишье или стабилизация напряженного состояния. К концу смены развиваются процессы отбойки руды и напряжения возрастают. При этом величина интенсивности излучения в начале смены и в конце смены примерно совпадают. Итак, в начале смены через участок наблюдений проходит отрицательная полуволна горного давления. К концу смены через этот участок проходит положительная полуволна горного давления, осложненная наложением другой волны от технологических процессов на других участках шахтного поля. Суммарную кривую можно представить в виде суммы двух косинусоид с разными амплитудами и разными периодами.

Первая косинусоида

$A \cos(2\pi + \alpha)$  на отрезке времени 9<sup>00</sup>–13<sup>00</sup>.

Вторая косинусоида

$B \cos(2\pi + \beta)$  на отрезке времени 13<sup>40</sup>–14<sup>45</sup>.

Амплитуда  $B < A$ .

В целом процесс представлен на рисунке в виде суммы этих двух косинусоид.

4. Помимо значительных колебаний напряженного состояния массива и соответственно интенсивности электромагнитной эмиссии в скважинах и выработке

в целом, имеют место локальные колебания на небольших участках массива. Так, в скважине № 10 показания прибора сменились 4 раза за

период снятия отсчетов, в скважине № 16 снятие показаний прибора пришлось повторить три раза, чтобы получить устойчивые значения.

Можно предположить, что непрерывные изменения физико-механических

параметров массива в локальных участках, скорее его обычное состояние, а не совокупность случайных изменений, происходящих на фиксированных отрезках времени.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский А.С., Набатов В.В. Оценка трещинообразования в массиве с гипсодериватами породами методом регистрации электромагнитного излучения // ФТПРПИ. – 2003. – № 3. – С. 3–13.
2. Иванов В.В., Егоров П.В., Колпакова Л.А., Пимонов А.Г. Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород // ФТПРПИ. – 1988. – № 5. – С. 20–27.
3. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М.Б. Гохберга / ИЗЗ АН СССР. – М., 1988. – 243 с.
4. Мирешинченко М.И., Куксенко В.С. Измерение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // ФТТ. – 1980. – Т. – 22, № 5. – С. 1531–1533.
5. Яковичкая Г.Е. О некоторых особенностях структуры сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород // ФТПРПИ. – 2004. – № 3. – 20–28.
6. Хачай О.А., Ковгородова Е.Н., Влох Н.П., Худяков С.М. Электромагнитный мониторинг миграции зон повышенной трещиноватости массива при технологическом воздействии // Геомеханика и напряженное состояние недр Земли / Труды международной конференции 4–7 октября 1999. – С. 363–367.
7. Беспалько Ю.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Исследование электромагнитного отклика образцов горных пород при акустическом возбуждении // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Труды международной конференции 2–4 ноября. 2001. С. 132–137.
8. Егоров Л.В., Колмакова Л.А., Мальшин А.А., Бузбанаков А.С., Бобенко А.В., Грибанов К.В. Определение некоторых параметров разрушения горных пород, основанным на регистрации импульсного электромагнитного излучения // Физические проблемы разрушения горных пород / Сб. трудов третьей международной конференции 9–14 сентября 2002 г. Абаза (Хакасия) / Под ред. К.Н. Трубецкого, д.т.н., проф. С.Д. Викторова / – Новосибирск., Наука, 2003 – С. 59–64.

---

#### Коротко об авторах

Кулаков Г.И. – доктор технических наук,  
Бритков Н.А. – ст. научный сотрудник,  
ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия.



---

© Т.В. Кадыкова, 2005

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ПРИ  
СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**А**ктуальность работы заключается в том, что в проблеме исследования строительных сооружений сейсмическим методом необходимо теоретическое подкрепление. Подход состоит в решении задач строительной механики для определения внутренних усилий, влияющих на изменение скорости сейсмических волн. Для этого составляются уравнения равновесия сил и рассчитываются моменты сил и т.д.

Цель работы - показать целесообразность теоретического подхода в описании свойств сейсмических волн при исследовании трещиноватости исследуемого объекта. Теоретическая задача – описать элемент конструкции дифференциальным уравнением и получить рисунок распределения внутренних усилий.

Нам надо решить задачу в постановочном плане сейсмического профилирования здания. Для этого необходимо представление о распределении сил и напряжений конструкции. Тогда можно будет сопоставить результаты интерпретации сейсмических данных и объяснить, почему в том или ином случае происходят, например, изменения скоростей волн, и после некоторого анализа выделить зоны и степень трещиноватости.

В данной работе рассматривается метод, позволяющий оперативно проводить инженерно-сейсмометрические обследования строительных конструкций по экспериментальным данным решается задача обследования консольной балки через

уравнения равновесия балки и алгоритмы расчета напряженного состояния.

Предложенная методика сейсмометрических измерений обладает большой производительностью и малой степенью затрат [1, 2]. Для сейсмических исследований строительных сооружений, в отличие от сейсморазведки, достаточно использовать 12-канальную станцию. Итогом работ служит анализ сейсмограмм, полученных после проведения работ. По обработанным сейсмограммам определяем необходимые параметры волн и по ним уже судим о степени нарушенности объекта. Используя предыдущий опыт, можно сказать, что для решения такой задачи требуется дополнительная теоретическая основа для обоснования выводов. Такой основой может служить картина распределения внутреннего напряжения и моментов сил, т.к. параметры прохождения сейсмических волн через среду во многом зависят от степени напряженности объекта. В более напряженных средах скорости сейсмических волн будут выше. Этот момент необходимо учитывать при анализе сейсмограмм.

Итак, имеется железобетонная балка Б-2 протяженностью 18,680 м, высотой 3,66 м (см. рис. 1, 2). Один конец балки жестко закреплен в стене, на противоположный конец действует сосредоточенная постоянная нагрузка  $P$ . На расстоянии 8,680 от закрепленного конца и на другом конце балки есть опоры.



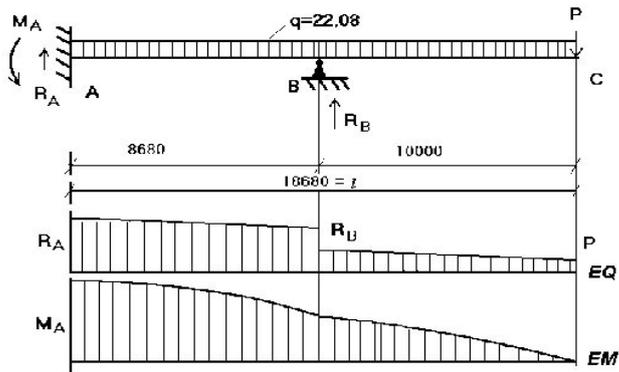


Рис. 3. Схема нагружения балки Б-2

Сравнивая полученные данные с результатами оценки несущей способности балки Б-2 с результатами ранее выполненных оценок данной балки, выполненной в 1995-1997 гг. заслуженным деятелем науки РФ, профессором Скоробогатовым С.М., убеждаемся, что угроза разрушения балки отсутствует.

Для еще одного подтверждения и повышения достоверности полученных оценок использовался сейсмометрический метод оценки состояния строительных элементов и железобетонных балок [1]. В сейсмометрии обследование проводят за счет свойств волн. Здесь постановка задачи строится следующим образом.

Известно, что в неоднородной среде, упругие свойства которой изменяются по гармоническому закону, распространяется упругая волна с частотой  $f$ , имеющая в текущей точке  $M$  с координатами  $x, y, z$  эффективную фазовую скорость  $V_f(x, y, z)$ , определяемую упругими параметрами среды в некоторой окрестности  $W(\lambda)$  точки  $M$ , где  $\lambda = V/f$  - длина волны. Требуется определить размеры зоны  $W(\lambda)$ .

В трещиноватой среде скорость всегда меньше, чем в сплошной. При наличии тонких трещин уменьшение скорости распространения упругих волн связано с самим характером передачи энергии от одной отдельности к другой при отсутствии упругой связи между ними. В этом случае передача упругих возмущений внутри

наблюдается эффект огибания трещины волной. Это также приводит к уменьшению скорости этой волны вследствие увеличения дистанции пробега между источником колебаний и сейсмоприемником.

После регистрации прямого и обратного хода были построены годографы и вычислены интервальные скорости продольных и поперечных волн по формулам:

$$V_{p_i} = \frac{l_{i+1} - l_i}{t_{i+1} - t_i}, \text{ [м/с]}$$

где  $V_{p_i}$  - скорость продольной волны в трещиноватой среде, распространяющейся нормально  $i$ -му ряду трещин;  $t_i$  - время прихода волны к  $i$ -му сейсмоприемнику, с;  $t_{i+1}$  - время прихода волны к последующему сейсмоприемнику, с;  $l_i$  - стоянка  $i$ -ого сейсмоприемника, м;  $l_{i+1}$  - стоянка последующего сейсмоприемника, м.

Тогда степень трещиноватости  $pt_i$  среды может быть приближенно определена по результатам измерения скоростей продольных волн в исследуемой среде:

$$pt_i = \frac{(1-b)^2}{A_i(1/b-m)} - b$$

где  $b = E_2/E_1$  - соотношение модулей упругости заполнителя трещин  $E_2$  и самой среды  $E_1$ ;  $A_i = (V_{p_i}/V_{p_1})^2$  - акустический показатель трещиноватости;  $V_{p_1}$  - скорость продольной волны в ненарушенной среде;  $m = \rho_2/\rho_1$  - соотношение плотностей заполнителя трещин  $\rho_2$  и среды  $\rho_1$ .

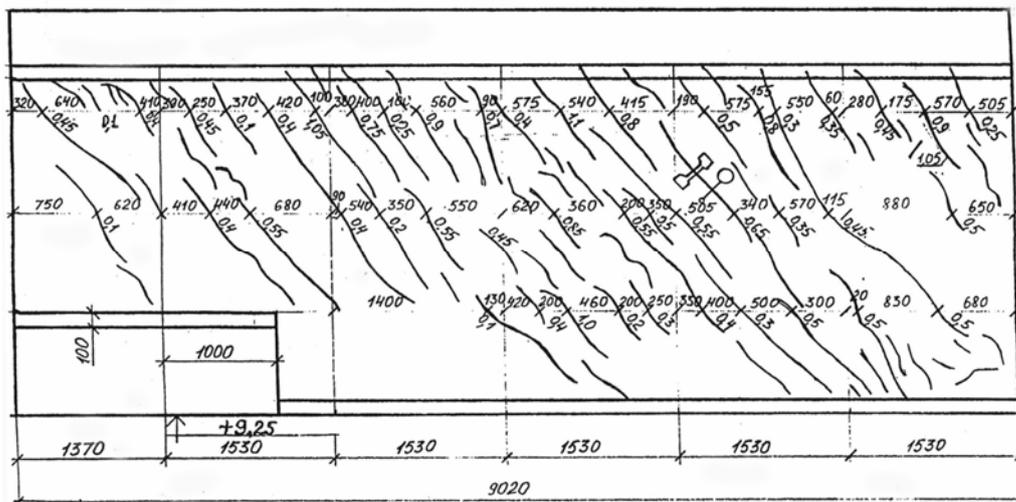


Рис. 4. Одна из картин расположения трещин в балке Б2 (по данным С.М. Скоробогатова)

Изучение распространения сейсмических волн в зданиях и инженерных сооружениях или их элементах представляет вполне обоснованный интерес при определении их устойчивости. Рассматриваемая балка является одним из основных несущих элементов уникального здания Екатеринбургского государственного цирка, поэтому полученное решение является необходимым этапом в оценке безопасности дальнейшей эксплуатации этого социально весьма значимого объекта. Например, исследованиями ученых УрГУПС в 1995-1998 гг.

были визуально выявлены нарушения в данной балке в виде системы наклонно ориентированных трещин (см. рис. 4). Сейсмометрическими исследованиями также установлено, что состояние балки находится за пределами допустимых норм [1, 2].

Было доказано, что без реконструкции дальнейшая эксплуатация здания невозможна и было рекомендовано выполнить его реконструкцию. После реконструкции в 1998 г. было показано, что поставленная цель достигнута и эксплуатация здания была продолжена. В настоящее время данная балка находится в режиме допустимых нагрузок, в т.ч. благодаря проведенному анализу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухаметишин А.М., Яковлев М.В., ..., Скоробогатов С.М. и др. К вопросу сейсмической безопасности антропогенной среды от угрозы техногенных катастроф/ Неделя горняка-2000, Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во МГГУ, 2000, №6, С. 155-161.

2. Мухаметишин А.М., Скоробогатов С.М., ..., Кадыкова Т.В. и др. Перспективность сейсмометрического метода горной геофизики в методике экспрессного исследования железобетонных конструкций. Горный информационно-аналитический бюл., – М.: Изд-во МГГУ, 2002, №11, С. 102-108.

#### Коротко об авторах

Кадыкова Т.В. – аспирант, ИГД УрО РАН.

УДК 622.281.8

А.М. Мухаметшин

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КРЕПЛЕНИЯ АНКЕРНОЙ КРЕПИ

Семинар №2

При подземной геотехнологии добычи руд известна проблема оценки качества закрепления анкерной крепи в горном массиве. Например, анкеры в шпурах закрепляются бетоном, быстро твердеющими растворами или путем расклинивания (рис. 1).

После закрепления анкерные болты должны удерживать стенки закрепленной выработки в ненарушенном состоянии, т.е. обеспечить безопасность пользования выработкой на данном участке. Для оценки качества закрепления анкерных болтов в горном массиве предлагается использовать упругие колебания, возбуждаемые естественным или искусственным путем. Причем прохождение упругих волн через систему: анкерный болт – горный массив, можно анализировать следующим образом.

Считаем, что упругие колебания, возбуждаемые в горном массиве имеют весьма широкий спектр частот, перекрывающий значения частот собственных, в т.ч. резонансных колебаний выделенной выше системы. Для приема, регистрации и анализа упругих колебаний может быть использована любая сейсмоакустическая аппарату-

ра, первичным преобразователем в которой используется, например, геофон. Последний можно закрепить на конце анкерного болта с помощью резьбы. При этом наблюдается следующая схема: анкерный болт нагружен на подвижно зажатом конце и является зажатым, т.е. закрепленным на другом конце, в горном массиве (см. рис. 1, а). Такую конструкцию в строительной механике можно рассчитать на основе следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho A} \cdot \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0, \quad (1)$$

где  $U$  – амплитуда поперечных колебаний, по координате  $y$ ;  $I$  – момент инерции анкерного болта, определяемый из следующего выражения:

$$I = \frac{1}{12} Ah^2, \quad (2)$$

где  $h$  – диаметр анкерного болта;  $\rho$  –

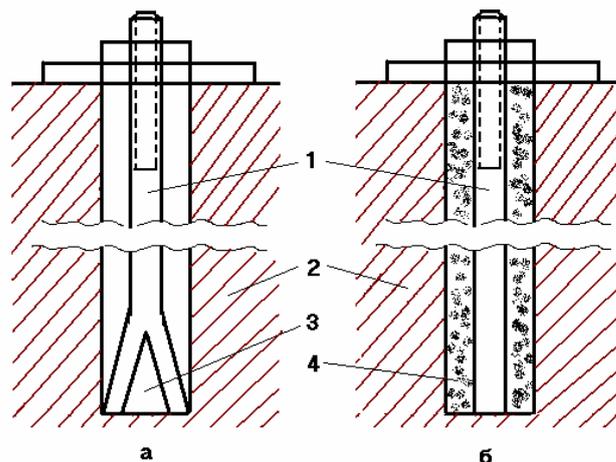
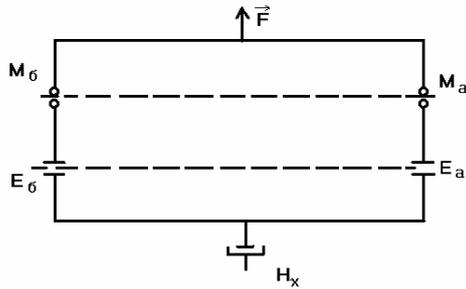


Рис. 1. Схема закрепления анкерного болта в массиве горных пород (а – с помощью клина, б – с помощью бетона): 1 – анкерный болт, 2 – горный массив, 3 – клин, 4 – бетон



**Рис. 2. Схема механической системы:**  $\vec{F}$  – механическое воздействие на анкер (т.е. упругое воздействие);  $M_б$  и  $M_а$  – соответственно, массы бетона и анкерного болта;  $E_б$  и  $E_а$  – модули упругости бетона и анкерного болта;  $H_x$  – декремент затухания

плотность материала болта;  $E$  – модуль упругости болта.

Известны решения по определению собственных колебаний подобных стержней [1]. Но в данном случае масса геофона (на рис. 1 не показан) более чем в 10 раз меньше массы анкерного болта, поэтому в решении влияние геофона не учитывается.

Резонансные частоты  $\omega_p$  собственных поперечных колебаний рассчитывают из решения уравнения (1) в следующем виде [1]:

$$K^4 = \frac{\rho A}{EI} \omega_p^2, \quad (3)$$

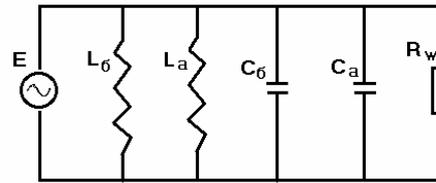
где  $\omega_p$  – меняется для выделяемых мод колебаний.

Полученные данным путем резонансные частоты составили таблицу (см. табл. 1).

Таблица 1

Номер моды	1	2	3
$K^2$	1,4	2,7	4,7
$\omega$ , Гц	176,6	349,5	599,1

Для расчета конструкции, когда анкерный болт закреплен бетоном (рис. 1, б) использовался метод электромеханиче-



**Рис. 3. Схема электрического аналога рассматриваемой системы:**  $E$  – электродвижущая сила системы;  $L_б$  и  $L_а$  – индуктивности соответственно бетона и анкерного болта, аналогично и емкости  $C_б$  и  $C_а$ ;  $R_w$  – омическое сопротивление, аналог  $H_x$  (рис. 2)

ских аналогий [2]. При этом систему можно представить в следующем виде (рис. 2).

Соответствующая электрическая аналогия представляется в виде, приведенном на рис. 3. Аналогом смещения в этом случае будет электрический ток на нагрузке  $R_w$ .

При условии резонанса токов:

$$X_L = \frac{1}{C} X_C,$$

Токи в соответствующих цепях составят следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{X_L} &= \frac{1}{j\omega L_б} + \frac{1}{j\omega L_а}; \\ \frac{1}{X_C} &= j\omega C_б + j\omega C_а. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

И в окончательном виде резонансные частоты определяются из выражения:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{L_б + L_а}{L_б L_а (C_б + C_а)}}, \quad (5)$$

В анализируемой системе  $R_w$  влияет таким образом, что при его увеличении добротность контура уменьшается, а полоса пропускания увеличивается, т.е. для наименьшего искажения упругих колебаний необходимым условием является  $R_w = 0$ . Это может реализовываться при практически нулевых потерях на границах порода – бетон и бетон – сталь. Очевидно,

что практически это не реализуется, но может быть использовано для решения поставленной выше проблемы.

Рассчитанные резонансные частоты ( $f_0$ ) системы крепления анкерного болта в зависимости от закрепленной длины его в шпуре ( $L_{ш}$ ) составляет следующие величины (см. табл. 2).

Таблица 2

$L_{ш}$ , м	2,2	2	1,5	1,0	0,5
$f_0$ , Гц	43,0	43,3	50,2	61,1	86,9

Таким образом, показано, что с помощью геофонов задача оценки качества закрепления анкерного болта в шпуре с помощью бетонов, твердеющих растворов или клиньев вполне удовлетворительно решается на основе анализа частотных (или иных) параметров возбуждаемых упругих колебаний.

Частоты, как следует из табл. 1 и 2 имеют существенные различия, которые оперативно и относительно просто можно фиксировать, а в конечном счете оперативно решать поставленную задачу.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов М.С. Теория геофонов и виброметров звукового диапазона. – М.: Наука, 1986.

2. Гамбурицев Г.Л. Основы сейсморозведки. – М.: Гостехиздат, 1959.

#### Коротко об авторах

Мухаметшин А.М. – ИГД УрО РАН.

---

#### НОВИНКИ

#### ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Эткин М.Б., Азаркович А.Е. Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве: Научно-практическое руководство. — 317 с.: ил.

ISBN 5-7418-0329-6 (в пер.)

Рассмотрено производство взрывных работ на карьерах стройиндустрии, при сооружении котлованов ответственных строительных объектов, в дорожном строительстве в горной местности, при строительстве каналов и водоемов взрывами на выброс, строительстве взрывонабросных плотин, реконструкции промышленных и энергетических объектов, а также при проведении подземных горных выработок. Приведены примеры строительства крупных объектов.

*Для специалистов-взрывников, занимающихся проектированием и производством взрывных работ в строительстве и промышленности. Может быть полезна преподавателям высших и средних учебных заведений, аспирантам и студентам, специализирующимся в области взрывного дела.*

УДК 622.235



---

© Н.А. Мирошниченко,  
Е.В. Рубцова, 2005

*Н.А. Мирошниченко, Е.В. Рубцова*

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ИНФОРМАЦИОННОМУ  
МОДЕЛИРОВАНИЮ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

Семинар № 2

**В**опросами создания научного инструментария для изучения геодинамических процессов в массиве горных пород активно занимаются не один десяток лет многие зарубежные и российские коллективы разработчиков. Можно привести достаточно представительный список систем мониторинга, создаваемых с целью обеспечения безопасности при проведении горных работ. В настоящее время при разработке таких систем особую актуальность приобретает использование современных информационных технологий. За рубежом создан целый ряд горно-геологических информационных систем, наиболее распространенными среди которых являются: DATAMINE (MIC Ltd, Великобритания), VULCAN (Maptec, Австралия), MINESCAPE (Mincom, Австралия), GEMCOM (Gemcom Software, Канада), TECHBASE (Minesoft, США), SURPAC (Software International, Австралия), MICROMINE (Micromine Pty Ltd, Австралия). Основным назначением предлагаемых систем является обработка геологических данных, геолого-маркшейдерское обслуживание, планирование и проектирование открытых и подземных горных работ с целью оптимизации производства. В состав программного обеспечения входят специализированные средства построения цифровой модели месторождения, основанные на геоинформационных технологиях обработки и хранения исходных данных. Системы строятся по модульному принципу, и их функциональные возможности зависят от числа и назначения используемых модулей.

Несмотря на то, что перечисленные системы получили достаточно широкое распространение и эксплуатируются на многих крупных горно-рудных предприятиях за рубежом, опыт их применения в отечественной практике очень мал (программа MINESCAPE эксплуатируется на шахте «Распадская», пакет DATAMINE освоен в институте «Уралгипроруда», внедряется в АК «Алроса», система TECHBASE используется на монголо-российском предприятии «Эрдэнэт», Михайловском ГОКе).

К основным причинам, сдерживающим применение зарубежных программных пакетов, следует отнести достаточно высокую их стоимость; удаленность разработчиков и сложность оперативной адаптации к отечественным стандартам ведения горных работ; отсутствие на большинстве отечественных горных предприятий специалистов, обладающих достаточным уровнем квалификации для использования сложных не русифицированных программных продуктов.

В отечественной горной практике зарубежные информационные системы используются преимущественно для оценки запасов полезных ископаемых и планирования горных работ, при этом опыт их использования для целей геомеханического контроля и диагностики опасных состояний породного массива на сегодняшний день отсутствует.

Вопросами создания геоинформационных систем, ориентированных на решение задач контроля геомеханического состояния массива, занимаются во ВНИМИ [1], ИУУ СО РАН [2], ИПКОНе [3], ГоИ КНЦ РАН

[4]. Программные средства разрабатываются на основе универсальных СУБД (Access, Oracle) и стандартных пакетов (Microstation, AutoCAD, RastrArts, Softdesk, Mechanical Desktop), либо с использованием универсальных ГИС (Arc View 3.0).

Трудности информационного моделирования геосреды связаны, в первую очередь, с такими факторами, как: недостаточность информации о её составе и структуре, о развивающихся в ней физических процессах; ограниченность доступа к среде для проведения постоянных долговременных наблюдений и измерений; отсутствие адекватных математических моделей, всесторонне отражающих поведение исследуемого объекта.

Характеризуя объект исследований, следует обозначить его как сложную, разнородную, неформализованную, изменяющуюся во времени, труднодоступную для измерений, плохо управляемую, подвергающуюся разного рода техногенным воздействиям геосреду, физические процессы в которой протекают в широком диапазоне скоростей.

Соответственно, при создании модели, наиболее полно отвечающей оригиналу, следует учитывать такие факторы, как:

- большое число физических процессов, развивающихся в исследуемой геосреде, и отношений между ними;
- необходимость нетривиальной корректной обработки рядов натуральных наблюдений вследствие неполноты данных и погрешности измерений;
- обеспечение механизма настройки, проверки и корректировки модельных представлений по выборкам измерительных данных;
- обеспечение отображения поведения объекта в динамике на основании текущей и ретроспективной измерительной информации;

- обеспечение доступа в реальном времени к модельным построениям различных групп пользователей.

В качестве эффективных математических методов для изучения динамики поведения геосреды применяют два основных: аналитический и имитационный. Совместное их использование обеспечивает достижение высокого уровня детализации в модельном описании поведения исследуемого объекта и получение численной оценки степени удароопасности текущего состояния среды [5, 6].

В настоящее время все чаще используют комплексные математические и информационные модели, позволяющие учитывать сложный характер исследуемых процессов и явлений на основе современных информационных технологий.

В предлагаемом подходе основу информационной модели составляет объемная модель структуры контролируемой геосреды, в которой с различным и необходимым уровнем детализации в перспективе предполагается отражать потенциально наиболее опасные регионы.

Информационная модель представляется как совокупность изменяющихся во времени полей физико-механических свойств точек геомеханического пространства. Для описания этих полей определяются объекты и события различных типов, отображаемые при этом на ось времени. Каждому объекту ставятся в соответствие его пространственные параметры и набор физико-механических свойств. Под пространственными параметрами подразумеваются геометрические формы объектов и их взаимное расположение с привязкой к выбранной системе координат. К физико-механическим свойствам можно отнести: модуль упругости, прочность, вязкость, электрическое сопротивление, параметры акустической и электромагнитной эмиссии, сейсмические и микросейсмические параметры, перемещения участков массива и т.п.

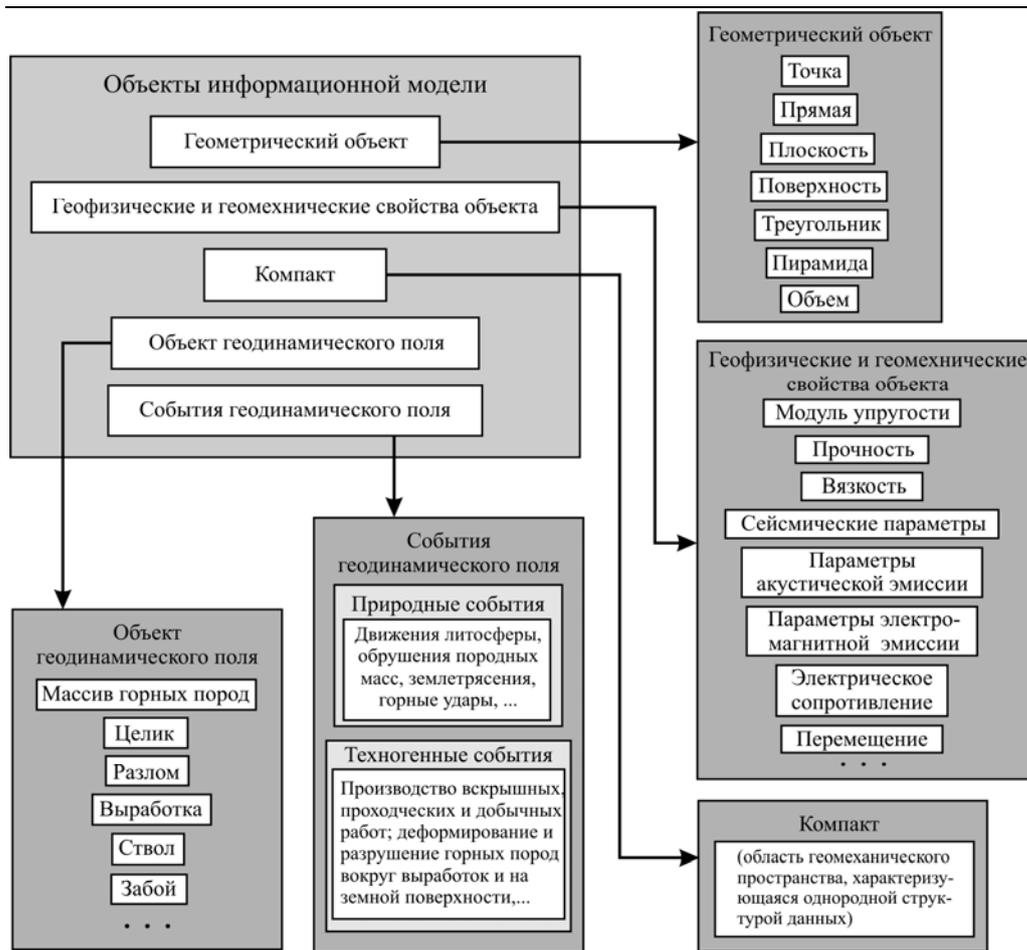


Рис. 1. Структура классов объектов информационной модели геомеханического пространства

Отдельные объекты могут представлять собой сложную структуру, образованную некоторой совокупностью подобъектов, которые в свою очередь могут быть как элементарными, так и иметь собственную вложенную структуру (рис. 1).

Элементарный объект определяется как компакт – некоторая область геомеханического пространства, характеризующаяся однородной структурой данных [7]. Совокупное множество компактов отображает структуру и свойства исследуемого геомеханического пространства в целом.

В качестве геометрической модели компакта выбрана треугольная пирамида, как наиболее удобный элемент, позволяющий с достаточной точностью и минимальными затратами вычислительных ресурсов производить линейную аппроксимацию геометрической формы выделенных объектов пространства. Для отображения информационной модели в виде совокупности компактов производится объемная триангуляция, которая является базовым методом, нашедшим широкое применение в решении пространственных задач вычислительной геометрии,

машинной графике и геоинформационных системах.

Вообще, задача оптимального разбиения геомеханического пространства зачастую является нетривиальной. С одной стороны, на каждый элемент разбиения могут накладываться жесткие ограничения, с другой – внутри исследуемого объекта иногда возникают характерные области, где параметры изменяются достаточно резко. Такие области требуют более частого разбиения. Основываясь на приведенном в [8] подробном обзоре существующих алгоритмов триангуляции, применительно к задачам исследования геодинамических процессов, развивающихся в массиве горных пород, с учетом его блочного строения выбраны и предложены к реализации такие алгоритмы разбиения, как:

- регулярная триангуляция;
- триангуляция по опорным точкам (о свойствах и пространственно-временных координатах которых в базе данных имеется информация);
- иерархическая триангуляция по опорным точкам посредством последовательной детализации/укрупнения блочной структуры геосреды.

В плане разработки программного обеспечения информационной геодинамической модели геосреды создан проект подсистемы моделирования геометрии геомеханического пространства, ядром которой является библиотека классов СУБД Cashe - новой постреляционной разработки фирмы Inter-Systems. Данная подсистема обеспечивает триангуляцию параллелепипеда, вмещающего в себя моделируемое геомеханическое пространство, по заданным координатам опорных точек. В ее составе определены следующие классы: Point – точка геомеханического пространства, заданная пространственными координатами;

Time – временные координаты точки геомеханического пространства; Properties – физико-механические свойства точки; Line – линия (отрезок прямой, проходящей через две точки); Plane – плоскость (объект геомеханического пространства, заданный тремя точками); Hull – оболочка (множество точек геомеханического пространства, образующих кусочно-линейную поверхность); Triangle – треугольник (множество точек, принадлежащих плоскости, ограниченное тремя прямыми); Pyramid – пирамида (множество точек геомеханического пространства, ограниченное четырьмя плоскостями); Triangulate – множество пирамид, образующих триангуляцию геомеханического пространства.

Пример трехмерной модели залежи полезного ископаемого, полученный посредством данной подсистемы моделирования в графической среде MatLab, приведен на рис. 2.

Принимая во внимание возможное разнообразие модельных представлений о событиях и процессах в исследуемом объекте, информационную неполноту, длительный период формирования модели с последующим необходимым ее уточнением на основании данных распределенного мониторинга, подход к моделированию геосреды представляется как создание открытого развивающегося комплекса моде-

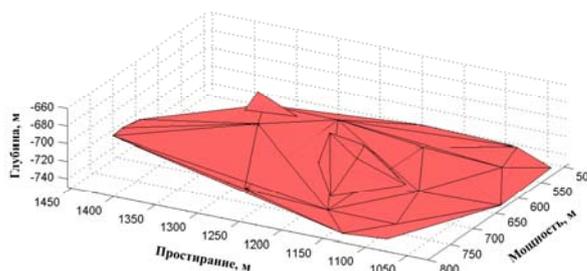


Рис. 2. Модель залежи полезного ископаемого

лей измерения, оценивания и прогнозирования состояния исследуемого объекта. Именно интеграция различных моделей и информационных ресурсов на базе современных геоинформационных систем, совмещенных с электронными библиотеками, дает возможность ожидать ощутимого эффекта в решении проблемы диагностики и раннего распознавания

опасных ситуаций на горнодобывающих объектах и рассчитывать на получение новых знаний о геосистемах.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта №134 «Разработка информационной геодинамической модели строения Кузнецкого угольного бассейна для целей прогнозирования катастрофических природных и техногенных явлений».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулев С.Н. Геоинформационная система мониторинга геодинамических процессов // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб.: ВНИМИ, 1999.
2. Потапов В.П. Математическое и информационное моделирование геосистем угольных предприятий. – Новосибирск, изд-во СО РАН, 1999.
3. Негурица Д.Л. Применение геоинформационных систем для расчета смещений и деформаций земной поверхности // Уголь. – 1998. – № 12.
4. Козырев А.А., Калашиник А.И. О применении информационных технологий для решения задач геомеханики при освоении минерально-сырьевых ресурсов Кольского полуострова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд. МГУ, 1999. – № 4.
5. Беляков В.Г., Леонтьев А.В., Мирошниченко Н.А., Рубцова Е.В., Ярославцев А.Ф. Система вероятностно-временных моделей динамики блочного массива // ФТПРПИ. – 2000. – №3. – С. 42-53.
6. Беляков В.Г., Леонтьев А.В., Мирошниченко Н.А., Рубцова Е.В. Блочная модель в реализации прогнозной компоненты геомеханического мониторинга // ФТПРПИ. – 2003. – №4. – С. 27-44.
7. Беляков В.Г., Курленя М.В., Леонтьев А.В. и др. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга Часть 2. Структура данных и моделей // ФТПРПИ. – 1996. – №6. – С. 3-18.
8. Скворцов А.В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – Т.3. – С. 14-39.

#### Коротко об авторах

Мирошниченко Н.А. – кандидат физико-математических наук,  
Рубцова Е.В. – кандидат технических наук;  
Институт горного дела СО РАН

