

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ  
СЕЙСМОДЕФОРМАЦИОННОГО  
МОНИТОРИНГА  
ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
И ГОРНЫХ УДАРОВ**

Том 1



ИНТЕГРАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

Вып. 24 | 2009

**ИНТЕГРАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ СО РАН**

**Вып. 24**

**SB RAS INTEGRATED PROJECTS**

**Issue 24**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
SIBERIAN BRANCH  
INSTITUTE OF MINING  
NOVOSIBIRSK BRANCH OF A. V. RZHANOV INSTITUTE  
OF SEMICONDUCTOR PHYSICS TDI OF APPLIED MICROELECTRONICS  
INSTITUTE OF LASER PHYSICS  
A. A. TROFIMUK INSTITUTE OF OIL-AND-GAS  
GEOLOGY AND GEOPHYSICS  
INSTITUTE OF COAL AND COAL CHEMISTRY  
TECHNOLOGICAL DESIGN INSTITUTE  
OF SCIENTIFIC INSTRUMENT-MAKING  
URAL BRANCH  
INSTITUTE OF MINING  
INSTITUTE OF GEOPHYSICS  
MINING INSTITUTE  
KOLA SCIENTIFIC CENTER  
MINING INSTITUTE  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF RUSSIAN FEDERATION  
FEDERAL AGENCY OF EDUCATION  
NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
SIBERIAN STATE ACADEMY OF GEODESY  
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
INSTITUTE OF MINING GEOLOGY,  
GEOPHYSICS AND SURVEYING

**METHODS AND INSTRUMENTS FOR  
SEISMIC-AND-DEFORMATION MONITORING  
OF TECHNOGENIC EARTHQUAKES  
AND ROCK-BURSTS**

Volume 1

Editor  
Academician N. N. Melnikov



NOVOSIBIRSK  
PUBLISHING HOUSE OF THE SIBERIAN BRANCH  
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
2009

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА  
НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
им. А. В. РЖАНОВА  
КТИ ПРИКЛАДНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ  
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А. А. ТРОФИМУКА  
ИНСТИТУТ УГЛЯ И УГЛЕХИМИИ  
КТИ НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА  
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ  
И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА

# **МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ СЕЙСМОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ГОРНЫХ УДАРОВ**

Том 1

Ответственный редактор  
академик Н. Н. Мельников



НОВОСИБИРСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
2009

УДК 550.3+55:531  
ББК 26.21+26.3+38.58  
М54

*Редакционная коллегия серии:*

академик В. М. Фомин (главный редактор), академик Ю. И. Шокин, член-корреспондент РАН В. А. Ламин, член-корреспондент РАН В. Н. Опарин, доктор биологических наук В. В. Глупов, доктор экономических наук В. Ю. Малов, доктор химических наук В. П. Федин, кандидат физико-математических наук Н. Г. Никулин (ответственный секретарь)

Серия основана в 2003 г.

**Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов: Том 1** / [В. Н. Опарин и др.]; отв. ред. Н. Н. Мельников; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела [и др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 304 с. — (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 24).

Монография посвящена разработке методов и созданию систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов для натурных исследований деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. Рассмотрены вопросы описания поведения структурных геосред при упругом и неупругом деформировании, прикладные задачи, связанные с движением волн в таких средах. Представлены разработки измерительной аппаратуры и систем сейсмодеформационного мониторинга для рудников и шахт Сибири, Урала, Кольского полуострова, Донбасса (Украина).

Издание адресовано геомеханикам, геофизикам, научному и инженерно-техническому персоналу научно-исследовательских, проектно-испытательских институтов, технологам горно-добывающих предприятий, разработчикам систем измерений деформаций и сейсмических сигналов в геосредах, будет полезна преподавателям, аспирантам и магистрантам университетов и вузов горного профиля.

Утверждено к печати

Ученым советом Института горного дела СО РАН

Ученым советом Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН

Ученым советом Института лазерной физики СО РАН

*Рецензенты:*

доктор физико-математических наук *Л. А. Назаров*,  
доктор геолого-минералогических наук *А. Д. Дучков*,  
доктор технических наук *В. Л. Шкуратник*

Авторы:

В. Н. Опарин, С. Н. Багаев, А. А. Маловичко, А. В. Анциферов, А. А. Козырев, Ю. В. Чугуй, В. П. Потопов, В. А. Орлов, В. И. Юшин, А. Г. Вострецов, В. М. Семибаламут, В. Н. Федоринин, Л. Н. Сенин, В. А. Середович, А. В. Леонтьев, Г. И. Кулаков, Г. Е. Яковицкая, В. И. Востриков, А. К. Поташников, М. Г. Тиркель, А. А. Глухов, А. С. Трифонов, В. В. Туманов, Н. И. Геза, С. В. Плотников, А. С. Танаино, Н. А. Мирошниченко, Р. А. Дягилев, В. И. Панин, С. Н. Савченко, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова, А. В. Кривецкий, А. А. Бизяев, В. И. Сидоров, А. В. Иванов.

*Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 93  
«Разработка методов и создание систем сейсмодеформационного  
мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов» (2006—2008 гг.)*

ISBN 978-5-7692-1110-2 (вып. 24)  
ISBN 978-5-7692-0669-6

- © Институт горного дела СО РАН, 2009
- © Новосибирский филиал института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН КТИ прикладной микроэлектроники, 2009
- © Институт лазерной физики СО РАН, 2009
- © Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А. А. Трофимука СО РАН, 2009
- © Институт угля и углехимии СО РАН, 2009
- © КТИ научного приборостроения СО РАН, 2009
- © Институт горного дела УрО РАН, 2009
- © Институт геофизики УрО РАН, 2009
- © Горный институт УрО РАН, 2009
- © Горный институт КНЦ РАН, 2009
- © Новосибирский государственный технический университет, 2009
- © Сибирская государственная геодезическая академия, 2009
- © Институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела НАН Украины, 2009
- © Оформление. Издательство СО РАН, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая вниманию читателя двухтомная монография является итогом выполнения междисциплинарного интеграционного проекта Сибирского, Уральского отделений РАН, Кольского научного центра РАН, Национальной академии наук Украины, ряда высших учебных заведений г. Новосибирска (научные координаторы: член-корр. РАН В. Н. Опарин, член-корр. РАН А. А. Маловичко, докт. техн. наук А. В. Анциферов). Интеграционный проект № 93 СО РАН имеет название, по существу совпадающее с названием данной монографии: «Разработка методов и создание систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов». Авторы книги являются основными исполнителями проекта и представителями научных коллективов Сибирского отделения РАН: Института горного дела, Института лазерной физики, Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука, Института угля и углехимии, Конструкторско-технологического института научного приборостроения, филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники; Уральского отделения РАН: Института горного дела, Горного института, Института геофизики; Горного института Кольского научного центра РАН; Института горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела НАН Украины; Новосибирского государственного технического университета, Сибирской государственной геодезической академии.

Техногенная сейсмичность проявляется при взаимодействии человека с геологической средой. Причины ее возникновения многообразны: при выполнении горных работ в карьерах и рудниках на больших глубинах, заполнении водохранилищ, добыче нефти и газа, проведении подземных ядерных взрывов и т. д. По уровню проявления техногенная сейсмичность изменяется от слабых толчков до катастрофических землетрясений, поэтому она — важный объект исследований не только сейсмологов, но и специалистов горного дела, гидростроителей, разработчиков нефти и газа, строителей наземных и подземных сооружений. Как представляется, основные усилия в проблеме техногенной сейсмичности должны быть направлены на ее прогнозирование и профилактику, а последняя может быть обеспечена только на основе объективных законов эволюции геологической среды в зонах природно-технических систем и надежной диагностики ее состояния. Следовательно, главной задачей в решении этой проблемы должно быть изучение геомеханических условий эволюции геологической среды при горных работах в напруженных горных массивах, что связано с:

обеспечением устойчивого инструментального мониторинга геологической среды;

развитием и разработкой модельных представлений эволюции геологической среды на всех этапах ее функционирования;

поиском эффективных критериев и диагностики предельных состояний горных массивов и отдельных их участков, разработкой соответствующих методик.

Междисциплинарные научные исследования и научно-технические разработки в плане создания систем и методов сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов проводились по следующим направлениям:

разработка методов и создание комплексов приборов для натуральных исследований деформационно-волновых процессов в горных массивах и на земной поверхности;

разработка методологии построения и создания систем сейсмодеформационного мониторинга природных и техногенных землетрясений и горных ударов;

экспериментальные исследования геомеханическими, геодезическими и геофизическими методами закономерностей формирования техногенных очаговых зон катастрофических событий с целью их прогнозирования, предотвращения и профилактики;

физическое и математическое моделирование процессов деструкции в очаговых зонах концентрации напряжений и особенностей динамического поведения блочных геосред при внешних импульсных воздействиях;

совершенствование систем обработки сейсмологических наблюдений землетрясений и горных ударов и мониторинг сейсмического отклика тектонических нарушений на разработку месторождений полезных ископаемых Урала, Сибири и Кольского п-ова.

За период 2006—2008 гг. основное внимание уделялось научным исследованиям и научно-техническим разработкам, создающим методико-методологическую и измерительную базу для построения новых систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. В основу создания таких систем положены, в первую очередь, современные достижения в области нелинейной геомеханики и геофизики, а также потребность в учете включенности геомеханических пространств обрабатываемых месторождений полезных ископаемых в более общее — геодинамическое.

В первом томе настоящей монографии отражены основные технические разработки и научные исследования, связанные с новыми методами, приборами и измерительными системами в геомеханико-геодинамических исследованиях. Дано развитие основ электромагнитно-эмиссионных методов диагностики состояний критичности горных пород, а также сейсмического мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород при отработке угольных месторождений. Представлены разработки, относящиеся к методологическим основам и геоинформационному обеспечению систем геомеханико-геодинамического мониторинга на примере шахт Кузбасса. В заключительной главе настоящего тома описаны методологические основы мониторинга геологической среды и способы управления рисками на примере рудников Кольского полуострова.

В области научного приборостроения наиболее значимые результаты получены в совместных работах ИГД, КТИ НП и филиала ИФП КТИ ПМ СО РАН по совершенствованию многоканального измерительно-вычислительного комплекса типа МОЭД-1п для совместной регистрации сейсмоакустических колебаний, сигналов электромагнитной эмиссии (ЭМИ), продольных и поперечных деформаций в структуре горного массива при натуральных исследованиях нелинейных деформационно-волновых и электромагнитно-эмиссионных процессов в геосредах, а также в разработках, выполненных в рамках плановых заданий проекта по созданию ла-

зерного деформографа (ИЛФ СО РАН), сейсмоизмерительной станции на базе системы «ЛАВА» (ИНГГ СО РАН) и датчиков ЭМИ (НГТУ).

Разработка экспериментально-методических основ решения проблемы контроля состояния горного массива, подверженного воздействию техногенных факторов, в условиях угольных шахт Донбасса (Украина), проведение экспериментальных исследований корреляционных связей кинематических и динамических параметров активных и пассивных волновых полей с плотностью геодинамических проявлений (горные удары, техногенные землетрясения, внезапные выбросы угля и газа и др.) в горном массиве, изучение развития во времени и пространстве проявления в исследуемых параметрах упругих волн геодинамических процессов в горной среде на подрабатываемых территориях осуществились УкрНИМИ НАН Украины.

Важные методические и экспериментальные результаты деформационного совместно с электромагнитной эмиссией и сейсмоакустического контроля, полученные в натуральных условиях и отражающие структурное строение и специфику поведения геоблоков в горном массиве, представлены в совместной работе ИГД, филиала ИФП КТИ ПМ, ИНГГ, КТИ НП СО РАН и СГГА, выполненной на карьере ОАО «Искитимраморгранит». Вопросы построения методологии непрерывного сейсмоакустического совместно с электромагнитной эмиссией контроля состояния структурированных массивов горных пород в районе рудных месторождений Горной Шории решались на базе сеймостанции «Таштагол» и представлены в совместных разработках ИГД, ИУУ СО РАН, ЗАО НТЦ «Автоматика», ОАО «Евразруда», а также в работе Ги УрО РАН.

Изучение сейсмических режимов Фенноскандии, поиск взаимосвязей региональной и локальной сейсмичности, разработка методологии оценки геодинамических рисков, поиск новых активных методов снижения риска и существенного уменьшения негативных последствий от техногенной сейсмичности в рудниках проводились в ГоИ КНЦ РАН.

В выполнении исследований кроме авторов приняли участие от Института горного дела СО РАН — Н. А. Бритков, А. С. Изотов, Е. И. Рахов, А. П. Тапсиев, М. Д. Шарапова, В. Ф. Юшкин; Института лазерной физики СО РАН — С. В. Панов, А. Ю. Рыбушкин, Ю. Н. Фомин; Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН — Г. В. Егоров, В. М. Носов; Института угля и углехимии СО РАН — С. Е. Попов; КТИ научного приборостроения СО РАН — В. С. Базин, К. И. Кучинский, К. П. Кашеев, Е. В. Сысоев; Горного института УрО РАН — Ф. Г. Верхованцев, Д. Ю. Шулаков; Института геофизики УрО РАН — А. В. Овчаренко, Т. Е. Сенина; Горного института КНЦ РАН — Р. Н. Достовалов, О. Г. Журавлева, К. Н. Константинов, М. И. Потокин, В. В. Рыбин, И. Э. Семенова, Ю. Г. Смагина, Ю. А. Старцев, **В. В. Тимофеев**; Института горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела НАН Украины — А. И. Архипенко, И. А. Головня, А. В. Савченко, Я. М. Юфа.

Авторы выражают искреннюю признательность специалистам горных предприятий, содействовавшим в проведении экспериментальных работ на шахтах и рудниках Норильска, Таштагола и Горной Шории: Б. П. Бадтиева, Е. А. Бабкину, И. Л. Громовой, В. К. Климова, В. П. Марысюку, И. Ф. Матвееву, С. В. Моисееву, Ю. Н. Наговицину, В. А. Штирцу, О. В. Шипееву, А. В. Щетинину.



## Глава 1

# НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Создание методических основ и аппаратных средств мониторинговых систем, ориентированных на прогнозирование катастрофических природных и техногенных явлений (землетрясения, горные и горно-тектонические удары; выбросы пород; разрушение бортов карьеров и т. д.), является одной из фундаментальных проблем горной геофизики и геомеханики. Особую актуальность отмеченная проблема приобретает для экологически безопасного и социально эффективного освоения недр Земли, особенно при отработке открытым способом (карьеры) месторождений полезных ископаемых, находящихся в геодинамически активных регионах, а также с высокой концентрацией карьеров, шахт и рудников.

Развитие современных систем автоматизации научных исследований характеризуется все большим внедрением в эти области персональных компьютеров, синтезом локальных сетей и созданием программно совместимых промышленных микроконтроллеров, имеющих сетевые интерфейсы. Основными факторами, определяющими такое развитие систем автоматизации, являются: снижение стоимости РС при одновременном росте их вычислительной мощности и надежности; широкий выбор компактных, мощных и относительно дешевых микроконтроллеров промышленного назначения; развитие сетевых технологий и на их основе архитектуры новых распределенных модульных систем контроля и управления.

### 1.1. ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ БОРТОВ КАРЬЕРА

Для автоматических измерений продольных перемещений и деформаций геоблоков в бортах карьера в ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН в 2003—2005 гг. был разработан и изготовлен скважинный многоканальный оптоэлектронный продольный деформометр по типу МОЭД-1п [1]. В рамках настоящего проекта поставлена цель работы — создание на основе скважинного прибора деформационных измерений, акселерометров и датчиков электромагнитной эмиссии опытного варианта измерительной системы с дистанционным электропитанием, обеспечивающей непрерывные автоматические измерения перемещений геоблоков, контроля деформаций, сейсмоакустических колебаний и сигналов электромагнитного излучения в бортах карьера через скважину с дистанционной передачей данных в компьютер в условиях карьеров.

Структура многоканального приборного комплекса деформационных измерений как основа создаваемой системы сейсмодеформационного мониторинга пока-

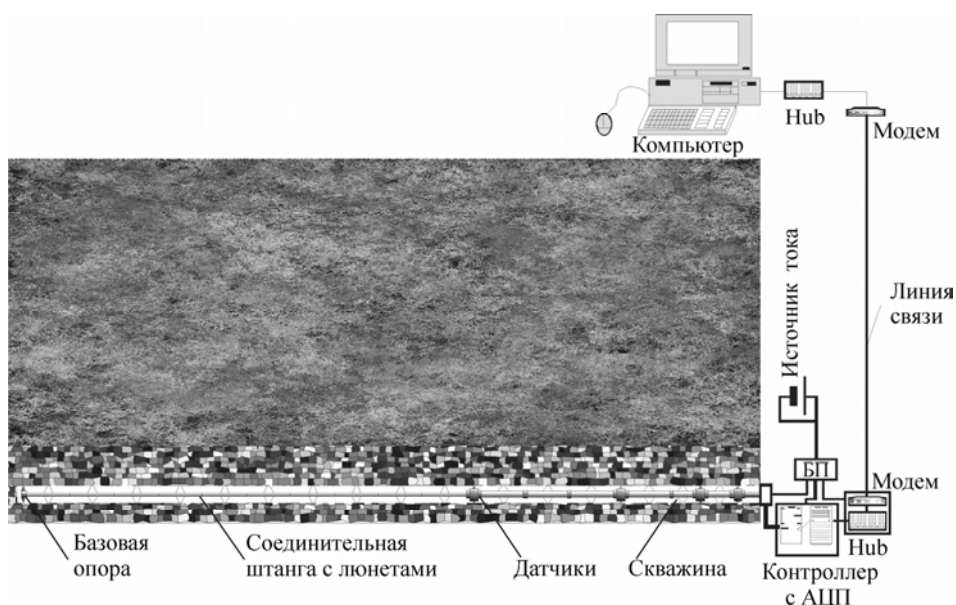


Рис. 1.1. Структурная схема приборного комплекса, устанавливаемого в борт карьера.

зана на рис. 1.1. В его состав входят: скважинный измерительный зонд, содержащий неподвижную штангу, собираемую из соединительных секций, базовую опору и комплект из четырех измерительных модулей; источник электропитания; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с микроконтроллером сбора данных; линия связи для дистанционной передачи цифровой информации; модемы; рабочее место оператора с компьютером и блоком электропитания. В состав измерительного модуля входят позиционно-чувствительный оптоэлектронный датчик продольных перемещений, подвижная опора для крепления в скважине и секция с муфтой для соединения со штангой в единую конструкцию. Внешний вид модуля показан на рис. 1.2 (см. вклейку).

При установке измерительного зонда в скважину базовая опора и измерительные модули соединяются последовательно секциями штанг с помощью электрических разъемов и механических муфт, закрепленных на торцах штанг. В случае соединения двух модулей минимальный интервал зоны измерений составляет 1 м. Для увеличения интервала используются дополнительные штанги длиной 0,5 и 1,0 м, которые могут устанавливаться как между измерительными модулями, так и между измерительным модулем и базовой опорой.

Основным элементом измерительного модуля является датчик абсолютных перемещений, выполненный на основе позиционно-чувствительного фотоприемника PSD S3270 фирмы Hamamatsu. Каждый датчик предварительно калибруется с целью определения его погрешности. Калибровочные испытания группы из четырех датчиков показали, что погрешность измерений практически не превышает 8 мкм в диапазоне  $\pm 15$  мм. Кривая погрешности дана на рис. 1.3.

Работа комплекса выглядит следующим образом: перемещение контролируемого геоблока приводит к перемещению подвижной опоры соответствующего из-

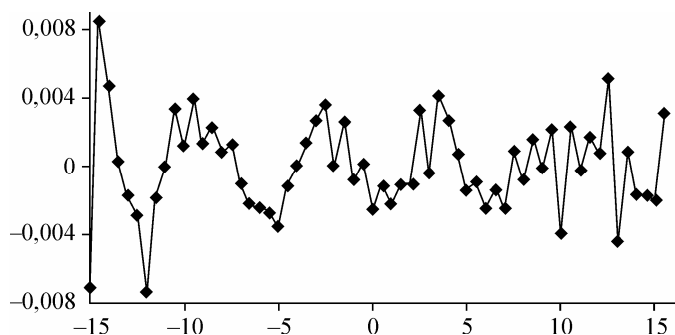


Рис. 1.3. Кривая погрешности позиционно-чувствительного датчика. По горизонтальной оси показаны устанавливаемые с помощью концевых мер длины положения подвижной опоры измерительного модуля в миллиметрах, по вертикальной — измеренная погрешность в миллиметрах.

мерительного модуля, которое преобразуется датчиком в аналоговый электрический сигнал. Этот сигнал поступает в модуль АЦП, где производится его оцифровка, усреднение по времени и накопление во внутреннем буфере. В основе модуля лежит 12-битовый двухканальный АЦП AD7866. В состав микросхемы входят два модуля АЦП, каждый из которых обеспечивает дискретизацию и преобразование сигналов двух датчиков одновременно. На входе каждого АЦП установлены двухканальный мультиплексор и устройство выборки/хранения аналогового сигнала на время преобразования. Частота преобразования определяется частотой импульсов синхронизации.

С уменьшением частоты синхронизации увеличивается время преобразования и снижается энергопотребление микросхемы. Параметры микросхемы специфицированы в температурном диапазоне от  $-40$  до  $+85$  °С. Оцифрованные данные буферизируются (до 650 кБ) в энергонезависимой памяти. Частота дискретизации входных сигналов 1 Гц ... 800 кГц. Питание модуля сбора данных +5 В, ток — до 500 мА (при максимальной частоте дискретизации). Интерфейс передачи цифровых сигналов — Ethernet со скоростью до 1 Мбит/с. После формирования пакета данных осуществляется его передача по протоколу TCP/IP в компьютер для накопления и обработки. Компьютер может размещаться в информационно-вычислительном центре на удалении до 10 км, что является принципиальным при измерениях в подземных условиях рудников.

Для передачи результатов измерений на расстояние был опробован модем типа Nateks FlexDSL MSDSL, имеющий интерфейс Ethernet и работающий по технологии передачи данных xDSL при топологии соединения «точка—точка». Характеристики модема приведены в табл. 1.1.

Модуль сбора данных приборного комплекса является универсальным устройством и ориентирован для подключения аналоговых датчиков различных типов. В этом случае функциональные возможности комплекса приобретают свойства системы, при этом появляется новое качество — расширение функций за счет подключения акселерометров и датчиков электромагнитного излучения. Такое расширение совместно с измерением перемещений позволяет синхронно регист-

Таблица 1.1

Характеристики модема по дальности передачи данных

Скорость, кбит/с	Эффективная скорость, кбит/с	Дальность по кабелю ТПП-0,4, м	Дальность по кабелю ТПП-0,5, м
2064	2048	4600	6000
1040	1024	5800	7800
144	128	7400	10600

ривать сейсмоакустические сигналы и сигналы электромагнитного излучения горных пород с использованием унифицированных серийно выпускаемых устройств.

Для управления функционированием комплекса разработано специализированное программное обеспечение, которое осуществляет съем данных с датчиков, предварительную обработку, передачу информации по длинной линии, сохранение ее в компьютере и отображение на экране монитора. Программное обеспечение функционирует в операционной среде Windows 2000. На рис. 1.4 (см. вклейку) представлен фрагмент окна рабочей программы с изображением графического интерфейса пользователя.

Кнопки 1 и 2 предназначены соответственно для запуска и остановки процесса измерения. В столбцах (позиция 3) выводятся графически (с возможностью автоматического масштабирования) текущие показания датчиков по каждому из четырех измерительных модулей. При помощи переключателей 4 производится подключение/отключение соответствующих датчиков, кнопка 5 предназначена для входа в режим настройки программы и является служебной.

Предварительные испытания приборного комплекса проводились на технической базе КТИ НП СО РАН с использованием метрологического стенда. Питание датчиков и модуля сбора данных прибора осуществлялось от источника тока GPR-30H10D по кабелю длиной 300 м. Передача данных обеспечивалась с помощью DSL-модемов Granch SBNI16B по витой паре длиной 250 м на удаленный компьютер. Положение подвижной опоры измерительного модуля устанавливалось с помощью концевых мер длины по ГОСТ 9038-90. Для каждого модуля погрешность измерений не превышала 20 мкм. Общий вид комплекса при испытаниях в цехе показан на рис. 1.5, а (см. вклейку).

Натурные испытания комплекса были организованы в карьере предприятия «Искитиммармогранит» (г. Искитим, Новосибирская область). Измерительный зонд в составе базовая опора—штанга—три измерительных модуля был установлен в борт карьера в горизонтально пробуренную скважину глубиной 18 м (рис. 1.5, б). Базовая опора была установлена на глубине 11,5 м, измерительные модули — соответственно на глубинах 1,2, 2,2 и 4,2 м от устья. В течение 5,5 мес. без выемки зонда периодически снимались показания датчиков. Натурные испытания позволили зафиксировать сезонный температурный дрейф пластов горной породы борта карьера (июль—декабрь) в пределах от 15 до 400 мкм, при этом дрейф пласта на глубине 1,2 м от устья скважины примерно в 4 раза превышал дрейф пласта на глубине 2,2 м и в 20—30 раз — дрейф пласта на глубине 4,2 м.

Таким образом, в результате проведенных работ создан опытный образец скважинного приборного комплекса для измерения перемещений и деформаций геоблоков бортов карьера, проведены лабораторные и натурные испытания, подтвердившие его работоспособность.

## 1.2. ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Одним из перспективных направлений развития скважинных систем приборного контроля поведения горных пород является использование лазерных дальнометров для измерения перемещений и деформаций в горных массивах. В этом случае нет необходимости построения сложных механических конструкций для измерительных датчиков, возникает лишь проблема закрепления в скважине рассеивающих или уголковых отражателей (рассеивающих мишеней) по системе контролируемых геоблоков. Такие отражатели имеют незначительную массу, не подвержены температурным деформациям, а потому способ их крепления в структуре геоблоков может быть существенно упрощен.

В разработке лазерных дальнометров активно развивается направление, основанное на явлении самосмешивания в лазерных диодах. Суть явления заключается в том, что взаимодействие прямого и рассеянного (отраженного) удаленной поверхностью светового потока лазерного диода приводит к модуляции по амплитуде его тока. Модуляция тока лазерного диода вызывает изменение частоты излучения лазера, в результате чего наблюдается модуляция интенсивности светового потока, пропорциональная удвоенному расстоянию до измеряемого объекта. Регистрация модулированного сигнала обеспечивается с помощью фотодиода, который входит в состав полупроводникового лазера. Такой подход позволяет разработать чрезвычайно простой, компактный и достаточно дешевый датчик для дистанционного измерения перемещений.

Метод точной лазерной дальнометрии в настоящее время исследуется и пока не нашел практического применения (имеются лишь лабораторные образцы измерительных устройств), но обладает бесспорной перспективой для создания надежных малогабаритных высокоточных датчиков перемещений. На основе дальнометра разработана структурная схема (рис. 1.6) лазерного деформографа с набором уголковых отражателей для скважинных измерений перемещений геоблоков в горном массиве. Создан макет установки для регистрации звуковых колебаний поверхности исследуемых образцов в диапазоне частот от 0 до 70 кГц на основе интерферометра. Апробированы различные варианты оптических схем интерферометра. Получены предварительные результаты по детектированию звуковых колебаний с помощью интерферометрической установки.

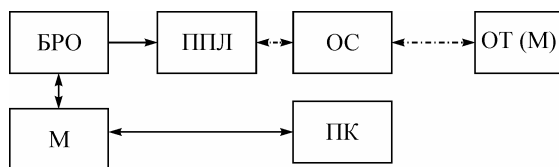


Рис. 1.6. Структурная схема лазерного деформографа.

ОТ (М) — отражатель (мишень), ОС — оптическая система, ППЛ — полупроводниковый лазер, БРО — блок регистрации и обработки сигнала, М — модем, ПК — удаленный компьютер.

На рис. 1.7, а (см. вклейку) представлены функциональная схема измерительно-

го канала и состав оптоэлектронного узла установки с использованием модифицированного интерферометра Майкельсона, в котором зондирующий и опорный пучки излучения направлены на объект измерений. В экспериментах звуковые колебания объекта исследования возбуждались методом механического воздействия. На рис. 1.7, б приведена форма сигнала, зарегистрированного с помощью лазерного микрофона при однократном воздействии на объект. На графике видно, что первые 50 мс система регистрирует широкий спектр высокочастотных колебаний.

### **1.3. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СКВАЖИН**

В основу измерений величин механических напряжений, возникающих в горных породах, положен метод регистрации линейных изменений геометрических размеров разгрузочной скважины. В данном методе достаточным условием определения величин и направления действия главных механических напряжений в поперечной плоскости сечения скважины является проведение измерений геометрических размеров скважины по трем направлениям, сдвинутым относительно друг друга на  $120^\circ$ .

Для решения данной задачи разработан тензометрический деформометр, обеспечивающий измерение поперечных деформаций скважины по вертикали с помощью оптико-поляризационного датчика. На рис. 1.8, а (см. вклейку) показаны схема измерения поперечных деформаций в скважине при помощи деформометра с оптико-поляризационным датчиком и установка его в скважине.

Испытания деформометра с оптико-поляризационным датчиком проводились в карьере ОАО «Искитимраморгранит» в период с мая по сентябрь 2006 г. в скважине, расположенной рядом справа от скважины с установленным продольным деформометром (см. рис. 1.5, б), и в ноябре в подземных условиях (сейсморавильон № 4) рудника «Октябрьский» (см. рис. 1.8, б). Отрабатывались вопросы по монтажу и демонтажу деформометра в скважине. Проводилась оценка влияния изменений температуры на показания датчика. Оценивалась возможность регистрации поперечных деформаций скважины при взрывах. Испытания показали безотказность и надежность работы тензометрического деформометра на основе оптико-поляризационного датчика.

На рис. 1.9 показана схема дистанционного подключения деформометра с обеспечением электропитания и передачи данных по линии связи на расстояние до 7 км от управляющего компьютера и источника тока. Передача сигналов и подача электропитания осуществляются при помощи кабеля ТППШв с проводниками диаметром 0,64 мм. В качестве источника питания выбран источник тока GPR11H30D мощностью 300 Вт, который обеспечивает выходное напряжение 100 В при токе 3 А.

Для передачи сигналов управления и данных выбраны миниатюрные модемы типа SRM-3A (2 и 5 на рис. 1.9). Электропитание модемов осуществляется от интерфейса RS232 и не требует дополнительного источника питания. Дальность связи при различных скоростях передачи данных для модема SRM-3A приведена в табл. 1.2.

Кабель ТППШв диаметром 0,64 мм имеет удельное сопротивление 55 Ом/км, что при длине кабеля  $2 \times 7$  км дает общее сопротивление проводников 770 Ом.

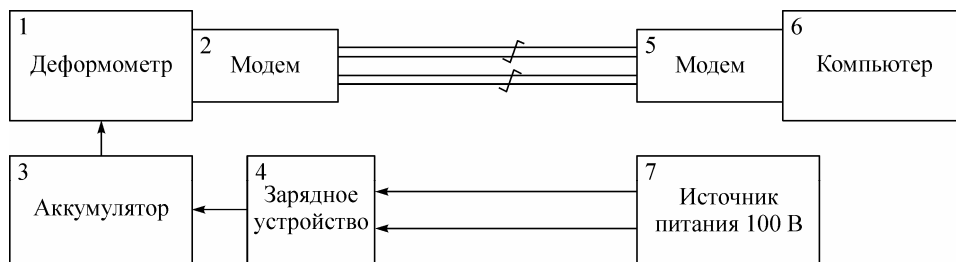


Рис. 1.9. Структурная схема дистанционного подключения деформометра с оптико-поляризационным датчиком.

При напряжении питания датчика деформометра 3 В необходимо обеспечить максимальный ток 125 мА, что недостаточно при переходных процессах запуска датчика в работу. По этой причине для обеспечения достаточной мощности питания при включении деформометра предусмотрен пиковый шахтовый аккумулятор, подключаемый дистанционно к зарядному устройству.

Максимальная мощность, которую может обеспечить источник питания в рассматриваемой схеме, составляет 3,24 Вт. Отсюда следуют требования к зарядному устройству:

- эквивалентное сопротивление входа — 770 Ом;
- максимальное входное напряжение — 100 В;
- выходное напряжение, равное напряжению холостого хода аккумулятора, — 4,5 В;
- максимальная потребляемая мощность — 3,3 Вт.

Зарядное устройство разработано согласно перечисленным требованиям и изготовлено.

На основе оптико-поляризационного датчика разработан, изготовлен и в лабораторных условиях испытан усовершенствованный зонд для измерения деформаций массива горных пород, определяемых в поперечном сечении скважины по трем направлениям под углом  $120^\circ$  с учетом влияния температурных факторов на электрические и спектральные параметры составных элементов датчика (поляриды, фазосдвигающие устройства, фотоупругий элемент, светодиод).

В основу измерений напряжений, действующих в горном массиве, положен метод регистрации поперечных деформаций скважины. В данном методе достаточным условием определения величины и направления вектора напряжений является контроль изменения диаметра скважины в плоскости поперечного сечения по

Таблица 1.2

Дальность передачи SRM-3A (для кабеля 0,5 мм)

Скорость передачи данных, кбит/с	Дальность передачи данных, км
19,2	1,0
9,6	4,5
4,8	6,0
2,4	7,0
1,2	7,0

трем направлениям, сдвинутым относительно друг друга на  $120^\circ$ . Для решения данной задачи в 2007 г. разработан зонд (рис. 1.10, см. вклейку), обеспечивающий измерение с помощью трех оптико-поляризационных датчиков, ось чувствительности каждого из которых сдвинута на  $120^\circ$  относительно друг друга. Зонд оснащен сменными комплектами опор, что позволяет измерять деформации в скважинах диаметром 85 и 115 мм.

В состав зонда входят: измерительный блок II и два блока неподвижных опор I, III. Блоки неподвижных опор предназначены для крепления тензометрического зонда в скважине. Опоры блока I опираются на подвижный конус 2, который поджат пружиной. Малый угол конуса обеспечивает неподвижность опор при работе зонда. Перед установкой зонда в скважину подвижные и неподвижные опоры убирают путем подачи сжатого воздуха в пневмоцилиндр штока подвижной опоры. При этом перемещается поршень пневмоцилиндра 6, который с помощью втулки 7 поворачивает рычаги 4 подвижных опор. Опоры смещаются в корпус блока. В блоках неподвижных опор давлением сжатого воздуха поршень 3 перемещает подвижный конус 2. Опоры с помощью пружин втягиваются в корпус блоков. После этого зонд свободно устанавливается в скважину на заданную глубину. Для приведения зонда в рабочее состояние давление сжатого воздуха сбрасывается и возвратные пружины толкателей 5 и опорных блоков 8 выдвигают опоры до контакта со стенкой скважины.

На рис. 1.11 (см. вклейку) представлены результаты испытаний оптико-поляризационного датчика, в которых проводились измерения длины волны светодиода (СД) на монохроматоре СДЛ-1 с использованием дифракционной решетки с 600 штрих/мм. Обратная линейная дисперсия монохроматора с такими решетками составляет 1,6 нм/мм, что при размере щели 0,05 мм дает разрешение 0,08 нм. В качестве приемника излучения использовался ФЭУ-79, который был включен в режиме счета фотонов. Сканирование проводилось в диапазоне от 630 до 700 нм с шагом 0,1 нм. Спектры нормированы относительно чувствительности прибора. На спектрах с повышением температуры видно смещение положения пика в красную область. Зависимость пика от температуры (рис. 1.12) описывается функцией линейного вида

$$\lambda_A = 6473,5 + 2,62t,$$

где  $\lambda_A$  — положение максимума в спектре излучения светодиода;  $t$  — температура,  $^\circ\text{C}$ .

Для тепловой стабилизации датчика параметры фазосдвигающей пластинки подобраны так, чтобы температурные изменения светодиода компенсировались температурными изменениями пластинки. Параметры регулируют выбором толщины фазосдвигающей пластинки и ориентацией «быстрой» оси относительно оси симметрии фотоупругого элемента. Опре-

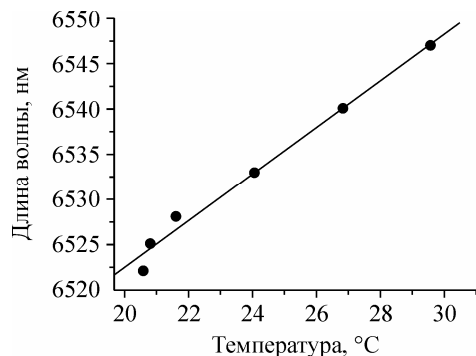


Рис. 1.12. Зависимость положения максимума излучения светодиода от температуры.

Точки — эксперимент, линия —  
 $y = 6470,59 + 2,5896t$ .



делены температурные изменения параметров датчика для двух вариантов ориентации фазосдвигающего элемента. Уменьшение температурных изменений параметров датчика происходит при повороте на  $90^\circ$  ориентации «быстрой оси» фазосдвигающей пластинки. Температурные характеристики фазосдвигающего устройства получены для пластинок кристаллического кварца толщиной 856 мкм и 504 мкм соответственно.

Проведены испытания в температурной камере в режиме нагрев—охлаждение для диапазона температур от 25 до  $50^\circ\text{C}$  (рис. 1.13, 1.14). При повышении темпе-

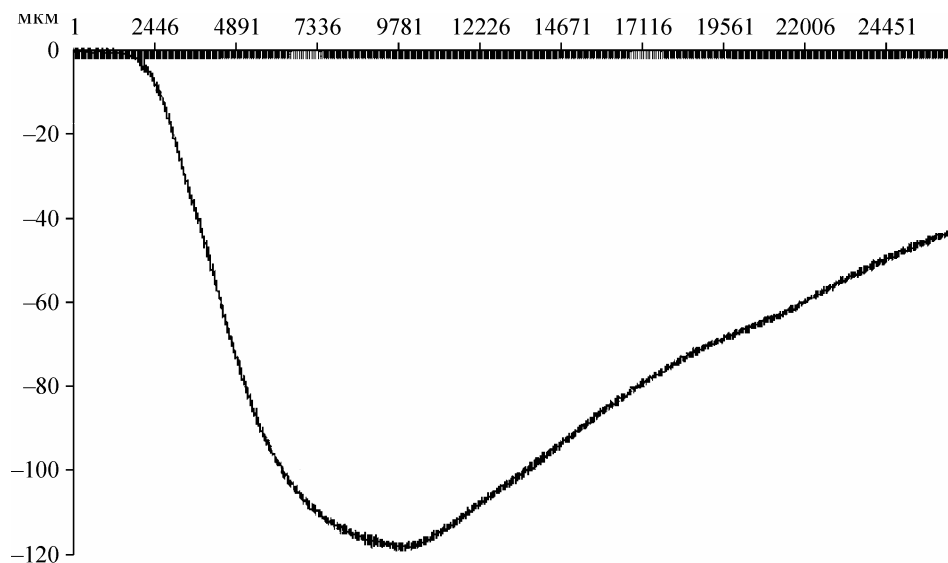


Рис. 1.13. Результаты испытаний датчика 1 в температурной камере.

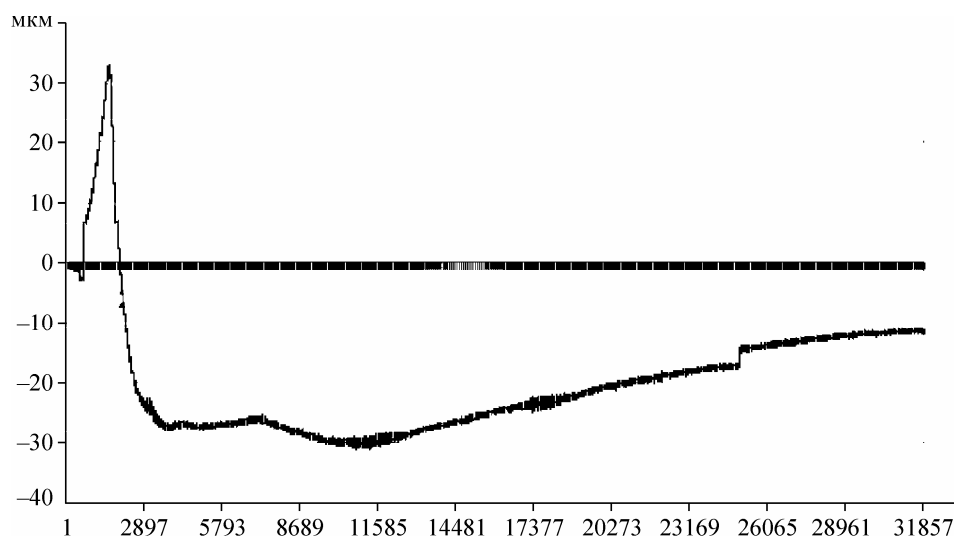


Рис. 1.14. Результаты испытаний датчика 2 в температурной камере.

ратуры до 50 °С (датчик 1, на рис. 1.13 — шкала времени  $10^4$  ед.) смещение увеличивается до 120 ед. В конструкцию опико-поляризационного датчика на выводы светодиода установлено теплоотводящее устройство (датчик 2). На рис. 1.14 видно, что при включении датчика происходит увеличение смещения, затем начинают «работать» эффекты компенсации. В данном случае максимальное смещение при 50 °С составляет 30 ед. Поворот ориентации «быстрой» оси фазосдвигающей пластинки оптической схемы позволяет корректировать смещение в пределах 90 ед. Таким образом, представленный прибор адаптирован для работы в подземных условиях рудников и позволяет обеспечить непрерывный контроль поперечных деформаций скважин.

#### 1.4. ПРИБОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ

В процессе создания полевого комплекса измерительной аппаратуры для совместного изучения деформационных свойств блочных геологических сред и сопутствующих сигналов электромагнитной эмиссии горных пород в натуральных условиях рудников и шахт основное внимание уделено созданию датчиков широкополосной регистрации сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ), проработке конструкции скважинного варианта прибора ЭМИ, совмещенного с оптоэлектронным датчиком продольных перемещений, и построению измерительной системы на их основе. Разработан вариант многофункционального приборного комплекса, в котором совмещены оптоэлектронный деформометр и датчик сигналов ЭМИ, что обеспечивает выполнение синхронных измерений продольных перемещений и электромагнитной эмиссии пород в горном массиве через скважину.

В состав измерительного комплекса (рис. 1.15) входят: многоканальный продольный деформометр; датчик сигналов электромагнитной эмиссии (ДЭМИ), конструктивно состоящий из приемной антенны и канала усиления электромагнитных сигналов; аналого-цифровой преобразователь, являющийся универсальным устройством, ориентированным на подключение аналоговых датчиков различных

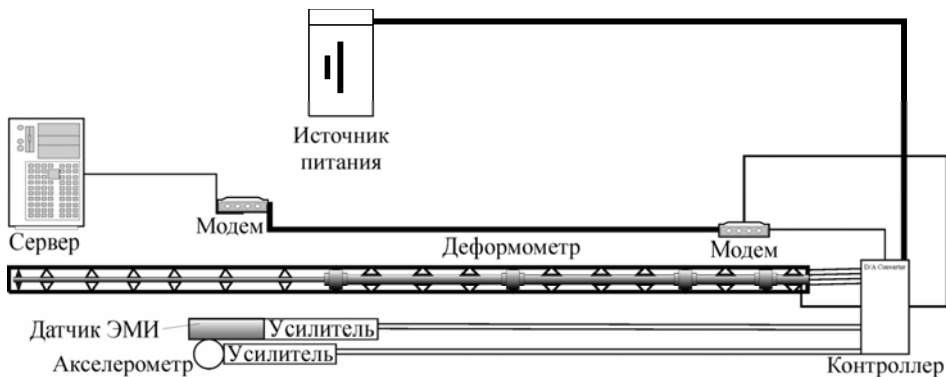


Рис. 1.15. Структурная схема многофункционального приборного комплекса для мониторинга деформаций горных пород с подключением датчика сигналов ЭМИ и акселерометра.

типов; два модема типа Nateks FlexDSL MSDSL, предназначенных для передачи данных по длинной линии на удаленный компьютер; блок питания; компьютер.

Датчик для регистрации сигналов ЭМИ конструктивно состоит из двух частей: антенны, жестко закрепленной по центру досылочной штанги, и широкополосного усилителя с экранированным корпусом, соединенного экранированным кабелем с антенной. В качестве регистрирующего устройства в датчике сигналов ЭМИ предусмотрено использование как электрической, так и магнитной антенн, имеющих частотный диапазон измерений до 500 кГц. Сигнал с антенны поступает на усилительный каскад с регулируемыми коэффициентами. Принцип работы усилителя поясняет рис. 1.16. Благодаря высокой рабочей частоте опроса АЦП обеспечивается возможность усреднения измерительных данных по времени, что позволяет снижать шумовую и временную составляющие погрешности.

Для установки в скважине датчик ЭМИ имеет узел крепления и досылочную штангу, состоящую из отдельных секций, которые объединяются в единую конструкцию с помощью соединительных муфт. Измерительный модуль (МИ) деформометра имеет в своем составе секцию штанги, подвижную опору с механизмом закрепления ее в скважине и оптоэлектронный датчик перемещения (см. рис. 1.2). Совмещенный вариант прибора предусматривает установку в составе измерительного зонда (см. рис. 1.15) двух измерительных модулей продольных перемещений, датчика сигналов ЭМИ и акселерометра. Допускаются другие сочетания представленных датчиков.

Работа приборного комплекса осуществляется следующим образом: аналоговые сигналы с датчиков положения, датчика ЭМИ и акселерометра поступают в модуль АЦП, где производятся оцифровка, усреднение по времени (при необходимости) и накопление во внутреннем буфере. В основе модуля АЦП лежит 12-битовый двухканальный аналого-цифровой преобразователь AD7866. Для передачи данных выбран модем Nateks FlexDSL MSDSL (см. табл. 1.1).

Стендовые испытания по оценке технических возможностей комплекса позволили определить устойчивость приема электромагнитного излучения в диапазоне от 0 до 500 кГц. Ввиду ограниченности технического ресурса аналого-цифрового преобразователя по частоте дискретизации реализован режим предварительного накопления аналогового сигнала с последующей регистрацией и отображением осредненного значения за период дискретизации.

Таким образом, в результате проведенных работ создан набор функционально и конструктивно законченных модулей и узлов для создания скважинных деформометров, совмещенных с датчиками ЭМИ, обеспечивающий измерение переме-

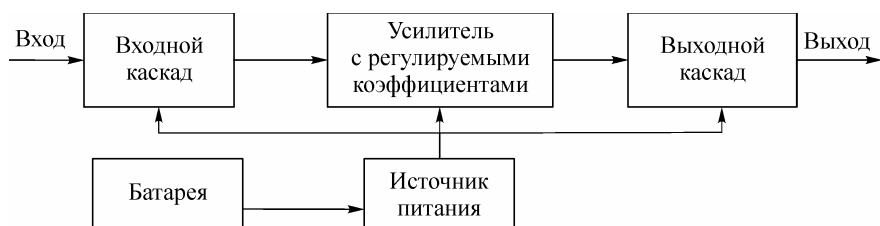


Рис. 1.16. Структурная схема усилителя сигналов ЭМИ.

щений и сигналов ЭМИ в геоблоках горного массива в широком динамическом диапазоне частот и перемещений.

### 1.5. АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА

Перспективным методом, позволяющим контролировать возникновение и рост трещин, является метод регистрации электромагнитных сигналов, возникающих в процессе трещинообразования высоконапряженных материалов, включая горные породы [2—5]. Исследования этого явления развивались как в области физики процесса [2—6], так и в прикладных направлениях, особенно в сейсмологии в связи с прогнозом землетрясений [7], в горном деле — для контроля удароопасности массивов горных пород и прогнозирования динамических проявлений горного давления [8, 9]. В частности, метод регистрации электромагнитных сигналов используется для контроля удароопасности на Таштагольском руднике [10, 11].

Метод электромагнитных измерений массива включает регистрацию сигналов ЭМИ с использованием промышленно выпускаемых приборов серии РЭМИ-1 и РЭМИ-2 с индикацией сигналов в цифровом виде, разработанных совместно НГТУ и ИГД СО РАН. Эти приборы представляют собой измерители напряженности электрической и магнитной компонент полей, создаваемых горными породами при их трещинообразовании и разрушении. Для оценки напряженности поля измеряют напряжение на выходе приемной ферритовой антенны:

$$u_{\text{вых}}(t) = E(t)h,$$

где  $h$  — действующая высота антенны,  $E(t)$  — напряженность электрического поля.

Для измерения и оценивания сигнала ЭМИ используется средневыпрямленное значение:

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u_{\text{вых}}(t)| dt,$$

где  $T$  — интервал усреднения (для РЭМИ-1 и РЭМИ-2  $T = 1$  с).

Дальнейшим развитием методик регистрации электромагнитных сигналов является разработка прибора РЭМИ-3 (рис. 1.17, см. вклейку), значительно расширяющего возможности обработки результатов регистрации. Помимо отображения усредненного на интервале  $T = 1$  с средневыпрямленного значения, РЭМИ-3 позволяет регистрировать и сохранять в энергонезависимой памяти результаты дискретизации сигнала, усредняемого на интервале 5 мс.

#### Технические характеристики прибора РЭМИ-3:

Чувствительность антенны при отношении сигнал/шум 40 дБ	6 мВ/м
Выходное напряжение антенны, соответствующее напряженности электрического поля 6 мВ/м	10 мкВ
Рабочий диапазон частот антенны	10 Гц—70 кГц

Нелинейность частотной характеристики на частоте 1 кГц	≤1 дБ
Разрядность АЦП	12
Интервал усреднения показаний на индикаторе	1 с
Частота дискретизации регистратора	200 Гц
Объем энергонезависимой памяти	1 Гб
Тип компьютерного интерфейса	USB
Время непрерывной регистрации	4 ч
Рабочий температурный диапазон	-5...+30 °С
Масса с элементами электропитания (аккумуляторы)	300 г

Регистрация сигналов осуществляется непрерывно, позволяет получать значительный объем информации об изменении интенсивности электромагнитных сигналов в различных точках рудника и обеспечивает возможность детального спектрально-временного анализа сигналов. Программное обеспечение (рис. 1.18, см. вклейку) позволяет производить считывание и визуализацию результатов регистрации с помощью компьютера.

Прибор РЭМИ-3 был испытан в условиях рудника «Таштагольский» на горизонтах -70, -140, -280 и -350 м. Примеры записи регистрируемых сигналов ЭМИ на горизонте -280 м показаны на рис. 1.19. Замеры производились у забоев и в ортах, при различных ориентациях электромагнитной антенны относительно оси выработки.

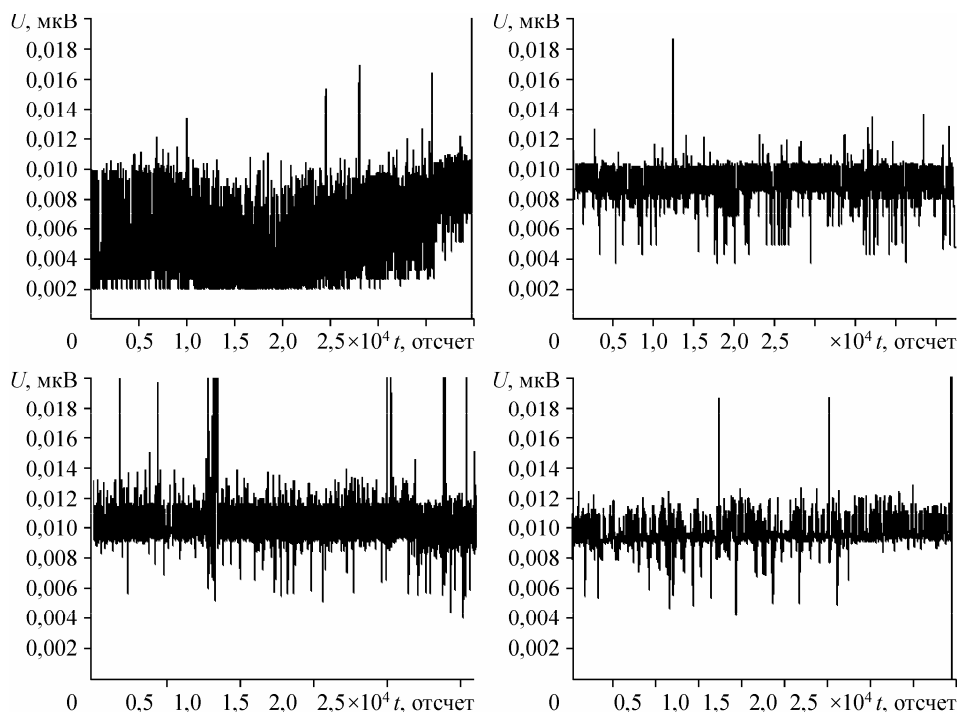


Рис. 1.19. Зависимости напряжения на выходе антенны от времени.

## 1.6. ДВУХКАНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР ИНКРЕМЕНТАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТИПА MS30

Двухканальный контроллер обеспечивает сопряжение оптомеханических инкрементальных датчиков перемещения с аналого-цифровыми и/или цифровыми автоматизированными системами сбора данных. Прибор используется совместно с автоматизированной аналого-цифровой системой АСИ-2 в лаборатории механики горных пород ИГД СО РАН в качестве измерительного преобразователя перемещений горных пород в аналоговый непрерывный сигнал, который подвергается цифровой дискретизации при помощи платы аналогового ввода EISA-A2000 [12].

Большинство современных датчиков перемещения, изготавливаемых для измерения перемещений, используют в своей основе принцип модуляции светового потока при прохождении его через измерительную линейку с нанесенными на ее поверхность рисками (рис. 1.20). Использование такого датчика для измерения перемещений совместно с аналого-цифровыми системами сбора данных требует преобразования получаемой последовательности импульсов в аналоговый сигнал или цифровой код, пропорциональный абсолютному перемещению.

Контроллер позволяет преобразовать импульсы инкрементального датчика в непрерывный аналоговый сигнал, синхронно меняющийся с перемещением штока датчика в заданном направлении и с заданным коэффициентом масштабирования, а также формировать двоичный эквивалент положения датчика с последующей передачей сигнала по последовательному каналу.

Функционально контроллер представляет два независимых канала, включающих схему сдвига-шифрации, счетчик, сдвиговый регистр, цифроаналоговый преобразователь и фильтр. Общим для двух каналов является последовательный интерфейс, используемый для опроса комбинации на выходе сумматора персональным компьютером. На рис. 1.21 представлена функциональная схема отдельного канала преобразователя, часть которого реализована микроконтроллером общего назначения программно. На рис. 1.22 (см. вклейку) показан внешний вид прибора с подключением датчика перемещения к контроллеру и ноутбуку.

### Технические характеристики контроллера:

Число подключаемых датчиков	2
Логический уровень интерфейса датчика	ТТЛ

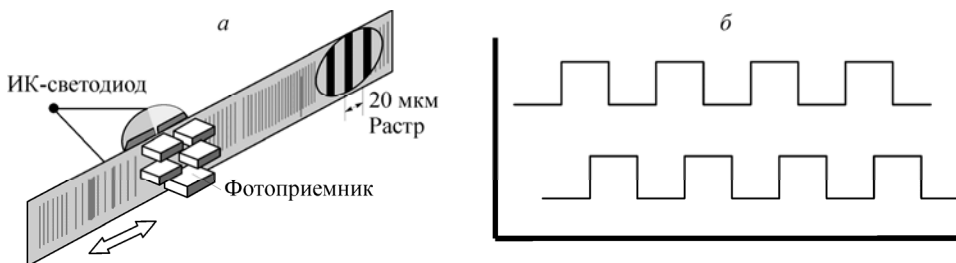


Рис. 1.20. Измерительная линейка (а) и диаграмма смены состояний выходов (б) датчика перемещения.

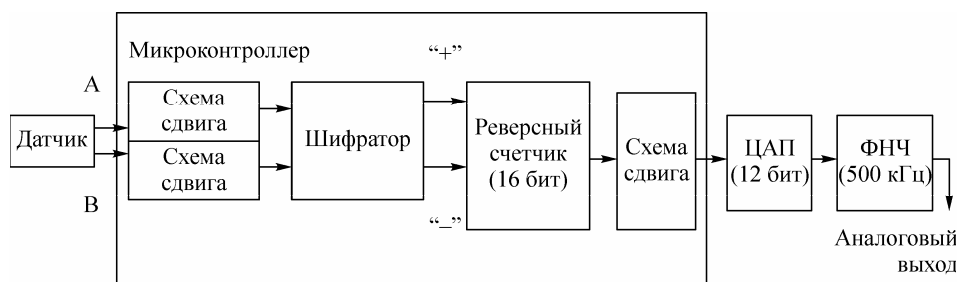


Рис. 1.21. Функциональная схема одного канала преобразователя.

Максимальная скорость перемещения рабочей части датчика	1 мкм/мкс
Разрядность счетчика приращений	16
Число аналоговых каналов	2
Разрядность цифроаналоговых преобразователей	12
Динамический диапазон цифроаналогового преобразователя	0 — 5 В
Коэффициент преобразования по ступеням	8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125
Управление коэффициентами преобразования по каналам	Независимое
Хранение коэффициентов преобразования	Энергонезависимое
Тип интерфейса	RS232
Скорость обмена по последовательному интерфейсу	115200 бод
Напряжение питания	7—12 В
Потребляемая мощность (без датчиков)	3 Вт

Разработано программное обеспечение, которое позволяет с помощью компьютера производить независимо настройку коэффициентов преобразования для каждого канала, а также регистрировать показания каждого датчика в реальном масштабе времени (рис. 1.23, см. вклейку).

### 1.7. ВИДЕОКАРОТАЖНЫЙ ЗОНД

В настоящее время видеонаблюдения применяются в различных отраслях промышленности для оценки состояния оборудования, механизмов, материалов, природных объектов. Используя аппаратуру дистанционного видеонаблюдения, можно исследовать труднодоступные части горных массивов, в частности, оценить буровые и ремонтные работы в разведочных и эксплуатационных скважинах. В горном деле при проведении геомеханических исследований и выполнении технологических работ, при проектировании крепей горных выработок, горно-геологическом картировании важную роль играет информация о состоянии и свойствах горных пород.

При установке различной измерительной аппаратуры в скважинах знание показателей, характеризующих структуру (положение зон дезинтеграции, расстояние

между ними, мощность породных слоев и т. д.) горного массива, является необходимым условием достоверности и полноты регистрируемой информации. Для ее получения требуются простые, но эффективные методы и технические средства измерения и регистрации, в том числе, в оперативном режиме [13]. В частности, для контроля деформаций и смещений геоблоков в горном массиве в рудниках Талнахско-Октябрьского месторождения медно-никелевых руд используется скважинный продольный деформометр МОЭД-1п [14—16]. При установке деформометра необходимо учитывать горно-геологическое строение данного участка горного массива. Особое внимание уделяется также ориентации измерительных скважин и выбору контрольных и реперных точек, которые должны находиться в геоблоках, разделенных зонами дезинтеграции.

Устройства для проведения таких работ, в основном зарубежные [17], имеют высокую стоимость комплекта оборудования и программного обеспечения и не всегда соответствуют расширяющемуся кругу задач. В ИГД СО РАН разработан скважинный видеозонд, удовлетворяющий специфике исследований в натуральных условиях подземных горных выработок Талнахско-Октябрьского месторождения полиметаллов, дающий возможность получения информации о структурных свойствах горных пород вдоль скважины, ее запоминания и архивирования [18].

**Конструкция видеокаротажного зонда.** Скважинный зонд представляет собой дистанционную видеосистему, которую можно перемещать при помощи досылочных штанг вдоль скважины и передавать видеоинформацию в переносной компьютер (ноутбук).

Основные конструктивные элементы зонда — видеоголовка и досылочные штанги. Разработаны две конструкции видеоголовки: с радиальным и осевым размещением видеокамеры. При радиальном расположении видеокамеры (рис. 1.24, *a*), объектив которой направлен непосредственно на стенку скважины, достигается простота конструкции и малый вес.

Проведение видеокаротажа с такой конструкцией видеоголовки требует обеспечить, наряду с продольным ее перемещением вдоль скважины, вращение вокруг своей оси с целью осмотра внутренней поверхности скважины. Для этого видеоголовка установлена в центрирующий узел, который при помощи досылочных штанг

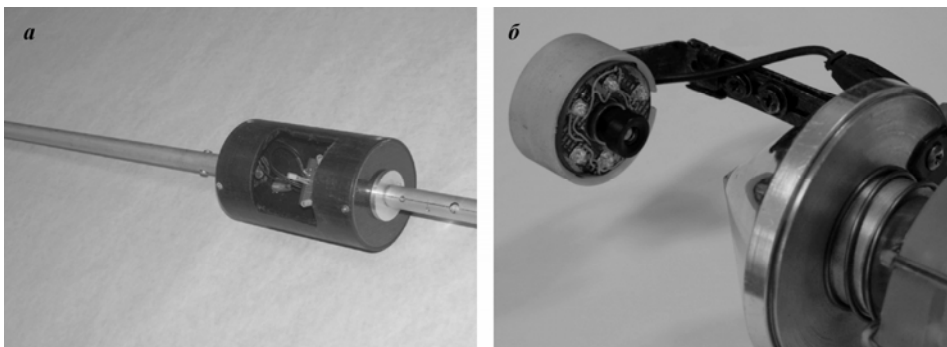


Рис. 1.24. Конструкция видеоголовки с радиальным (*a*) и осевым (*б*) расположением видеокамеры.



может свободно вращаться. Для получения полной картины поверхности скважины по окружности необходимо стыковать отдельные фрагменты видеосъемки под разными углами в двумерное изображение. Транспортёр, расположенный в устье скважины, позволяет оценить угловую ориентацию направления наблюдения.

Осевое размещение видеокамеры (рис. 1.24, б) позволяет за один прием видеосъемки охватить поверхность скважины по окружности. В результате получается свернутое изображение. Таким образом, отпадает необходимость вращать камеру и упрощается процесс автоматизации съема информации. Но при этом повышаются требования к центрирующему устройству и юстировке камеры относительно оси скважины. Усложняется и программное обеспечение, которое должно трансформировать получаемую информацию в двумерное изображение.

Обе конструкции видеоголовок включают в себя также узел светодиодных излучателей, отвечающий за экономичное и равномерное освещение участка стенки скважины. Поскольку зонд по скважине перемещается с помощью досылочных штанг, при разработке их конструкции особое внимание было обращено на малый вес, простоту и надежность их соединения между собой [11].

Информация с видеоголовки по кабелю подается на видеотюнер, установленный в переносном компьютере, на монитор которого выводится полученное изображение. Электропитание видеоголовки зонда осуществляется от аккумулятора. Длина кабеля может достигать 100 м.

#### **Технические характеристики скважинного видеозонда:**

Диаметр скважины для каротажа видеозондом, мм	110—135
Длина скважины, м	15
Диаметр видеоголовки, мм	90
Модель видеокамеры	V/W CCD CAMERA
Размер матрицы, дюйм (пиксел)	1/3 (510 × 492)
Чувствительность, лк	0,3
Автоматическая регулировка усиления, дБ	18
Напряжение питания, В	12

Испытания видеозондов проводились на руднике «Октябрьский» Талнахско-Октябрьского месторождения. На рис. 1.25 приведен план места проведения экспериментов. Видеокаротаж осуществлялся по группе горизонтальных скважин длиной до 15 м и диаметром 110—135 мм.

Зонд с осевым расположением видеоголовки позволяет охватить поверхность скважины по окружности. В этом случае пересекающие скважину трещины, ориентированные произвольно относительно оси скважины, приобретают в идеальном случае вид синусоидальных кривых (рис. 1.26). При этом амплитуда синусоиды пропорциональна углу наклона секущей поверхности к оси скважины: чем круче расположена секущая структура, тем меньше амплитуда. В предельном случае, при угле между осью скважины и поверхностью, равном  $90^\circ$ , амплитуда синусоиды равна нулю. Вследствие этого сечение на двумерной развертке отображается в виде прямой линии. Отмеченные особенности позволяют определять положения трещин в теле массива.

Результаты работы видеосистемы по одной из скважин представлены на рис. 1.27 в виде серии характерных изображений. Применялся зонд с радиальным

расположением видеокамеры. Снимки расположены сверху вниз и слева направо в соответствии с движением зонда от устья скважины в глубь массива. Высота снимков соответствует длине просматриваемого участка массива и равна 45 мм, а ширина определяется сектором осмотра и равна длине дуги ~70 мм. Внизу слева под каждым снимком указана глубина, на которой производилась съемка.

Изображения на рис. 1.27, *а*, *б* относятся к приконтурной зоне выработки. Здесь выделяются отслоения (рис. 1.27, *а*) и продольная трещина (рис. 1.27, *б*), которая пересекается серией мелких поперечных трещин. На глубине от 0,8 до 5,8 м дефекты вдоль скважины не отмечались. На рис. 1.27, *в* (5,8 м) видна веерообразно расходящаяся с правого верхнего угла серия мелких трещин. Они отвечают ослабленной зоне. На рис. 1.27, *г-е*, *и*, *л*, *н*, *о* наблюдаются крупные трещины, пересекающие скважину под разными углами, раскрытие которых не превышает 1 мм.

По прогнозным геологическим картам, на данном участке горного массива скважину в интервале 9–10 м должна пересекать под углом тектоническая трещина (см. рис. 1.25). Однако наличие трещины проведенным видеокоротажом обнаружить не удалось. Интересен рис. 1.27, *ж*, где продольными и поперечными трещинами выделяется прямоугольная структура. Строго поперечные дефекты скважины (см. рис. 1.28, *м*, *т*) обусловлены, по-видимому, работой режущего инструмента (бурение скважины было произведено вращательным станком).

Таким образом, созданный в лаборатории горной геофизики ИГД СО РАН макет видеокоротажного зонда проявил в натурных испытаниях удовлетворительную для практических целей работоспособность. В плане совершенствования видеозонда предполагается оснастить его узлом регистрации расстояний и углового положения видеоголовки, а также программными средствами определения ориентации плоскостей ослабления (систем трещин) и их распределения.

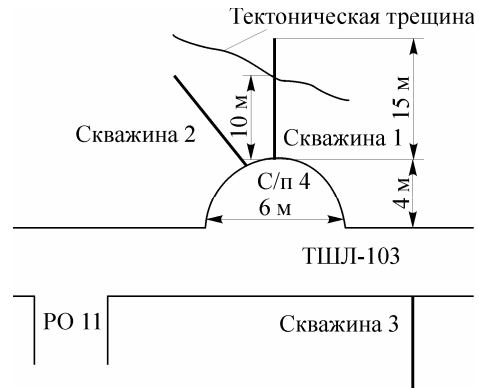


Рис. 1.25. План участка проведения экспериментальных работ.

С/п — сейсмопавильон, РО — разведочный орт.

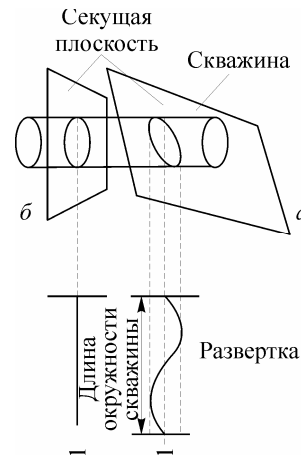


Рис. 1.26. Вид трещины при различных углах расположения секущей плоскости:

*а* — угол сечения больше  $0^\circ$ , но меньше  $90^\circ$ ; *б* — секущая плоскость расположена перпендикулярно оси скважины.

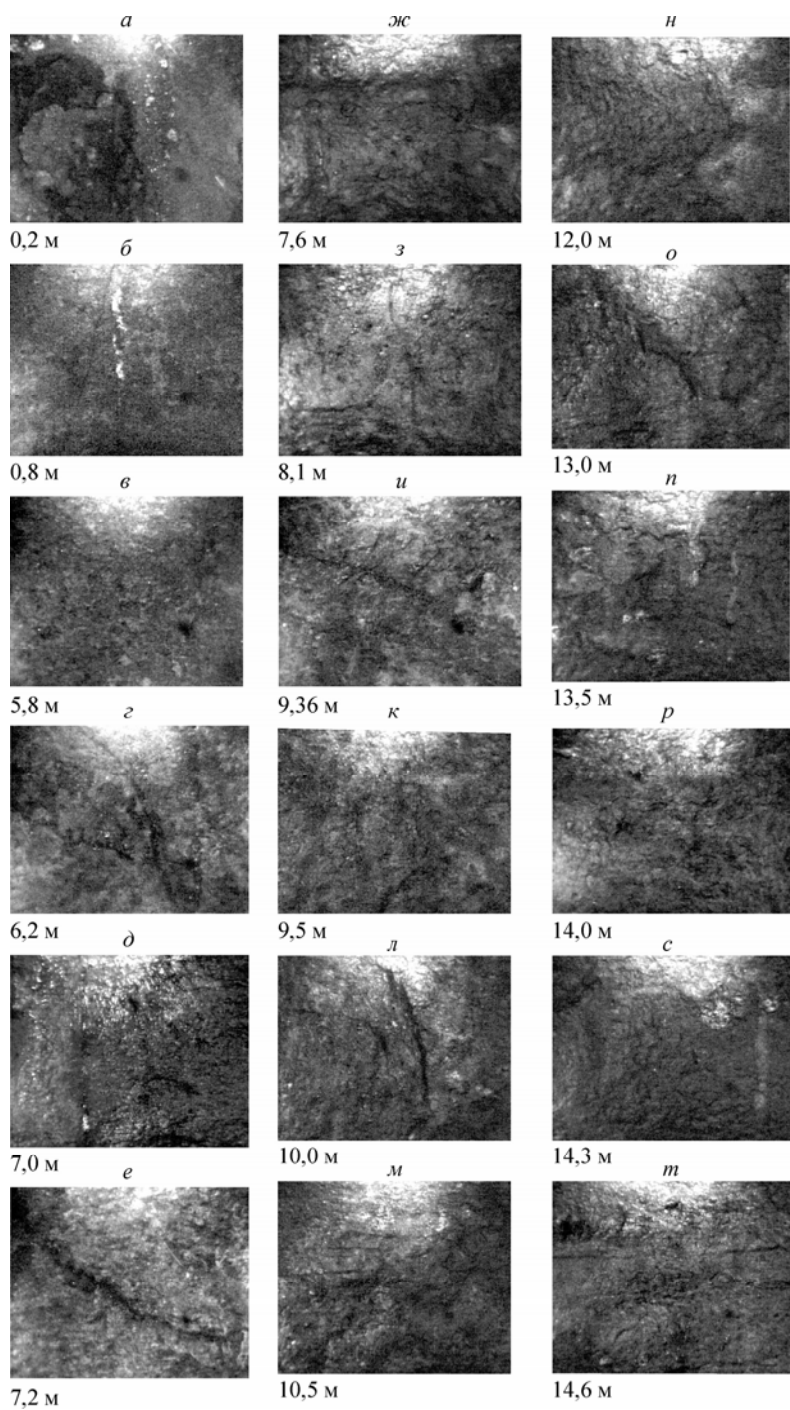


Рис. 1.27. Фрагмент изображений видеокаротажа скважины 1.

Поясн. см. в тексте.

## 1.8. АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ «БАЙКАЛ-АС»

Наряду с разработкой лазерного дальномера для построения системы сейсмодеформационного мониторинга проводились работы по совершенствованию аппаратуры контроля виброакустических возмущений на базе высокочувствительной сейсмической станции «Байкал-АС».

Разработана серия улучшенных автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения (АРСС) «Байкал-АСН» (рис. 1.28, см. вклейку), предназначенных для проведения исследовательских и прикладных работ в геофизике и сейсмологии, при создании временных локальных сетей для проведения сейсмического мониторинга за состоянием земной коры, неразрушающего контроля инженерных сооружений, исследовании взрывов, источников промышленных и бытовых вибраций и естественной сейсмической активности.

Прочный герметизированный корпус позволяет регистраторам работать в любых погодных условиях в широком диапазоне рабочих температур. На передней панели прибора расположены соединительные разъемы, светодиодные индикаторы, кнопки ручного управления.

Связь между АРСС и компьютером системы обработки данных осуществляется через канал USB 2.0. Пользовательское программное обеспечение позволяет задавать следующие параметры и режимы работы: частоту дискретизации; количество каналов регистрации; время начала и окончания записей; критерии обнаружения сейсмических событий; включение записи по заданным интервалам времени или в режиме непосредственной трансляции сигнала в компьютер (см. рис. 1.28, б).

Внутренний генератор АРСС синхронизируется к времени UTC от встроенного модуля GPS с точностью 1 мкс. Высокая стабильность генератора позволяет регистратору длительное время работать при отключенной антенне GPS. Для коррекции ухода генератора используется линейная интерполяция между двумя истинными (валидными) отсчетами времени GPS.

Функциональные возможности регистратора значительно расширяет применение кнопок ручного управления (автономного запуска). Кнопки позволяют запускать регистратор независимо от расписания, дописывать файлы после завершения работы по расписанию, очищать записанную ранее карту и производить запись на новую карту без расписания.

**Основные технические характеристики.** Все регистраторы имеют три сейсмических канала с дифференциальными входами для подавления синфазных помех. Диапазон регистрируемых частот по аналоговому тракту прибора — 0—300 Гц. Число разрядов аналого-цифрового преобразователя — 24. Частоты дискретизации входных сигналов задаются программно из ряда 50; 100; 200; 500, 1000, 2000 Гц, при этом однозначно выбирается внутренний цифровой фильтр высокого порядка. Коэффициент усиления устанавливается программно для всех каналов из пары 1; 10 (1; 20) с учетом того, чтобы диапазон входного сигнала не превышал значения  $\pm 150$  мВ. Объем энергонезависимой памяти для записи сейсмограмм на основе SD-флэшкарт может достигать 128 Гбайт. Потребление мощности регистратором в режиме записи не превышает 0,6 Вт, при напряжении внешнего источника питания 10—20 В. Регистратор «Байкал-86/87» имеет возможность работать от внут-

ренных гальванических элементов типа D, длительность непрерывной работы при этом составляет порядка 3 сут.

### 1.9. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИСК-3 для СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В Горном институте УрО РАН разработана идеология комплексной многоканальной системы сейсмического мониторинга ИСК-3 с развитым математическим и программным обеспечением (ПО). Разработана техническая документация и выполнено макетирование «тонких» элементов системы. Выполнены работы по оптимизации алгоритмов базовых модулей системы.

Многоканальный мобильный сейсмологический комплекс ИСК-3 предназначен для приема сейсмических колебаний, их преобразования в цифровой вид и регистрации (записи) с привязкой к единому времени. Структура комплекса (рис. 1.29) соответствует структуре стационарных систем сейсмического мониторинга и включает следующие основные модули: регистрирующий модуль, выполненный на базе портативного компьютера Notebook; комплект усилителей, фильтров и плата АЦП-ЦАП; комплект сейсмических датчиков СМЗ-КВ; кабельные линии связи на катушках с выносным распределителем; GPS-приемник привязки к точному времени («Trimble Acutime» или его аналог); блок автономного электропитания и блок калибровки.

Сейсмические датчики СМЗ-КВ (разработка КБ «Геофизприбор» РАН) представляют собой магнитоэлектрические маятниковые приемники, преобразующие скорость механических колебаний в электрический ток. Амплитудно-частотная характеристика датчика имеет столбовидную форму в частотном диапазоне 0,5—50 Гц. Коэффициент преобразования в пределах основного частотного диапазона составляет 200 В/(м·с). По сравнению с другими сейсмоприемниками датчик СМЗ-КВ характеризуется высокой чувствительностью при минимальном уровне искажений. Согласно сертификату Госстандарта РФ, датчик СМЗ-КВ является средством измерения скоростей смещения грунта и признан рабочим эталоном для приборов этого класса.

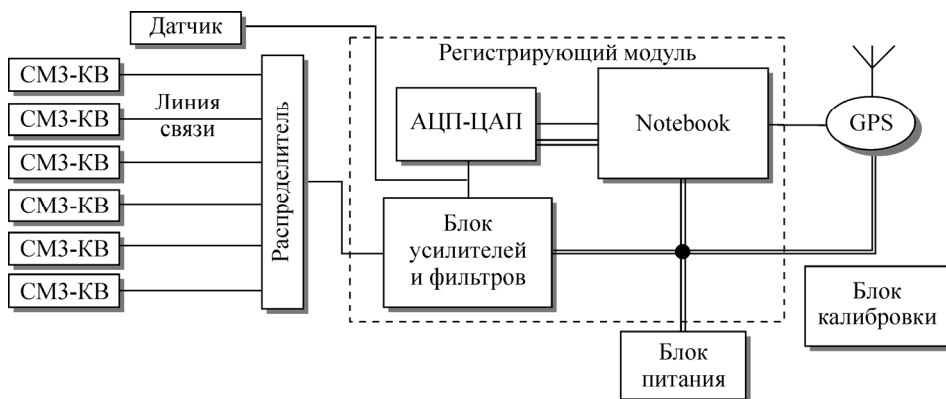


Рис. 1.29. Блок-схема мобильного сейсмологического комплекса ИСК-3.

Кабельные линии связи со специальным автономным распределителем обеспечивают вынос точек наблюдения относительно регистрирующего комплекса на расстояние до 750 м. Используемые многожильные кабели экранированы, что обеспечивает подавление внешних электрических помех. Аппаратное исполнение сейсмологического комплекса (показанное на рис. 1.30, см. вклейку) и, прежде всего, его регистрирующего модуля обеспечивает возможность эксплуатации в сложных полевых условиях, в том числе и в зимнее время.

### Технические характеристики комплекса ИСК-3:

Число основных каналов регистрации	6
Число дополнительных каналов	3
Диапазон частот регистрируемых сигналов (по спаду АЧХ на 3 дБ)	0,1—100 Гц
Число разрядов АЦП	14
Пределы коэффициента усиления	10—10000 ± 5 % В/(м·с)
Частота дискретизации сигналов	От 1,7 до 50000 Гц
Погрешность привязки сигналов к единому времени, не более	1 мс
Режимы регистрации	Непрерывный, триггерный, в заданные интервалы времени, калибровочный
Электропитание (напряжение):	
от аккумулятора	= 12 ± 30 % В
от сети	~220 ± 10 % В
Подключение входных сигналов	Дифференциальное
Тип фильтра НЧ	Баттерворта 8-го порядка
Габаритные размеры	460 × 315 × 160 мм
Рабочий температурный диапазон	от -10 до +50 °С

Для работы с комплексом ИСК-3 разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее оператору максимально эффективно использовать заложенные в аппаратуру технические возможности и реализовать все предусмотренные функции системы: сбор и визуализация данных с подключенных аналоговых каналов; первичный анализ и сохранение полученных данных на жесткий диск компьютера; поддержка различных видов преобразователей АЦП-ЦАП; поддержка внешнего приемника сигналов точного времени (GPS-антенна); обеспечение калибровочных работ.

## 1.10. СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ОПЕРАТИВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В Институте геофизики УрО РАН разработан регистратор сейсмических сигналов «Регистр» для автономной работы в полевых условиях, обеспечивающий непрерывную регистрацию по трем каналам сейсмических сигналов в течение длительного времени. В состав прибора входит трехканальный сигма—дельта-модулятор со встроенными блоками аналоговой и цифровой обработки сигналов

(программно управляемые усилители и фильтры нижних частот), управляющий контроллер AVR, флэш-диск, календарь-часы и источник импульсного питания.

Регистратор спроектирован для работы в комплекте с трехкомпонентным сейсмическим датчиком электродинамического типа и может подключаться к компьютеру для программного управления и обработки регистрируемой сейсмической информации. Связь регистратора с компьютером обеспечивается через стандартный USB-порт. Простой и удобный пользовательский интерфейс программы позволяет тестировать любой узел регистратора, а также производить установку параметров для работы в автономном режиме.

На лицевой панели прибора (рис. 1.31) расположены соединительные разъемы байонетного типа, включатель питания и индикаторный светодиод «контроль», позволяющий визуально оценивать работу прибора в автономном режиме.

В отличие от аналоговых приборов, сейсмический регистратор «Регистр» не только позволяет регистрировать сейсмические сигналы, но и содержит алгоритм, обеспечивающий оперативное вычисление величины энергии сейсмического поля в точке наблюдения [19]. Это существенно повышает время автономной работы регистратора, а при наличии нескольких приборов, установленных в пределах некоторой площади, позволяет оперативно оценивать динамику и особенности распределения сейсмического поля в контуре исследуемого участка. Также разработаны и программно реализованы алгоритмы оценки силовых и деформационных параметров очагов сейсмических событий (сейсмической энергии, сейсмического момента и тензора сейсмического момента) применительно к условиям горно-добывающих предприятий.

Регистратор может применяться для записи ближних и удаленных землетрясений, для оценки сейсмоопасности участков и площадей, в том числе техногенного характера, для изучения геологических структур, расположенных на глубинах десятки километров, и т. п.



Рис. 1.31. Регистратор сейсмических сигналов «Регистр» с трехкомпонентным электродинамическим датчиком.

Одним из вариантов компьютерного представления данных при проведении сейсмического мониторинга с использованием регистраторов типа «Регистр», размещенных по площади и организованных в виде сетевого «куста» с единым центром сбора данных, служит динамическая карта исследуемого геообъекта (например, горной выработки), на которой в реальном времени отображаются изменения энергетических уровней регистрируемого сейсмического поля. Это позволяет осуществлять оперативную оценку сейсмической обстановки и сокращает время принятия решения при активизации сейсмического поля.

На рис. 1.32 (см. вклейку) приведен пример построения гистограмм энергии  $Z$ -компоненты сейсмического сигнала, зарегистрированного в пяти точках наблюдения, равномерно распределенных по площади. Измерения проводились синхронно с помощью группы одноканальных регистраторов «Регистр» в частотном диапазоне 32 Гц, а вычисления энергии и запись результатов в каждой точке наблюдения осуществлялась в окне суммирования 0,5 с. Время непрерывной записи составило 48 ч. На гистограммах выделяются дневные (более активные) и ночные периоды.

На основе гистограмм для каждой временной отметки строится карта распределения энергии  $E_{WIN}$  по площади исследуемого объекта для различных компонент сейсмических сигналов (рис. 1.33, см. вклейку). Применяя компьютерные технологии, несложно осуществить операцию последовательного представления карт  $E_{WIN}$ , т. е. наблюдать временное изменение энергии сейсмического поля на исследуемой площади. Разработанная аппаратура позволяет снижать плотность потока данных на выходе регистрирующего прибора и, следовательно, оперативно и качественно оценивать изменения динамики сейсмического поля в пределах исследуемой площади [19].

#### **Технические характеристики регистратора сейсмических сигналов «Регистр»:**

Число сейсмических каналов	3
Диапазон регистрируемых частот	0,01—64 Гц
Число разрядов аналого-цифрового преобразователя (устанавливается программно)	16 или 24
Частоты среза управляемого цифрового фильтра нижних частот	2, 4, 8, 16, 32 и 64 Гц
Глубина подавления в полосе непропускания	$\geq 100$ дБ
Ступени усиления (устанавливаются программно)	1, 2, 4, 8, 16, 32 и 64
Напряжение питания	10—20 В (мощность потребления 0,35 Вт)
Диапазон рабочих температур	От $-30$ до $+45$ °С
Режимы работы «Поток»	Регистрация сейсмического сигнала
«Сумма»	Вычисление энергии сейсмического сигнала



По результатам испытаний системы сейсмологических наблюдений усовершенствовано программное обеспечение к регистратору. С целью увеличения времени непрерывной регистрации сейсмических данных введен аналого-цифровой преобразователь, принцип работы которого базируется на принципах дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ). Оригинальность способа заключается в том, что в цифровую форму преобразуются сумма входного сигнала и усиленная разность входного сигнала и сигнала, восстановленного после цифрового преобразования. Это позволяет минимизировать восстановление исходного сигнала при появлении ошибок в процессе передачи данных. Кроме того, аналого-цифровой преобразователь при 12-разрядной сетке обеспечивает характеристики, близкие к 16-разрядному преобразователю как по разрешению, так и по мгновенной динамике преобразования, при этом плотность записи цифровых данных снижается на 25 %.

Для повышения качества обработки информации в программу управления и обработки данных Reg3MS системы «Регистр» введена функция расчета спектров сейсмических сигналов. На рис. 1.34, *a* (см. вклейку) показано корневое меню установки и тестирования узлов регистратора, на рис. 1.34, *б* приведен демонстрационный пример рабочего окна визуализации программы Reg3MS с записью вибrogramмы и рассчитанным спектром записи [20].

Способы оценки расширенного ряда параметров сейсмических явлений апробированы на материалах локальных сейсмологических наблюдений, проведенных на руднике Таштагольский ОАО «Евразруда» (Кемеровская область).

### **1.11. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГОРНЫХ УДАРОВ И ВЗРЫВОВ ДЛЯ РУДНИКОВ ТАЛНАХА**

Исходя из необходимости измерять перемещения геоблоков и определять деформации в напряженных горных массивах с естественной и наведенной трещиноватостью в подземных условиях рудников и шахт, опасных по пыли и газу, ИГД СО РАН разработал скважинный вариант оптоэлектронного деформометрического приборного комплекса продольного типа МОЭД-1п во взрывобезопасном исполнении [14, 21], предназначенного для построения систем деформационного мониторинга техногенных землетрясений, горных ударов и взрывов в подземных условиях рудников и шахт Талнаха.

Компоненты приборного комплекса по взрывозащите относятся к группе 1 [22]. Температура поверхности элементов конструкции и искробезопасных цепей, расположенных во взрывоопасной зоне, в нормальном и аварийном режимах не превышает величин, указанных в [22] для класса Т6 (80 °С). Искробезопасные электрические цепи электронных компонентов системы соответствуют уровню *ib* согласно [23], маркировка взрывозащиты — РВ ExdibI по [22].

Входящие в состав системы модули измерительный и согласования МС1 предназначены для эксплуатации во взрывоопасных подземных выработках рудников и шахт, имеют уровень взрывозащиты «Взрывобезопасное электрооборудование», маркировку РВ ExdibI на взрывозащищенность и могут устанавливаться в зонах класса 1 и 2 по [22, 23].

Модули МИ и МС1 имеют оболочки со степенью защиты IP54 по [24]. Входящий в состав системы модуль согласования МС2 электрически связан с модулем согласования МС1 и также имеет маркировку взрывозащиты РВ ExdibI. Модуль МС2 предназначен для эксплуатации в помещении на поверхности вне взрывоопасной зоны.

При создании системы учитывалось ее соответствие решаемым задачам геомеханического мониторинга блочных геосред, требованиям руководящих и нормативных документов [25—28]. Функции, реализуемые системой: измерение линейных перемещений геологических блоков в горном массиве вдоль горизонтальной оси через скважину; передача и накопление измерительной информации в компьютере; отображение регистрируемых данных в графическом виде.

Для обеспечения функционирования системы используются компьютер с операционной системой Windows-XP и специализированное программное обеспечение. Для проверки измерительных компонентов системы разработан метрологический стенд.

**Принцип действия и описание системы.** В состав системы (рис. 1.35, см. вклейку) входит набор аппаратных средств, предназначенных для установки в подземных и наземных условиях рудников и шахт. Подземная часть системы содержит измерительный зонд, модуль согласования МС1 и блок питания БП, наземная — модуль согласования МС2 и ноутбук, подключаемые при помощи соединительных кабелей КБП, КМИ, КМС, КМ и кабельной линии связи ЛС с распределительными коробками УШТС.

Для измерений продольных перемещений и определения деформаций в горном массиве используется горизонтальная скважина, которую бурят в борт выработки на контролируемом участке (рис. 1.36). При этом скважина пересекает блоки пород, образованные зонами дезинтеграции, и заглубляется в неразрушенную часть массива.

Измерительный зонд приборного комплекса предназначен для установки в скважине. В состав зонда входят: базовый модуль МБ, измерительная штанга Ш, измерительный модуль МИ, досылочная штанга ШД, соединительный кабель

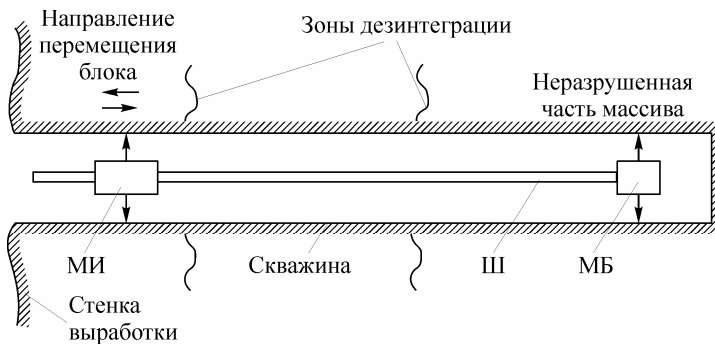


Рис. 1.36. Схема измерения перемещений геоблоков измерительным зондом приборного комплекса МОЭД-1п.

Поясн. см. в тексте.

КМИ. Соединенные последовательно базовый модуль, штанга и измерительный модуль образуют измерительную базу, относительно которой производятся измерения перемещений геоблока.

При установке измерительного зонда в скважине выбирают реперную Р0 и контрольную Р1 точки измерений. Точки Р0 и Р1 расположены на расстоянии  $L$  друг от друга. В скважину вводится измерительный зонд, состоящий из базового модуля МБ, штанги Ш и измерительного модуля МИ. Базовый модуль предназначен для жесткого закрепления базы зонда в реперной точке Р0 горного массива. В состав модуля входят корпус, соединительный фланец и распорный узел РУ, который обеспечивает жесткую связь со стенкой скважины.

Измерительный модуль МИ предназначен для измерения перемещений геоблока через скважину в контрольной точке Р1 горного массива. Модуль состоит из корпуса с соединительными фланцами на концах и снабжен подвижной опорой, которая обеспечивает крепление модуля к стенке скважины в точке измерения Р1 контролируемого геоблока. Внутри корпуса измерительного модуля МИ установлен датчик линейных перемещений ДЛП с подвижным измерительным наконечником, электрическим кабелем и разъемами. Датчик ДЛП с помощью наконечника через подвижный распорный узел обеспечивает измерение величины продольного перемещения геоблока относительно базового модуля.

Распорный узел подвижной опоры модуля МИ жестко крепится к стенке скважины в контрольной точке Р1 и может свободно, без люфтов, перемещаться вдоль оси корпуса. При перемещении геоблока вдоль оси скважины относительно неразрушенной части массива подвижная опора измерительного модуля МИ перемещается относительно штанги Ш и базового модуля МБ. Это перемещение регистрируется датчиком ДЛП, установленным в МИ.

Измерительная штанга ШС состоит из набора соединительных секций СС и обеспечивает жесткое соединение базового МБ и измерительного МИ модулей в составе измерительного зонда. Соединенные последовательно МБ, ШС и МИ образуют измерительную базу зонда приборного комплекса, с помощью которой производятся измерения перемещений выделенного геоблока относительно неподвижной части горного массива.

Секция досылочной штанги СД позволяет устанавливать измерительный зонд на заданном расстоянии от устья скважины. Секции измерительной ШС и досылочной СД штанг выполнены однотипными и могут отличаться только по длине. Каждая соединительная секция СС состоит из трубчатого корпуса с соединительными механическими фланцами, расположенными на торцах, соединитель-вилка (тип В) и соединитель-розетка (тип Р).

Модуль согласования МС1 предназначен для приема данных с датчика ДЛП, преобразования и передачи их по линии связи ЛС. Линия связи обеспечивает передачу данных от модуля МС1 к модулю МС2 с подключением через коробки УШТС. Модуль согласования МС2 предназначен для приема данных от модуля МС1 и ввода их в компьютер, установленный на рабочем месте оператора. Компьютер обеспечивает прием, накопление, хранение, обработку и отображение результатов измерений на экране монитора. Питание системы осуществляется от однотипных автономных искробезопасных блоков питания БП со встроенными аккумуляторами, подключаемых к модулям МС1 и МС2. В целях гальванической

развязки от сети 220 В питание компьютера осуществляется через стандартный преобразователь напряжения ПН от аккумулятора.

**Схема электрических соединений системы.** Структурная схема электрических соединений системы на базе приборного комплекса МОЭД-1п показана на рис. 1.37.

Датчик ДЛП преобразует величину линейных перемещений геоблока в горном массиве в цифровой код формата RS-485 и при помощи кабеля КМИ, проходящего через секцию досылочной штанги, подключен к преобразователю интерфейса модуля согласования МС1. Электропитание датчика и модема 1 производится от стабилизатора через преобразователь по выделенным проводникам кабеля КМИ. Стабилизатор предназначен для стабилизации и подачи напряжения питания на преобразователь интерфейса, датчик и модем 1 модуля МС1.

Преобразователь интерфейса осуществляет преобразование данных интерфейса RS-485 в интерфейс RS-232 и передачу их в модем, установленный в модуле согласования МС1. Модем модуля согласования МС1 осуществляет передачу дан-

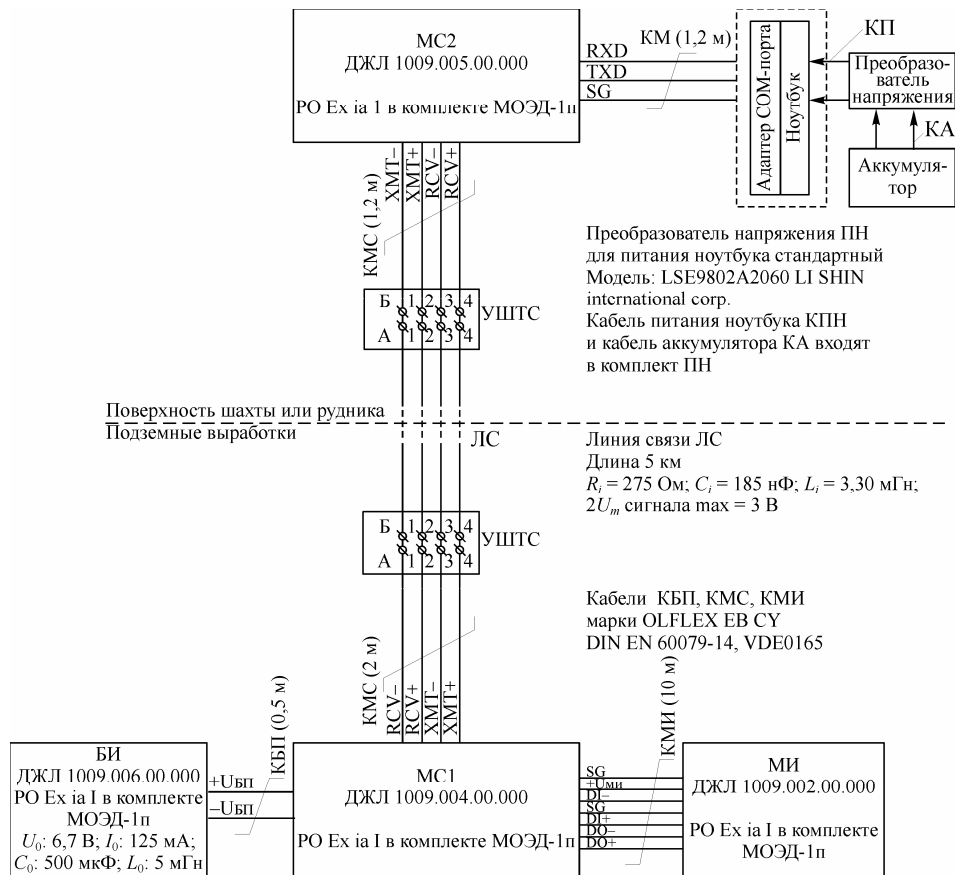


Рис. 1.37. Структурная электрическая схема системы на базе приборного комплекса МОЭД-1п.

Поясн. см. в тексте.

ных по информационной линии связи ЛС в модем, установленный в модуле согласования МС2. Длина линии связи ЛС составляет 7 км.

Линия связи ЛС обеспечивает подключение подземной части системы к рабочему месту оператора на поверхности земли для передачи данных от модуля МС1 к модулю МС2.

Модуль согласования МС2 через модем по информационной линии ЛС осуществляет прием данных от модема модуля МС1 и передает их в компьютер. Компьютер подключается к модулю МС2 при помощи модемного кабеля КМ и обеспечивает прием данных от модема. Для исключения потери информации при случайном отключении напряжения сети переменного тока компьютер и блок питания подключаются к источнику бесперебойного питания.

Представленные разработки касаются усовершенствования измерительного комплекса МОЭД-1п в плане обеспечения искробезопасности и взрывозащиты для работы в подземных условиях рудников и шахт, опасных по пыли и газу, подключения и передачи данных по длинной линии в условиях ограничения электропитания с передающей стороны.

### **1.12. ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИЙ КОМПЛЕКС «ЛАВА» для КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО МАССИВА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ «МЕДЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ»**

Многолетние попытки поиска надежных прогностических признаков землетрясений и горных ударов показали исключительную сложность такой задачи и необходимость комплексного применения всех доступных геофизических методов. К этой проблеме тесно примыкает сравнительно недавно поставленная задача изучения так называемых медленных движений. Новизна изучаемой проблемы оправдывает различные понимания этого неустоявшегося термина. В это понятие укладываются не только медленные волновые или релаксационные процессы пространственного перемещения точек среды (что хорошо регистрируется существующей аппаратурой, например, лазерными деформографами), но также структурные и энергетические изменения свойств среды. Пока не получен достоверный баланс подводимой энергии, например к мощному вибратору, с излучаемой (звуковой, сейсмической и т. п.), остается актуальным предположение о существовании специфической формы переноса энергии в виде переупаковок блочно-построенных структур как одного из механизмов «медленных движений» [29]. Очевидно, в таких исследованиях целесообразно использовать как традиционные пассивные, наблюдательные, методы, так и активные зондирования, позволяющие зарегистрировать изменения каких-либо физических параметров горного массива.

Наблюдения необходимо вести непрерывно в течение длительного времени. Для таких работ требуется создание специализированных измерительных систем. Сложность подобных систем состоит, прежде всего, в разномасштабности одновременно измеряемых величин как по рабочей полосе частот (частоте опроса), так и по точности представления. Перспективен подход, основанный на создании многофункциональной аппаратуры, позволяющей выполнять измерения несколькими геофизическими методами, выдающей увязанную во времени информацию, обработка которой поддается автоматизации. Отличительная особенность такой систе-

мы состоит в том, что она должна выполнять не только функции пассивного измерения, но и функции управления зондирующими сигналами активного мониторинга, как, например, вибросейсмического, геоакустического, электромагнитного и т. п.

В ИНГГ СО РАН разработан и испытан в натуральных условиях макет измерительно-управляющего комплекса «ЛАВА», состоящего из трех взаимосвязанных систем (рис. 1.38, см. вклейку):

1 — «ЛАВА-СМ» — система мониторинга (регистрация «медленных движений»);

2 — «ЛАВА-ПУ» — регистрация и управление электроприводом виброисточника;

3 — «ЛАВА-МП» — мониторинг, контроль, обработка и архивирование потока данных.

Комплекс позволяет одновременно генерировать управляющие зондирующие сигналы, регистрировать отклики геофизических датчиков на возбужденные поля в разных частотных диапазонах и выполнять обработку потока данных практически в реальном масштабе времени.

На рис. 1.39 (см. вклейку) приведены результаты тестирования системы «ЛАВА-СМ» в режиме пассивного (эмиссионного) мониторинга с повышенной частотой дискретизации, дополненные статистическим и частотным анализом акустической записи.

В базовой системе комплекса «ЛАВА-ПУ» реализована возможность доступа по глобальной сети Интернет для оперативного контроля заданных и текущих параметров силового электропривода дебалансного виброисточника на основе асинхронных электродвигателей. Контроль основных параметров электропривода (рис. 1.40, см. вклейку) обеспечивался в реальном масштабе времени.

На базе разработанного комплекса «ЛАВА» предложена и реализована высокочувствительная методика измерения вариаций скоростей упругих волн как индикаторов изменения напряженного состояния горного массива, основанная, с одной стороны, на прецизионном синтезе зондирующих сигналов, а с другой — на использовании фазовых спектров для выделения времен вступлений целевых волн. Ниже приведены результаты экспериментального опробования предложенной методики в натуральных условиях на грунтовом массиве, возмущаемом низкочастотными колебаниями мощного вибратора и периодически просвечиваемом в акустическом диапазоне частот. Показана возможность разделения некоторых типов влияний естественного и искусственного происхождения на скорости волн в исследуемых областях среды.

#### **Аппаратура, методика и результаты измерения «медленных движений».**

Активный вибросейсмический мониторинг (АВСМ) относится к наиболее чувствительным и тонким методам обнаружения и контроля вариаций параметров упругих сред во времени. В задачу мониторинга входит выявление взаимосвязи этих вариаций с поведением различных геофизических полей, а также с некоторыми известными естественными или искусственными физическими возмущениями. Так, известны применения АВСМ для поиска предвестников землетрясений [30—32], когда календарные ряды вариаций скоростей в сейсмоактивной зоне коррелируются с рядами вариаций других геофизических полей. С проблемой предсказания землетрясений тесно связано применение краткосрочного АВСМ в сопостав-

лении с упругим земным приливом для калибровки тектонических напряжений [33—36]. Долгосрочный ряд подобных наблюдений [37] позволил исследовать сезонные вариации волнового поля в условиях Сибири.

Переход на более высокие частоты зондирующего сигнала (в область геоакустики) открыл возможность изучения нелинейных свойств геологических сред и физического моделирования глобального вибромониторинга с использованием управляемых искусственных возмущений. В работах [38, 39] было обнаружено, что в процессе интенсивной вибрационной активации рыхлой среды ее упругие параметры, ответственные за скорость и поглощение, значительно изменяются. Было также замечено, что после прекращения стороннего возмущения («накачки») параметры среды, свойственные ее спокойному состоянию, восстанавливаются не сразу, а приходят в норму постепенно, в течение продолжительного времени, т. е. релаксируют. Проблема измерения релаксационных вариаций в реальной среде осложнена не только их малыми абсолютными значениями, но и необходимостью отделения «локальных» возмущений исследуемой среды от «глобальных» причин, способных воздействовать одновременно на всю систему наблюдений. Задачей эксперимента являлось усовершенствование методики анализа рядов сейсмических виброкоррелограмм мониторинга с целью обеспечения высокой чувствительности АВСМ, необходимой для детального изучения процессов релаксации упругой среды и обнаружения так называемых медленных движений [40].

На рис. 1.41 (см. вклейку) представлена схема полевого эксперимента. Установка состоит из низкочастотного вибратора В, служащего для создания пульсирующей нагрузки на массив находящегося под ним грунта; высокочастотного излучателя И, предназначенного для акустического просвечивания массива; сейсмических датчиков, установленных как во внутренних точках среды, в скважинах, так и на ее поверхности. Вибратор В дебалансного типа (с приводом от электродвигателей, с платформой площадью  $9 \text{ м}^2$  и общей массой  $35 \text{ т}$ ) способен развивать пульсирующее усилие с амплитудой до  $350 \text{ кН}$ . Он служит источником возмущающего воздействия — «накачки», и в описываемых экспериментах работал на фиксированной частоте  $7 \text{ Гц}$ . Акустический излучатель И пьезокерамического типа является источником зондирующего свип-сигнала, просвечивающего массив грунта под платформой вибратора В. Он имеет площадь платформы  $0,2 \text{ м}^2$ , резонансную частоту  $900 \text{ Гц}$  и способен развивать полную мощность до  $1 \text{ кВА}$ . Диапазон частот зондирующего сигнала в этих экспериментах составлял  $160\text{—}580 \text{ Гц}$ .

Регистрирующей системой служила многоканальная цифровая сейсмостанция «ЛАВА-СМ», способная записывать непрерывные виброграммы практически неограниченной длительности одновременно в двух частотных диапазонах: сейсмологическом ( $100 \text{ Гц}$  квантования) и высокочастотном (от  $2$  до  $24 \text{ кГц}$  квантования). Натурный эксперимент состоял в периодических просвечиваниях подвибраторного массива, часть из которых в начальный период наблюдений сопровождалась работой вибратора «накачки». Помимо виброграмм сейсмических датчиков записывалась виброграмма электромагнитной наводки от цепи силового питания пьезоисточника на кабель синхронизации.

**Обработка данных.** Состояла из следующих операций.

1. Корреляция с опорным сигналом, представляющим собой аналитическое выражение первой гармоники управляющего сигнала свип-генератора ПГ. Син-

хронизирующим сигналом между воспроизведенной виброграммой и опорным сигналом служил импульс «Пуск», записываемый в каждом сеансе зондирования на одном из каналов. В результате корреляции восстанавливалась полная импульсная сейсмограмма.

2. Интерпретация волнового поля и выбор целевых волн мониторинга. Эта операция выполнялась однократно либо повторялась при переобработке полученного ряда. В результате выбирались одно или несколько окон времен пробега, содержащих отчетливо выраженные волновые импульсы, в которых затем и исследовались временные вариации.

3. Выбор референц-сеанса.

4. Анализ временных вариаций  $\tau_k$  по каждому из датчиков и по каждому из целевых волновых импульсов в двух частотных диапазонах относительно референц-сеанса. Эта операция выполнялась в частотной области с использованием фазовых спектров  $\Phi_k(j2\pi f)$ :

$$\tau_k = \frac{\Phi_k(j2\pi f) - \Phi_0(j2\pi f)}{2\pi f}, \quad (1.1)$$

где  $k$  — календарный номер сеанса зондирования;  $k = 0$  — номер, присвоенный референц-сеансу;  $f$  — частота.

5. Коррекция календарных рядов временных вариаций по календарному ряду времен прихода максимального значения коррелограммы электромагнитного импульса.

6. Анализ вариаций разностных времен между различными точками исследуемого массива.

На рис. 1.42, *а* (см. вклейку) показана календарная сборка откоррелированных вибрационных сейсмограмм одного из датчиков с условными номерами сеансов зондирования от 14-го до 47-го. Показаны два анализируемых окна, содержащих волновые импульсы, условно обозначенные как *P*- и *S*-волны. Сеансы с номерами 24...27 (выделены цветом) относятся к интервалу времени мощной низкочастотной «накачки». Рис. 1.42, *б* отражает временные ряды вариаций «авторазностных» времен пробега (т. е. относительно этого же датчика в референц-сеансе). За референц-сеанс принят 19-й, поэтому все значения вариаций в этой точке графика равны нулю.

На рис. 1.42, *в* показан результат «электромагнитной» коррекции времен пробега в соответствии с п. 5 изложенной выше методики. Как видно на графике, закономерности в области релаксации существенно изменились. Исчезли внезапные выбросы, появился заметный тренд. Наиболее резкое увеличение времен пробега, видимое и непосредственно на календарной сборке, наблюдается в сопровождении «накачки». По окончании «накачки» времена пробега возвращаются к состоянию покоя не сразу. От 28-го до 34-го сеанса (т. е. на протяжении приблизительно часа) идет устойчивый возвратный тренд, наблюдается увеличение скоростей. Однако через 5 мин. со следующего, 35-го, сеанса внезапно фиксируется обратная закономерность — времена пробега вновь начинают увеличиваться, достигая значений, свойственных «свежевозмущенной» среде. После 50-минутной паузы между сеансами 44 и 45 вновь отмечается возврат к уровню покоя, но сразу же и третье по счету в данной серии (или второе — пока ничем не мотивированное) увеличе-



ние времени пробега. Учитывая аналогичное поведение этих кривых после повышения мощности излучателя (увеличения его рабочего амплитудного напряжения до 750 В в 19-м сеансе), можно допустить вариант некоторого изменения свойств исследуемой среды самим инструментом измерения.

На рис. 1.43 (см. вклейку) представлены результаты заключительного, 6 этапа методики — анализ разностных времен пробега волн между различными парами датчиков. Вариации разностных времен между парами датчиков, размещенных в различных точках исследуемого массива и на разных удалениях от источника возмущений, могут выявить медленное распространение изменений параметров по упругому полупространству, что и составляет физическую сущность «медленных движений». Так, все графики межканальных задержек с участием канала 4, находящегося практически на «дне» исследуемого массива, показывают уверенный положительный тренд к исходному уровню «покоя». И в то же время практически горизонтальная линия разности девиаций между каналами 3 и 2, на которую не оказали влияния даже существенные суточные изменения параметров среды (сеансы предыдущих суток — 14...17), показывает возможность разделения «глобальных» (относительно системы наблюдений) и «локальных» источников «медленных движений».

Таким образом, особенностью предлагаемой методики обработки данных активного вибросейсмического мониторинга является использование: фазового спектра для измерения времени с учетом поправок «электромагнитного импульса»; разности фаз для выделения относительно малых вариаций времен пробега, при этом разность фаз в формуле (1.1) не превышает  $2\pi$  и не возникает проблемы неопределенности по кратности фазы; раздельного вычисления задержек волны по разным частотным полосам (см. рис. 1.42, в), что расширяет возможность интерпретации результатов экспериментов; междатчиковых разностей времен пробега для идентификации типа «медленных движений». Теоретически такая методика позволяет достичь чувствительности мониторинга времен пробега примерно 0,1 интервала дискретизации. В нашем случае (при частоте дискретизации 2 кГц) это составляет 0,05 мс. В эксперименте наблюдались устойчивые тренды с размахом до 0,4 мс, что позволяет отнести их к достоверным.

### **1.13. ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Для создания эффективных систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов необходимо знать процессы деформирования и хрупкого разрушения горных пород. Моделирование таких процессов осуществляется экспериментально на малых образцах в лабораторных условиях. Для изучения деформирования и разрушения образцов и сопровождающих их волновых процессов необходимы высокочувствительные устройства, позволяющие измерять малые перемещения и вибрации в широком диапазоне частот. При измерении параметров вибрации используют два метода: динамический и кинематический.

Наибольшее распространение получил динамический метод измерения, основанный на регистрации вибрации объекта относительно искусственной неподвижной системы отсчета, использующий инерционный элемент, связанный с объектом

через упругий подвес. Такие приборы называют преобразователями абсолютной вибрации или сейсмическими системами. Для реализации метода используют пьезоэлектрические и электродинамические преобразователи, относящиеся к генераторному типу преобразователей величины абсолютной вибрации в электрический сигнал. Эти датчики закрепляются непосредственно на исследуемом объекте. Их установка требует длительного времени и не всегда возможна и оправдана.

Кинематический метод измерения заключается в том, что измеряют координаты точек объекта относительно выбранной неподвижной системы координат. Измерительные преобразователи, основанные на этом методе, являются преобразователями относительной вибрации. Такой метод может быть реализован бесконтактным оптическим способом, основанным на фазовых измерениях лазерного излучения, отраженного от движущегося объекта. Эффективность системы достигается при использовании высокоточных быстродействующих устройств приема и обработки оптических сигналов.

Существующие отечественные и зарубежные лазерные измерители перемещений и вибрации, как правило, не предназначены для использования в условиях подземных горных выработок. Следует отметить, что применяемые в конструкции этих устройств лазерные источники и методики измерения в условиях открытой атмосферы существенно ограничивают точность и чувствительность на сравнительно небольших базовых расстояниях (десяtkи метров).

В предлагаемом лазерном измерителе используется кинематический метод измерения. Лазерный измеритель относится к интерференционным оптическим измерителям малых перемещений, построенных по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с переносом фазовой информации из оптического диапазона в радиочастотный методом оптического гетеродинамирования. Принцип работы лазерного измерителя основан на непрерывной регистрации изменения фазы световой волны зондирующего излучения 0,63 мкм, которое проходит оптический путь от измерительного блока до поверхности контролируемого объекта и обратно (рис. 1.44).

Оптическая схема лазерного измерителя является дифференциальной. Величина вибрации исследуемого объекта определяется из анализа изменения разности фаз двух радиочастотных сигналов, поступающих на электронный блок фазового детектора от фотоприемников опорного и измерительного каналов. На выходе фазового детектора выделяется низкочастотный сигнал, пропорциональный амплитуде вибрации объекта. Наличие двух каналов обеспечивает высокую чувствительность в условиях открытой атмосферы. Существенным преимуществом предлагаемого лазерного измерителя, по сравнению с используемыми электродинамическими датчиками вибрации, является возможность измерения амплитуд и частот вибраций локальных участков исследуемого объекта. Такой лазерный измеритель малых перемещений разработан в ИЛФ СО РАН и защищен патентами РФ № 1362923 и 2082085. В перспективе подобные лазерные системы и методики измерения малых перемещений и вибраций предполагается использовать в подземных горных выработках для контроля деформирования массивов горных пород.

#### **Основные технические характеристики измерителя:**

- |                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| 1. Мощность лазерного излучателя | 1—2 мВт  |
| 2. Рабочая длина волны           | 0,63 мкм |

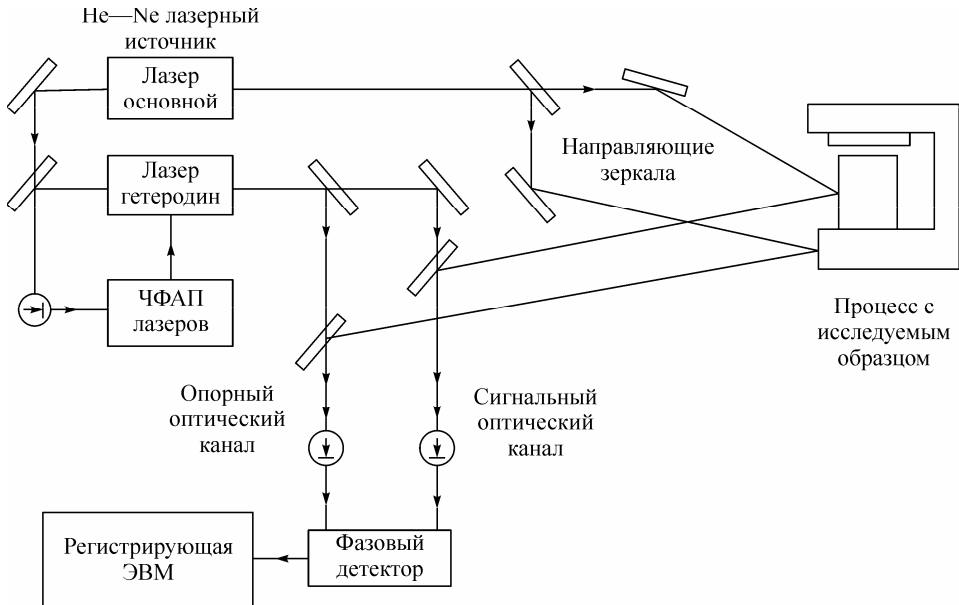


Рис. 1.44. Лазерная система измерения малых виброакустических колебаний.

- |  |                        |
|--|------------------------|
| 3. Количество измерительных каналов          | 2                      |
| 4. Частотный диапазон измерений              | До 50 кГц              |
| 5. Минимальная амплитуда измеряемых вибраций | $3 \times 10^{-4}$ мкм |

Для исследования нагружения образцов горных пород в ИГД СО РАН создан стенд в составе гидравлического пресса марки ДР-36 с максимальным усилием 36 т и экспериментального лазерного деформографа с использованием двух син-

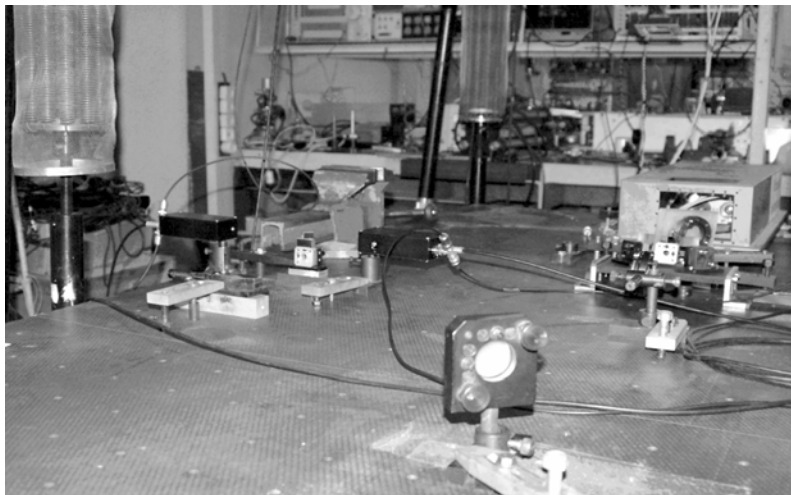


Рис. 1.45. Внешний вид лазерной установки на виброизолирующей платформе.

хронизированных по фазе He—Ne лазеров, разработанных ИЛФ СО РАН. На рис. 1.45 представлен внешний вид основных оптико-механических блоков лазерного измерителя, установленных на виброизолирующей платформе.

Лазерные наблюдения деформирования модельных образцов при изменении нагрузки позволяют исследовать процессы хрупкого разрушения первоначально упругих тел, регистрируя как начало зарождения трещин, так и развитие их вплоть до потери несущей способности тела (рис. 1.46, см. вклейку). Контроль разрушения обеспечивается посредством регистрации деформаций и акустических сигналов. Акустодеформационные наблюдения с использованием высокоточного лазерного деформографа при нагружении образцов горных пород с помощью пресса позволяют изучить физико-механические свойства пород в динамике на пределе прочности.

#### **1.14. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ГЕОМОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ ХИБИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

Развитие многомерных, нелинейных, синергетических, экспертных и других моделей природно-технических систем (ПТС), включающих массивы горных пород и горные предприятия, требуют создания адекватных методов и средств геомониторинга. В настоящее время в Горном институте КНЦ РАН развивается ряд систем, приборов и методов геомониторинга, соответствующее программное обеспечение и базы данных [41]. Методы и подсистемы геомониторинга включают:

- Глобальные сейсмические системы.
- Региональная сейсмическая система.
- Рудничные сейсмические системы.
- Системы контроля наклонов и деформаций.
- Рудничная экспертная система прогноза опасных состояний участков массива горных пород.
- Визуальные наблюдения, фото- и лазерная съемка горных выработок.
- Телевизионная скважинная съемка.
- Контроль разрушения скважин.
- Ультразвуковой контроль состояния пород и удароопасности горных выработок.
- Комплексный прогноз напряженного состояния и удароопасности по контрольным, разведочным и взрывным скважинам.
- Подсистемы службы единого времени.
- Аналитический центр данных, локальные, региональные и глобальные вычислительные сети.

Концепция геомониторинга ПТС предполагает учет следующих особенностей этих систем:

- отправная точка — природная среда с протекающими в ней естественными процессами,
- процессы внедрения и ассоциации техногенной системы с природной средой,
- пространственно-временная неоднородность получившейся ПТС,

развитие нелинейных и многомерных взаимосвязанных физических процессов в ПТС,

фрагментарно-ориентированное получение информации о развитии ПТС, моделирование и прогноз развития ПТС,

частичное управление состоянием системы на основе получаемой в процессе геомониторинга информации, изучение реакции системы на предпринятые воздействия,

необходимый анализ и развитие общей и частных моделей ПТС.

В результате вырабатываются практические рекомендации по оптимизации развития системы в экономическом, социальном и природоохранном плане и поднимается уровень научных представлений о таких системах.

### **1.14.1. Оценка удароопасности массива по контролю разрушения выработок**

Одним из эффективных способов локальной оценки деформирования окружающего массива пород является разработанный в ГоИ КНЦ РАН и прошедший промышленные испытания прибор «КРВ-Лазер», основанный на лазерном сканировании сечений горных выработок в условиях действия высоких напряжений на апатитовых подземных рудниках. «КРВ-Лазер» представляет собой переносной прибор на основе лазерного измерителя расстояний Leica DISTO™ (Leica Geosystems AG, Швейцария) (рис. 1.47). Прибор устанавливается в выработке на треноге и позволяет определять расстояния от точки установки до стенки выработки в произвольно заданной плоскости.



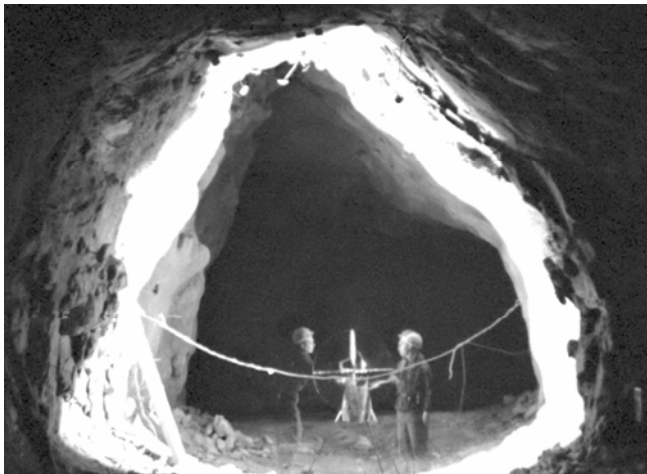
Рис. 1.47. Измерительный блок «КРВ-Лазер».

**Технические характеристики комплекса «КРВ-Лазер»:**

Точность измерений ( $2 \times \sigma$ )	$\pm 3$ мм (classic), $\pm 1,5$ мм (plus)
Диапазон измерений	0,3—30 м (classic), 0,2—200 м (plus)
Время измерения	0,5—4 с
Интерфейс	Имеется Bluetooth для plus
Угловой шаг сканирования в вертикальной плоскости, град	1, 5 и более
Установка платформы под углом к горизонту с точностью, град	5
Дискретность оценки угла наклона контрольных скважин, град.	2 и более
Вес со штативом	3—5 кг
Диапазон температур: работа/хранение	$(-10 \div +50 \text{ } ^\circ\text{C})/(-25 \div +70 \text{ } ^\circ\text{C})$

Показания дистометра могут фиксироваться или передаваться с помощью дистанционного интерфейса в портативный компьютер. Полученные данные обрабатываются с помощью электронных таблиц, специальной программы «MineProfile» и пакета программ AutoCAD®. В результате обработки получают аппроксимированные сечения, на основе которых могут быть построена плоская или объемная модель поверхности выработки, определена степень удароопасности, получены параметры разрушения выработки и их временные изменения.

Экспериментальная проверка аппроксимации отсканированной полости объемной моделью показала, что погрешность не превышает 1—2 %. Положение сканера в выработке привязывают к рудничной маркшейдерской сети. Измерение параметров разрушения выработок велось на апатитовых рудниках Кольского полуострова более 20 лет с помощью фотопланиметрии, а с 2002 г. — на основе лазерного сканирования. На рис. 1.48 показано совмещение фотопланиметрии и лазерного сканирования горной выработки.



*Рис. 1.48.* Сканирование и фотосъемка контура разрушающейся выработки в высоконапряженном массиве рудника.

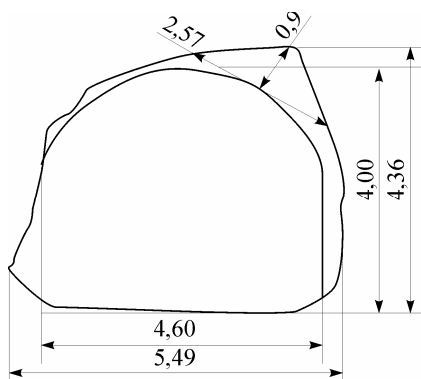


Рис. 1.49. Пример отсканированного сечения выработки, совмещенного с проектным (4 × 4,6 м).

Размеры в метрах.

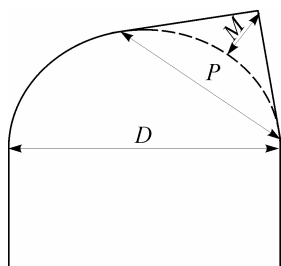


Рис. 1.50. Параметры оценки разрушения контура выработки.

Поясн. см. в тексте.

ном сканировании незакрепленных выработок переориентация максимума разрушения и образование дополнительного объема зоны при отбойке вышележащих секций на Расвумчоррском руднике. На рис. 1.50 показаны параметры характерной зоны разрушения выработки при действии напряжений. Здесь:  $M$  — глубина зоны разрушения, м;  $P$  — ширина зоны разрушения, м;  $D$  — диаметр (ширина, высота) выработки, м.

Анализ данных для выработок с проектной площадью от 8 до 21 м<sup>2</sup> показал, что реальные сечения в условиях повышенных напряжений, как правило, превышают проектные (табл. 1.3, рис. 1.51), причем отношение их площадей доходит в ряде случаев до 1,9, а отношение площади разрушенной зоны к реальной площади сечения выработки находится в пределах 0,02—0,16 (рис. 1.52). Параметры зон разрушения составляют в среднем  $M_{\text{ср}} = 0,7$  м,  $P_{\text{ср}} = 2,4$  м.

Если предположить, что зона разрушения несет информацию о дополнительной энергии, реализованной при действии совокупности напряжений, то по реальным параметрам разрушения можно оценить величину критической энергии  $W_1$ , затраченной при разрушении реального объема пород. По данным [46], удельную

Замена фотосъемки на лазерное сканирование позволила повысить точность с нескольких сантиметров до 2—3 мм, упростить и ускорить процедуру обработки информации, однако при этом увеличивается время съемки, что усложняет работу в удароопасных условиях. С помощью измерений установлено, что в выработках площадь разрушенной части от концентрации напряжений достигает 6 % от площади выработок. Основной объем наблюдений был выполнен для выработок диаметром 3—4 м (более 100 сечений) и 4—8 м (более 70 сечений). Пример аппроксимированного сечения приведен на рис. 1.49.

Эффект дополнительного разрушения выработок (по сравнению с примененным паспортом буровзрывных работ) был отмечен в массивах с повышенными (тектоническими) напряжениями [42—45] и объясняется двумя причинами: взаимодействием динамических и статических напряжений при взрывном способе проходки выработки и воздействием сконцентрированных на контуре статических напряжений, действующих в нетронутом массиве и дополнительно увеличивающихся в зоне влияния очистных работ. В пользу последнего говорит зафиксированная при повтор-

Таблица 1.3

Статистические параметры проектных и реальных выработок по данным лазерного сканирования

Статистический показатель	Параметры сечения выработки		
	$K_1 = S_1/S_0$	$S_2$	$K = S_2/S_1$
Минимум	0,83	0,11	0,01
Максимум	1,89	3,42	0,15
Среднее	1,28	1,04	0,05
Стандартное отклонение	0,24	0,77	0,03

Примечание.  $S_0$  — площадь проектного сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $S_1$  — площадь реального сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $S_2$  — площадь разрушенной зоны, м<sup>2</sup>. Количество измерений 73.

критическую энергию при одноосном напряженном состоянии массива можно оценить как

$$W_1 = \sigma_{сж}^2 / (2E),$$

где  $\sigma_{сж}$  — предел прочности при одноосном сжатии,  $E$  — динамический модуль Юнга.

При разрушении выработок и скважин напряженное состояние у контура является двухосным, переходящим при удалении от контура в неравнокомпонентное трехосное. В этом случае прочность пород увеличивается, по данным [45—47], в 2—4 раза. Для усредненных данных по хибинским породам с учетом объемности допускаем, что

$$W_1 = ((2 \div 8) \sigma_{сж}^2) / E \text{ [Дж/м}^3\text{]}.$$

С учетом данных табл. 1.5 получим среднюю удельную критическую энергию дополнительного разрушения на погонный метр выработок

$$W_2 = W_1 S_{2cp} \text{ [Дж/м]}.$$

Энергия разрушения для участка массива с пройденными выработками может оцениваться по суммарной протяженности зон разрушения  $L_1$ , м, как

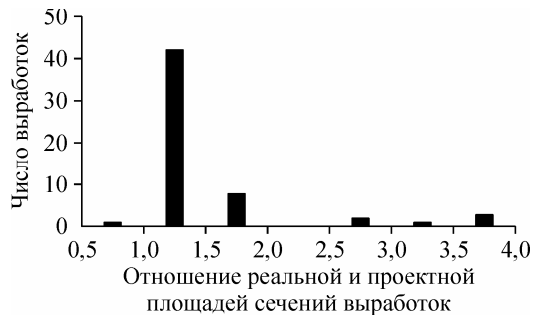


Рис. 1.51. Гистограмма отношения реальных и проектных площадей сечений выработок.

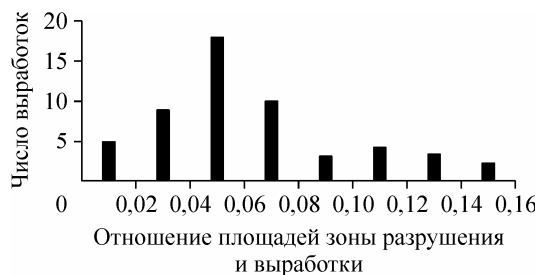


Рис. 1.52. Гистограмма отношения площадей разрушенной зоны и реальной выработки.



$$W_3 = W_2 L_1 \text{ [Дж]}.$$

Такой расчет был выполнен для подэтажных выработок блока-целика Кировского рудника. На начало 1990 г. на буроподсечном горизонте блока-целика по наблюдениям в выработках были зафиксированы разрушения контура на протяжении  $L_1 = 870$  м. Суммарная энергия этих разрушений с учетом данных табл. 1.3 составила

$$W_3 = (8 \div 30) \cdot 10^8 \text{ Дж}.$$

По отношению к объему массива, включающему эти выработки (взят слой  $300 \times 100 \times 21$  м — зона влияния выработки принята равной плюс-минус трем ее диаметрам), удельная критическая энергия разрушения составляет  $(1,2—4,7) \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$ .

Для сравнения с динамическими проявлениями горного давления был выполнен анализ сейсмичности в этом районе по данным Центра геофизического мониторинга ОАО «Апатит». Так как сейсмический мониторинг дает относительно высокую погрешность по координатам, сравнивались удельные (относительно объема) энергии. В этом районе за предшествующие анализу разрушений выработок два года произошло 545 сейсмических событий с энергиями от  $10^2$  до  $10^5$  Дж. Выделившаяся средняя сейсмическая энергия из блока  $300 \times 100 \times 100$  м с разрушенными выработками составила  $0,44 \text{ Дж/м}^3$ .

Таким образом, соотношение удельных сейсмической энергии и энергии на дополнительное разрушение выработок составило около  $0,01 \div 0,04 \%$ . Эти данные не противоречат [48], где «сейсмический коэффициент полезного действия», характеризующий отношение сейсмической энергии к потенциальной, необходимой для горного удара, составляет десятые доли процента. Основная часть критической энергии разрушения реализуется, вероятно, при взрывных работах в процессе проходки выработок и отбойке руды в близлежащих блоках. При мониторинге сейсмичности часть сейсмических событий не регистрируется из-за большой частоты их возникновения, что существенно занижает указанное соотношение. На основе данных о разрушении выработок создана методика оценки удароопасности, отличием которой является использование объемных и временных параметров, связанных с энергией разрушения пород.

### 1.14.2. Телевизионная съемка скважин

Разработан и испытан прибор видеосъемки скважин КТКС «Таис-Апатиты» (рис. 1.53). Работа выполнена совместно с Московским государственным горным университетом. В состав комплекса входят: скважинный гидроизолированный зонд, блок управления, жидкокристаллический цветной монитор, микрофон, набор секций досылочных штанг, центраторы, угломеры, кабель, видеоманитофон, аккумуляторы, зарядное устройство, дополнительные осветители.

#### Технические характеристики КТКС «Таис-Апатиты»:

Режимы работы	Наблюдение (ж/к цв./чб монитор). Съемка с записью на видеоманитофон, цифровой видеорекодер или компьютер
---------------	--



Рис. 1.53. Общий комплекс телевизионной съемки скважин КТКС «Таис-Апатиты».

Видеокамера	Разрешение 320 или 560 килопикселей
Диаметр скважины, мм	От 45 до 150 (дополнительная опция — до 250...300)
Глубина скважин, м	До 80, в том числе обводненных (гидроизоляция до 100 м)
Перемещение по скважине	Свободное под весом зонда с фиксацией вдоль оси скважины С помощью досылочных штанг с фиксацией по оси и азимуту

Комплекс обеспечивает визуальный осмотр контрольных, взрывных и разведочных скважин, пробуренных из подземных выработок, в том числе на нижеле-

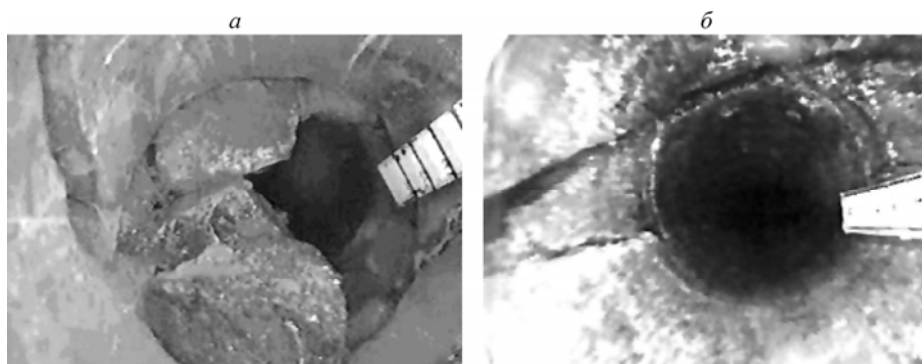


Рис. 1.54. Аварийный (а) и трещиноватый (б) участки скважины по данным телесъемки.

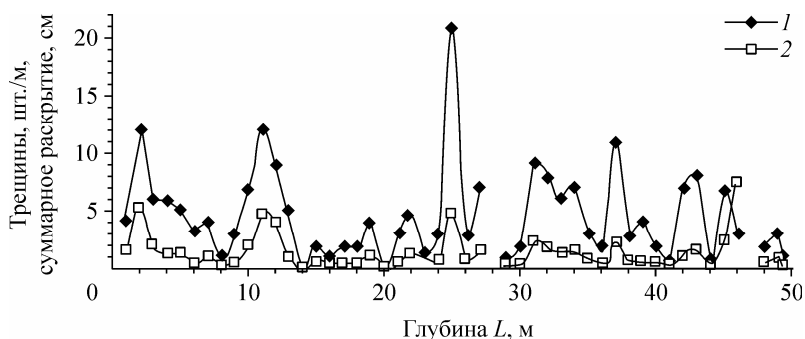


Рис. 1.55. Интенсивность трещиноватости  $I_{тр}$ , тр./м (1), суммарное раскрытие (мощность) трещин  $M_{тр}$ , см/м (2), по глубине скважины 9КД.

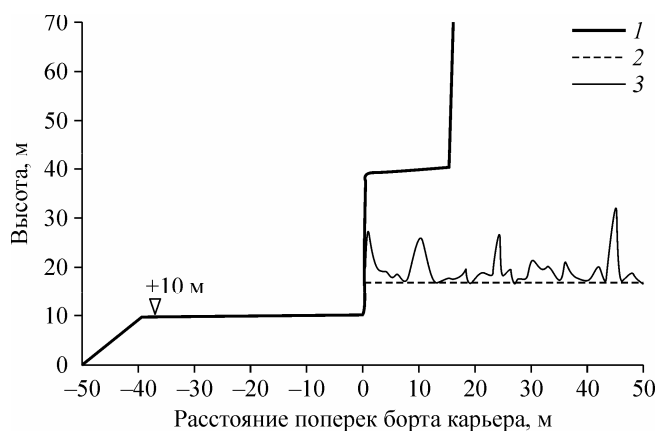


Рис. 1.56. Распределение трещин в борту карьера «Железный» по данным видеокаротажа скважин.

1 — борт карьера; 2 — скважина 9КД; 3 — суммарное раскрытие трещин.

жащие горизонты. Осмотр позволяет оценить трещиноватость и другие формы нарушенности в теле массива (рис. 1.54), прогнозировать снижение устойчивости и возможность обрушения бортов. Весьма эффективным является применение комплекса в сочетании с другими скважинными методами для выделения ненарушенных участков, ультразвукового каротажа и других измерений.

По результатам съемки готовят таблицы и графики по интенсивности трещиноватости (количество трещин на выбранном интервале), суммарному раскрытию трещин. Отдельно выделяют протяженные нарушенные зоны (рис. 1.55, 1.56).

### 1.14.3. Скважинный комплекс ультразвуковых измерений

Ультразвуковой комплекс УК «Ультразвук» (рис. 1.57) предназначен для экспериментального изучения упругих свойств, трещиноватости и напряженного состояния горных пород в массиве с использованием скважин.

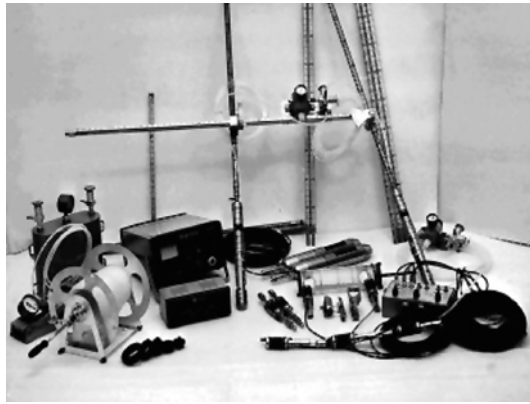


Рис. 1.57. Внешний вид комплекса УК «Ультразвук».

### Технические характеристики комплекса УК «Ультразвук»:

Рабочие частоты, кГц	Режим прозвучивания — 25–1000.
	Режим каротажа — 60
Дискретность отсчета времени, мкс	0,1
Глубина контроля, м	5—15
База контроля, м	Режим прозвучивания — 0,1–5.
	Режим каротажа — 0,1—1
Диаметр измерительной скважины, мм	38—105
Масса измерительного комплекта, кг	15

Комплекс позволяет производить ультразвуковой каротаж горного массива в подземных условиях для оценки удароопасности с использованием шпуров и скважин. Ошибка в единичных измерениях скоростей упругих волн не превышает 3–5 %. Комплекс работает как автономно, так и от внешних источников электроэнергии и сжатого воздуха, скважинные зонды гидроизолированы. В состав комплекса входят: пневматические зонды, ультразвуковой прибор, вспомогательное оборудование (набор досылочных штанг, кабели, пневмошланги, коммутатор, редуктор давления, трансформатор, ресивер, калибровочное устройство, прижимы, переходные кольца, эксцентриковые насадки). ГоИ КНЦ РАН совместно с Московским государственным горным университетом провел модернизацию используемого в комплексе прибора УК-10ПМС-М. Был разработан блок цифрового измерения времен с дополнительными функциями регулировки усиления, выполнена адаптация зонда для скважин большого диаметра.

В качестве выходных параметров ультразвуковых измерений используют пространственные распределения и временные изменения скоростей продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$ , км/с, и амплитуд сигналов  $A_{отт}$ ,  $A_б$ , скоростей  $V_{po}$ ,  $V_{so}$  в образцах, а также их статистическое распределение. Для расчета модулей упругости и напряжений необходимо определять плотность пород,  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>, зависимости скоростей упругих волн от напряжений  $V_{p,s}(\sigma)$  по типам пород. На следующем этапе анализа могут определяться прочностные свойства и напряжения горных пород в массиве, наличие трещин, нарушенных зон и т. д.

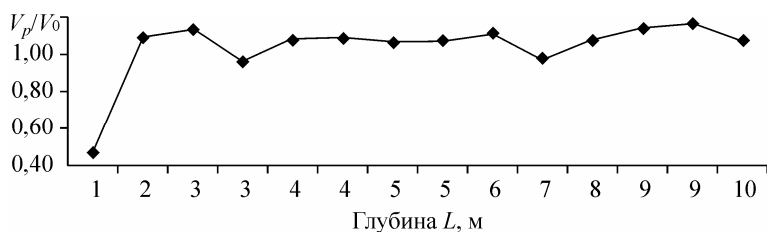


Рис. 1.58. Отношение скоростей продольных волн в массиве  $V_p$  и по образцам  $V_0$ .

В качестве параметра оценки состояния пород может выступать отношение скоростей упругих волн в массиве и в образцах (рис. 1.58). Это отношение характеризует как нарушенные породы, так и зоны, находящиеся в напряженном состоянии.

Напряжения по скоростям упругих волн в массиве по результатам ультразвукового каротажа рассчитывают по формуле [49, 50]

$$\sigma_i = B(V_{pi} - V_{p0}) / (V_\infty - V_{pi}),$$

где  $V_{pi}$  — скорость распространения продольных волн в массиве;  $V_\infty$  — предельная скорость продольных волн в породе при максимальных напряжениях;  $V_{p0}$  — скорость продольных волн в разгруженной породе;  $B$  — коэффициент пропорциональности, фактически кратен напряжению, при котором скорость упругих волн при нагружении образцов составляет  $(V_\infty - V_{p0})/2$ . Приняты следующие параметры:  $V_0 = 4,9$  км/с (для вмещающих пород — пироксенитов),  $V_\infty = 7$  км/с,  $B = 20$  МПа (для аналогичных по прочности хибинских пород). На рис. 1.59 приведены для сравнения напряжения по данным метода торцевой разгрузки. Данные этих двух методов не должны точно совпадать, так как каротаж имеет направление вдоль скважины, а напряжения по методу разгрузки ориентированы перпендикулярно. Тем не менее, можно отметить некоторую зональную коррелированность и совпадение в среднем абсолютных значений.

В многоуровневых системах геомониторинга должны быть общие информационные подмножества не только на уровне интерпретации, но и на уровне кон-

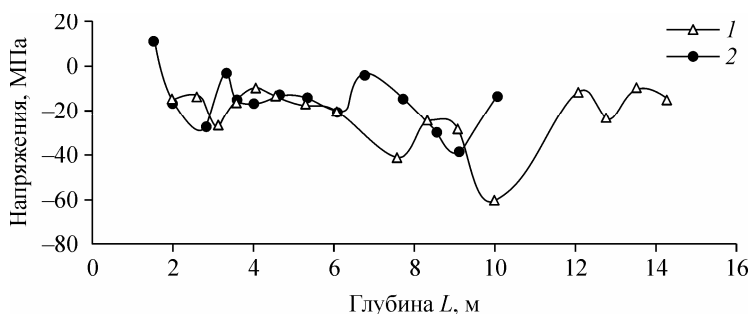


Рис. 1.59. Напряжения по данным ультразвуковых измерений и метода разгрузки.

Напряжения в массиве по данным метода разгрузки  $S_{2(3)}$  — ортогонально скважине (1), по ультразвуковым данным  $S_{y2}$  — вдоль скважины (каротаж) (2).

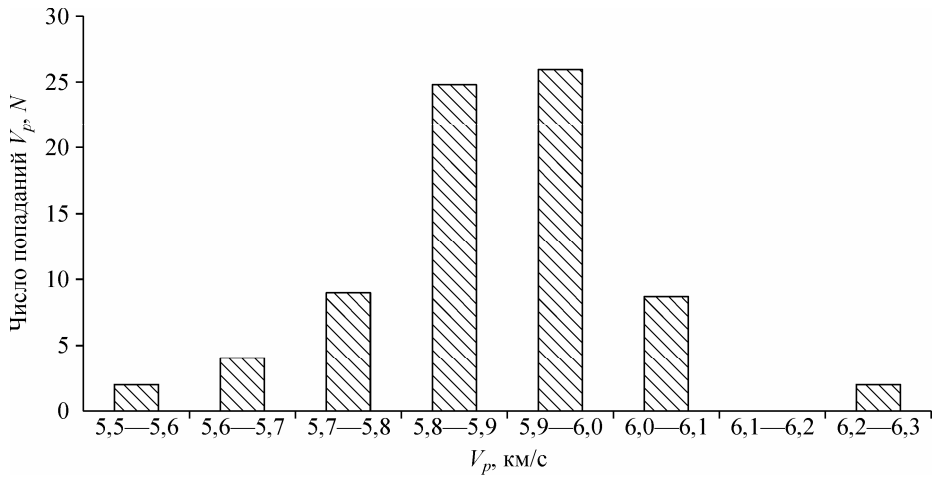


Рис. 1.60. Гистограмма скоростей продольных волн по сейсмическим измерениям.

кретных измерений. Был проведен анализ данных измерений ультразвуковым методом и сейсмических измерений. Измерения проводились на апатитовом руднике, ультразвуковые — вблизи горных выработок с целью контроля приконтурных зон на базах 0,2 м; сейсмические — интегрально, с помощью контрольных взрывов в зоне ведения горных работ для определения скоростной модели и оценки координат сейсмических событий автоматизированной системой контроля сейсмичности массива на базах от 200 до 500 м. Распределение скоростей по сейсмическим определениям приведено на гистограмме (рис. 1.60). По этим данным средняя  $V_p = 5,864$  км/с, число измерений  $N = 48$ , среднеквадратическое отклонение  $S_{vp} = 0,126$  км/с (коэффициент вариации  $C_{ov} = 2,15$  %).

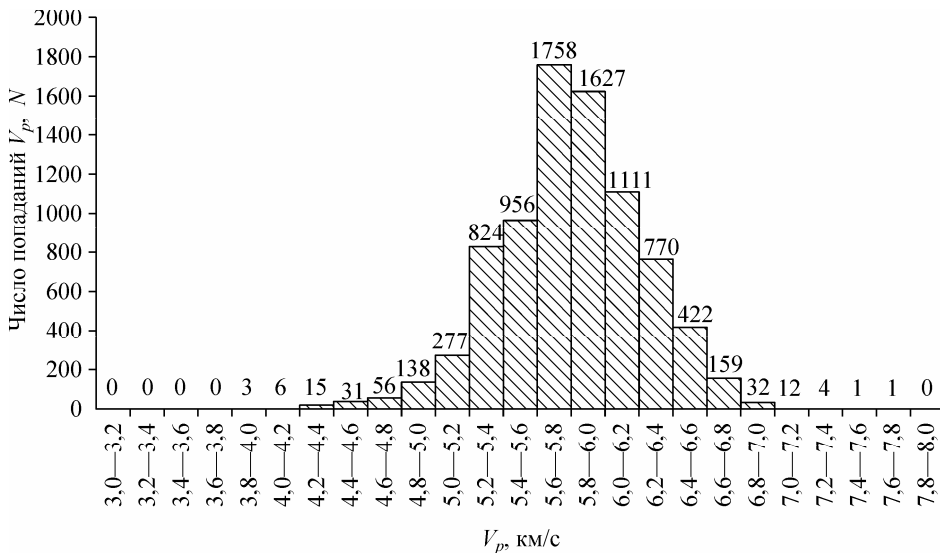


Рис. 1.61. Гистограмма скоростей продольных волн по ультразвуковым измерениям.

Ультразвуковые измерения были проведены по 52 станциям (рис. 1.61). По этим данным средняя  $V_p = 5,81$  км/с, общее число измерений  $N = 8212$ , среднеквадратическое отклонение  $S_{vp} = 0,42$  км/с (коэффициент вариации  $C_{ov} = 7,2$  %).

Отличие скоростей  $V_p$  для отмеченных случаев составляет менее 1 %, что позволяет говорить об устойчивом совпадении определений средних скоростей двумя разномасштабными методами и возможности использования в качестве средних скоростей при расчете координат  $V_p = 5,83$  км/с, при этом соотношение размеров областей эксперимента составило 1 : 1000—2000.

#### 1.14.4. Оценка удароопасности по данным контроля разрушения скважин

Один из эффективных методов локальной оценки состояния приконтурного массива основан на контроле разрушения скважин (КРС). Метод и аппаратура позволяют оценить местоположение и геометрические параметры разрушения в массиве через скважины, определить раскрытие трещин и нарушенных зон и по ним дать оценку напряженного состояния пород и удароопасности горных выработок. В состав измерительного комплекса КРС (рис. 1.62) входят: профилемер, цифровой измерительный прибор, набор досылочных штанг.

##### Технические характеристики комплекса КРС:

Диаметр контролируемого разрушения, мм	50—200
Глубина скважины, м	60
Погрешность измерений диаметра, % от измеряемой величины	1—2,5
Масса комплекса, кг	4

Оценка состояния пород на основе контроля разрушения скважин базируется на эффекте разрушения стенок в зонах концентрации напряжений около горных выработок или в массиве пород. От встречающегося разрушения скважин в зонах

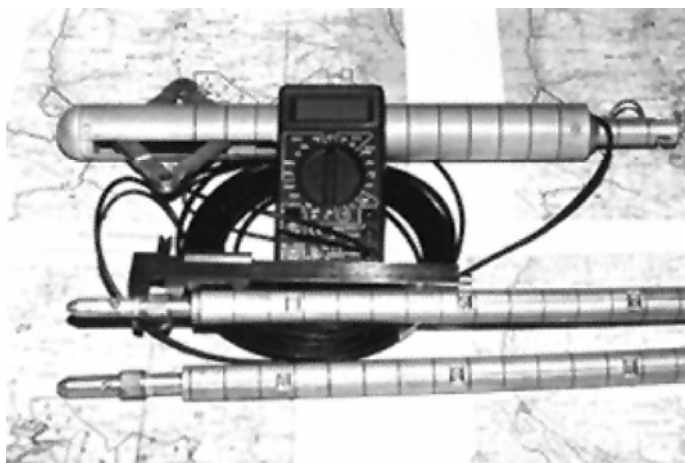


Рис. 1.62. Комплекс КРС для контроля разрушения скважин.



Рис. 1.63. Фотография скважины, разрушающейся под действием высоких напряжений.

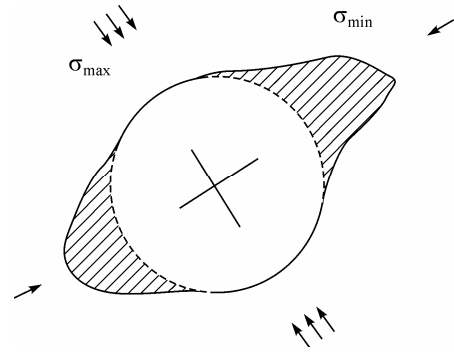


Рис. 1.64. Схема разрушения стенок скважины под действием высоких напряжений.

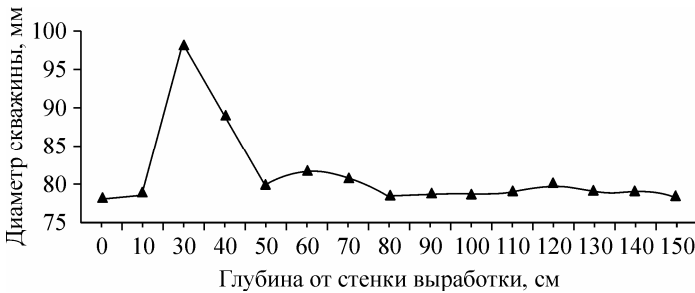


Рис. 1.65. Пример зависимости разрушения контрольной скважины под действием высоких напряжений по данным метода КРС.

повышенной трещиноватости указанный эффект отличается тем, что разрушение захватывает не весь контур равномерно, а имеет ярко выраженные максимумы в двух противоположных стенках (рис. 1.63—1.65, табл. 1.4). Практически, для хибинских месторождений разрушение стенок скважин начинается при условии превышения максимальными нормальными напряжениями половины предела прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{\max} \geq 0,5\sigma_c$ .

Таблица 1.4

Статистические параметры разрушения контрольных скважин в зонах действия высоких напряжений на апатитовом руднике

Параметр	$H_1$ , м	$H_2$ , м	$H_3$ , м	$H_4$ , м	$K_2$
Среднее	0,14	0,24	0,88	0,74	1,37
Максимальное	1,00	1,30	2,40	1,90	1,88
Минимальное	0,00	0,00	0,20	0,10	1,07
Ст. отклонение	0,20	0,25	0,45	0,41	0,21
Коэффициент вариации, %	140	103	51	55	15

Примечание.  $H_1$  — длина зоны разрушения пород (отжима) от контура выработки;  $H_2$  — глубина максимума зоны разрушения пород;  $H_3$  — глубина конца дорожки;  $H_4$  — длина дорожки ( $H_3 - H_1$ );  $K_2$  — отношение  $D_{\max}/D_0$ ,  $D_0$  — диаметр скважины в массиве, мм,  $D_{\max}$  — диаметр на глубине максимума зоны разрушения пород, мм.



Измерения методом КРС в удароопасных условиях на апатитовых рудниках показали, что разрушения контрольных скважин диаметром 52—76 мм находятся в пределах 7—88 % (в среднем 37 %) от неизмененного диаметра. Общее количество станций — 43, количество измерений — 520.

### 1.14.5. Техника контроля техногенных деформаций

Для мониторинга деформирования сейсмоактивных участков массивов горных пород при отработке рудных месторождений ГоИ совместно с ИФЗ и ИРЭ РАН был разработан комплекс кварцевых деформометров и наклономеров КД—КН (рис. 1.66, см. вклейку, 1.67).

#### Технические характеристики комплекса:

Диапазон линейных изменений перемещений, мм	$\pm 0,2$
Нелинейность в диапазоне $\pm 0,2$ мм менее, %	1
Коэффициент преобразования, Гц/мкм	200
Измерительная база, мм	3000—4000 (опция 200)
Диапазон измеряемых углов наклона, угл. мин.	$\pm 10$
Предельное разрешение измерительного тракта, угл. с	$5 \cdot 10^{-3}$
Число измерительных каналов, шт.	До 8
Измерительный интервал, с	1—10

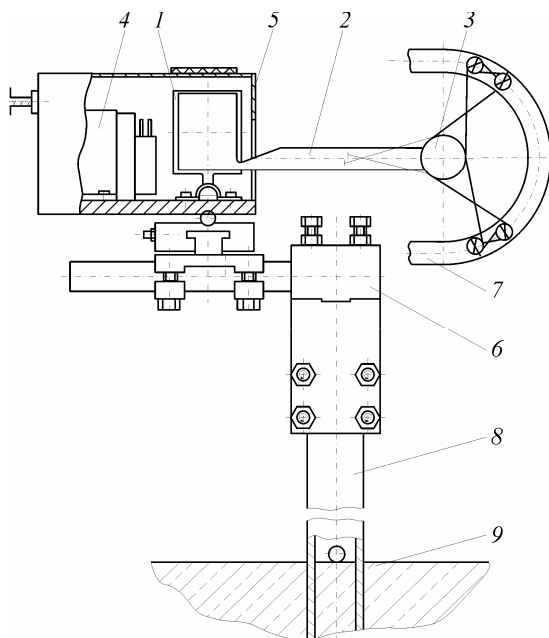


Рис. 1.67. Схема установки кварцевого деформометра.

1 — статор, 2 — ротор, 3 — кварцевый стержень, 4 — преобразователь, 5 — корпус, 6—8 — детали крепления, 9 — основание.

Комплекс был испытан на подземном деформографическом полигоне Объединенного Кировского рудника. На полигоне подготовлены специальные горные выработки для установки комплекса КД—КН, в которых проведена оценка состояния массива методом разгрузки и установлены направления и величины главных напряжений. Измерения показали изменение напряжений в пределах 20—60 МПа, что в среднем в 2,7 раза превышает напряжения от веса налегающих пород. По направлениям главных напряжений в скважинах установлены деформографы.

### 1.14.6. Результаты геомониторинга напряженно-деформированного состояния пород в бортах карьера

Увеличение наклона бортов карьеров является одним из наиболее радикальных путей минимизации затрат на разработку месторождений полезных ископаемых открытым способом. Экономический эффект от повышения до предельного значения генеральных углов наклона бортов даже для среднего по масштабам карьера может быть весьма значителен за счет увеличения глубины его отработки и уменьшения объемов вскрыши. Учитывая значимость правильного определения углов наклона бортов в предельном положении, ГоИ КНЦ РАН провел исследования напряженно-деформированного состояния вмещающего массива пород и параметров нарушенной зоны в приконтурной зоне карьеров [51, 52].

Для проведения исследований была разработана комплексная методика измерения напряжений в бортах карьера и свойств пород методами разгрузки, телевизионной съемки, ультразвукового каротажа, контроля разрушения скважин. На рис. 1.68 показано устройство станции по измерению параметров напряженно-деформированного состояния породного массива методом разгрузки в торцевом варианте (карьер «Центральный» ОАО «Апатит»), на рис. 1.69 — пример распределения напряжений по одной из измерительных скважин.

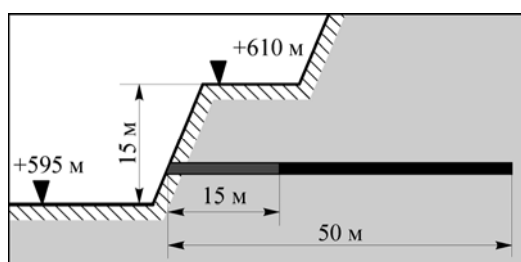


Рис. 1.68. Устройство станции измерения напряженно-деформированного состояния массива пород методом разгрузки в карьере.

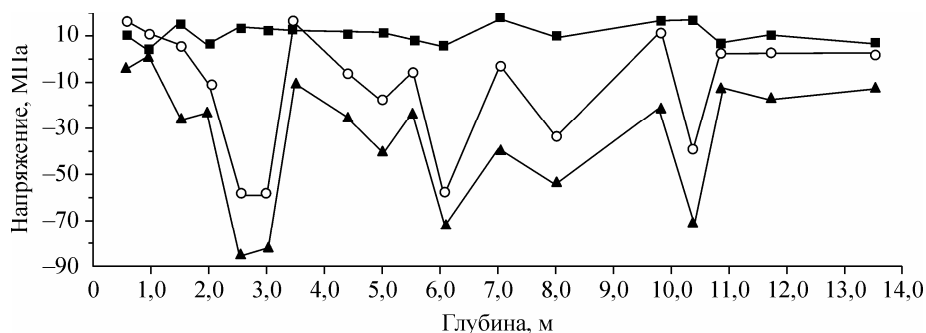


Рис. 1.69. Распределение напряжений по измерительной скважине в борту карьера.

Нижний, средний и верхний графики — распределение соответственно максимальной, минимальной и максимальной касательной компонент квазиглавных напряжений по длине участка измерений в скважине.

Сравнение измеренных (табл. 1.5) и расчетных величин напряжений в массиве показывает, что действующие значения максимальных компонент главных напряжений, полученные на 15 измерительных станциях, превышают максимальные расчетные напряжения от давления вышележащих пород. Невысокие значения действующих напряжений на гор. +610 м карьера рудника «Центральный» объясняются расположением измерительной станции в рабочей зоне карьера, аномалию которой усиливает трещиноватость массива. При этом в большинстве случаев выполняется соотношение  $\sigma_{\max} / \sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}} > 2$ . Это обстоятельство позволяет сделать вы-

Таблица 1.5

Параметры напряженного состояния массива пород крупных карьеров ОАО «Ковдорский ГОК» и ОАО «Апатит»

Номер станции, абсолютная отметка измерительной станции, время проведения измерений, место измерений	$H_{\text{ср}}$ , м	Измеренные параметры напряженного состояния массива пород по результатам измерений методом разгрузки			Расчетные напряжения в массиве исходя из собственного веса вышележащих пород	
		$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$B_{\sigma_{\max}}$ , град.	$\sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}}$ , МПа	$\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}}$ , МПа
<b>Карьер рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК»</b>						
+10 м, 2007, северо-восточный борт	247	20	3	-24	7,4	2,4
+25 м, 2007, северо-восточный борт	232	24	14	-15	7	2,3
+40 м, 2005, северо-восточный борт	217	13	4	18	6,5	2,2
+94 м, 2000, северо-восточный борт	163	20	4	18	5	1,6
+94 м, 2000, северо-восточный борт	163	22	9	-14	5	1,6
+118 м, 2005, северо-западный борт	90	5	-1	6	2,7	0,9
+142 м, 2001, северо-западный борт	65	8	-2	43	2	0,6
+154 м, 2005, юго-восточный борт	52	11	3	88	1,6	0,5
+166 м, 2003, юго-восточный борт	40	3	-1	13	1,2	0,4
<b>Ньюркахкский карьер рудника «Восточный» ОАО «Апатит»</b>						
+500 м, 2002	200	18	12	-16	6	2
+470 м, 2003	230	24	10	-18	6,9	2,3
+470 м, 2005	230	22	12	106	6,9	2,3
+440 м, 2004	260	33	20	56	7,8	2,6
<b>Карьер рудника «Центральный» ОАО «Апатит»</b>						
+580 м, 2005	320	17	4	41	9,6	3,2
+595 м, 2004	305	26	19	37	9,15	3,05
+610 м, 2003	290	5	-3	36	8,7	2,9

Примечание.  $H_{\text{ср}}$  — глубина положения измерительной станции от первоначального рельефа;  $\sigma_{\max}$  — максимальная компонента напряжений;  $\sigma_{\min}$  — минимальная компонента напряжений;  $B_{\sigma_{\max}}$  — угол наклон  $\sigma_{\max}$  к горизонту;  $\sigma_{\text{верт}}^{\text{ср}}$  — вертикальная компонента ( $\gamma H$ );  $\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}}$  — горизонтальная компонента ( $\lambda \gamma H$ , где  $\lambda$  — коэффициент Пуассона). В Ньюркахкском карьере рудника «Восточный» и карьере рудника «Центральный» ОАО «Апатит» все измерения проводились в северных бортах со стороны висячего бока рудной залежи.

вод о гравитационно-тектоническом типе напряженного состояния исследованного массива горных пород. Применительно к карьерам рудников «Восточный» и «Центральный» ОАО «Апатит» этот вывод подтверждается выявленными ранее закономерностями распределения напряжений в районе хибинских апатит-нефелиновых месторождений [53, 54].

Действие в массиве пород повышенных горизонтальных напряжений неоднородно влияет на устойчивость бортов и уступов карьера. С одной стороны, создается дополнительная нагрузка, нормальная граням блоков пород, перпендикулярных контуру карьера, что увеличивает силу трения по контактам блоков и, как следствие, повышает устойчивость как отдельных уступов, так и бортов карьера в целом. С другой стороны, учитывая прогнозируемый уровень действующих напряжений по почве карьера, сравнимый с прочностью на одноосное сжатие пород борта, становится вероятным его разрушение при динамических проявлениях.

Следующим важным параметром, влияющим на устойчивость уступов, является зона нарушенных пород в законтурном массиве. Для оценки нарушенных зон применяется комплекс методов, включающих контроль разрушения скважин методами ультразвукового каротажа и телевизионной съемки. По каротажу скважин и керну оцениваются интенсивность трещиноватости (количество трещин на погонный метр) и мощность нарушенной зоны. Всего в процессе натуральных исследований было пробурено и исследовано более 30 скважин.

При анализе данных по мощности нарушенной зоны необходимо учитывать ориентацию скважин. Максимальные значения мощности нарушенной зоны должны быть в вертикальных и горизонтальных скважинах, минимальные — в наклонных. Это объясняется тем, что вертикальные и горизонтальные скважины на значительной части своей длины находятся в зоне влияния вышележащего (горизонтальная скважина) и нижележащего (вертикальная скважина) уступа, за счет перебуривания скважин, в то время как наклонная скважина достаточно быстро входит в область относительно не нарушенного массива пород. В то же время с точки зрения опасности возможных боковых вывалов в карьерное пространство повышенный интерес представляет мощность нарушенной зоны, определенная в горизонтальных скважинах.

В Ньоркпахкском карьере рудника «Восточный» изучение прибортового массива и определение мощности нарушенной зоны выполнялись методом видеокаротажа стволов горизонтальных скважин. В процессе бурения скважин проводились измерения напряжений методом разгрузки. Мощность нарушенной зоны в горизонтальных скважинах варьировала от 3 до 4,5 м.

В карьере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» были применены все методы исследований. Наблюдательные скважины были ориентированы горизонтально, вертикально и наклонно. Мощность нарушенной зоны, определенная ультразвуковым методом в одной из вертикальных скважин, составила 13 м; в трех горизонтальных — от 3,2 до 8 м; в двух направленных под углом  $45^\circ$  в глубь массива скважинах — от 3 до 4,8 м. Мощность нарушенной зоны, определенная методом видеокаротажа по горизонтальным скважинам, составила от 3 до 8 м. Использование метода сейсмической томографии дало значение мощности нарушенной зоны от 0 до 10 м (в среднем 5 м). В целом мощность нарушений в карьере составляет от 3,0 до 4,8 м в глубь массива. По двум отснятым скважинам наблюдался

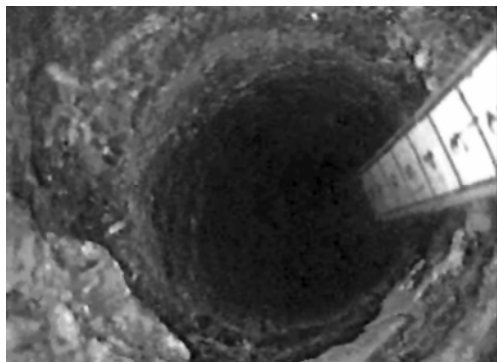


Рис. 1.70. Стоп-кадр разрушенной зоны на глубине 27 м обводненной скважины № 2849 на гор. +238 м карьера «Железный».

интенсивный водообмен с выходом воды из трещин, расположенных на глубине от 14 до 20 м, и дренированием ее в прибортовую нарушенную зону (рис. 1.70).

При этом видимого выхода воды из скважины на дневную поверхность не отмечено. Указанные скважины пробурены в районе происшедшего ранее внезапного обрушения участка уступа карьера, причиной которого, вероятно, была потеря устойчивости пород по плоскости скольжения из-за интенсивного притока воды по трещинам. Сопоставление данных о трещиноватости по видеокаротажу и по керну контрольной скважины (рис. 1.71) показало

несовпадение интенсивности трещин на первых проанализированных 11 м.

Интенсивность трещиноватости по керну оказалась выше. Этот факт говорит о том, что либо сжатые в массиве микротрещины не видны при съемке на стенках скважины и могут быть не обнаружены, либо о разрушении керна в процессе его отбора. Таким образом, данные о трещиноватости по керну более полно описывают естественные и, возможно, связанные с технологией бурения трещины, но в массиве они не все являются раскрытыми, не видны, и вопрос об их роли в потере устойчивости участков массива пород является открытым.

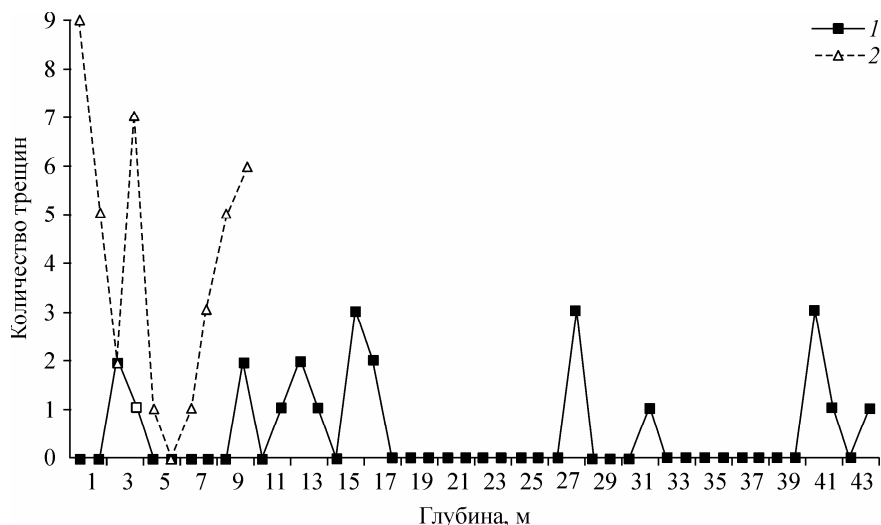


Рис. 1.71. Интенсивность трещиноватости (тр./м) по данным видеосъемки (1) и по керну (2) разгрузочной скважины на гор. +40 м карьера «Железный».

В карьере «Центральный» ОАО «Апатит» в пределах опытно-промышленного участка были выполнены два определения мощности нарушенной зоны и оценки структуры массива в горизонтальных скважинах глубиной 35—36 м на горизонтах +595, +610 м. Особенности участка карьера «Центральный» являются его расположение в рабочей зоне, где фактически отсутствуют уступы, поставленные на конечный контур, и наличие аномальных зон. В этих условиях мощность нарушенной зоны в пределах опытно-промышленного участка карьера Центрального рудника составила от 4 м до 12 м (рис. 1.72, 1.73).

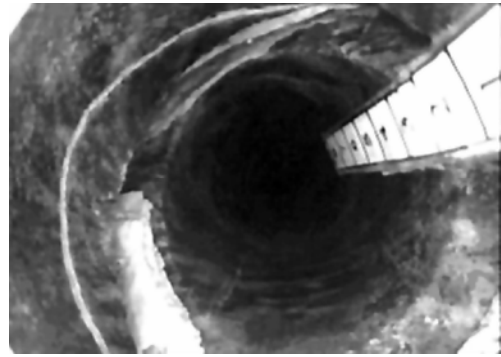


Рис. 1.72. Кадр видеосъемки скважины в карьере «Центральный» с цеолитовыми дайками, глубина 12,3 м.

При видеосъемке ствола горизонтальной наблюдательной скважины на вертикальном уступе на горизонтах +118 м северо-западного борта карьера рудника «Железный» нарушенной зоны не выявлено. На горизонтах +470 м и +440 м Ньюоркпахкского карьера после формирования вертикальных уступов мощность нарушенной зоны составила 3 м, на гор. +500 м того же карьера после формирования уступа с углом откоса  $75^\circ$  мощность нарушенной зоны была 3—4,5 м. Отмеченные факты могут означать, что при формировании вертикальных уступов при переходе к ведению взрывных работ с использованием технологии, снижающей динамическое воздействие на законтурный массив, мощность нарушенной зоны имеет тенденцию к снижению.

В табл. 1.6 представлены сводные данные определения мощности нарушенной зоны в прибортовом массиве на карьерах ОАО «Ковдорский ГОК» и ОАО «Апатит». Рассматривая совокупность данных, необходимо отметить следующее. Во-первых, наименьшее значение мощности нарушенной зоны зафиксировано на Ньюоркпахкском карьере и в карьере рудника «Железный», а наибольшее — в карьере рудника «Центральный». Это объясняется тем, что: а) на первых двух объектах определения производились на уступах, поставленных в конечное положение, а на третьем — фактически в рабочей зоне; б) мощность нарушенной зоны в большин-

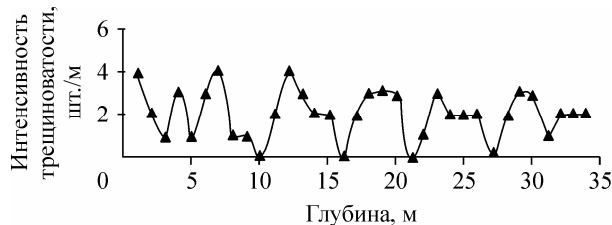


Рис. 1.73. Интенсивность трещиноватости по данным видеосъемки вдоль ствола разгрузочной скважины на гор. +595 м карьера «Центральный».

стве случаев превышает 3 м, что свидетельствует о недостаточной устойчивости уступов; в) при формировании вертикальных уступов с применением специальной технологии взрывных работ, снижающих динамическое воздействие на законтурный массив, мощность нарушенной зоны имеет тенденцию к снижению.

Сравнение статистических параметров интенсивности трещиноватости для трех рудников было проведено для двух зон — нарушенных пород вблизи поверхности и в массиве (табл. 1.7). Сравнение средних значений интенсивности трещиноватости в нарушенных зонах и в массиве по *t*-критерию (Стьюдента) показало,

Таблица 1.6

Сводные данные по мощности нарушенной зоны на карьерах Кольского полуострова

Борт карьера, год, абсолютная отметка, угол наклона уступа	Ориентация скважины	Метод	Мощность нарушенной зоны, м
Рудник «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК»			
С-В, 1999 г., +94 м, 75°	Вертикальная	Ультразвуковой метод (УЗМ)	13
С-В, 2000 г., +94 м, 1-я ст., 75°	Горизонтальная	УЗМ, метод разгрузки (МР)	6
С-В, 1-я ст., 2000 г., +94 м, 75°	Наклонная под углом 45°	УЗМ	4,8
С-В, 2-я ст., 2000 г., +94 м, 75°	Горизонтальная	УЗМ	8
С-В, 2-я ст., 2000 г., +94 м, 75°	Наклонная под углом 45°	УЗМ	3
С-В, 3-я ст., 2000 г., +94 м, 75°	Горизонтальная	УЗМ, МР	3,2
С-В, 2005 г., +40 м, 90°	Горизонтальная	Телевизионный контроль скважины (ТКС), МР	3—16
С-3, 2001 г., +142 м, 75°	Горизонтальная	МР, СТ	0—10 (в среднем 5м)
С-3, 2005 г., +118 м, 90°	Горизонтальная	ТКС, МР	0
Ю-В, 2003 г., +232 м, 45°	Вертикальная	ТКС	—
Ю-В, 2003 г., +166 м, 45°	Горизонтальная	ТКС, МР	—
Ю-В, 2005 г., +154 м, 45°	Горизонтальная	ТКС	—
Опытно-промышленный участок (ОПУ) (висячий бок), 2002 г. +500 м, 75°	Горизонтальная	ТКС, МР	3—4,5
Нюркпахкский карьер Восточного рудника ОАО «Апатит»			
ОПУ (висячий бок), 2003 г. +470 м, 90°	Горизонтальная	ТКС, МР	3
ОПУ (висячий бок), 2004 г. +440 м, 90°	Горизонтальная	ТКС, МР	3
ОПУ (висячий бок), 2005 г. +470 м, 90°	Горизонтальная	ТКС, МР	—
Карьер Центрального рудника ОАО «Апатит»			
ОПУ (висячий бок), 2003 г., +610 м, 75°	Горизонтальная	ТКС, МР	—
ОПУ (висячий бок), 2004 г., +595 м, 75°	Горизонтальная	ТКС, МР	4—5
ОПУ (висячий бок), 2005 г., +580 м, 75°	Горизонтальная	ТКС, МР	6—12

Примечание. ОПУ — опытно-промышленный участок.

Таблица 1.7

Статистические параметры трещиноватости в нарушенной зоне и в массиве для различных рудников Кольского полуострова

Рудник/карьер	Количество интервалов, шт.		Средняя интенсивность, трещин/м		Стандартное отклонение, трещин/м	
	Нарушенная зона	Массив	Нарушенная зона	Массив	Нарушенная зона	Массив
Железный	10	65	1,5	0,62	2,46	0,97
Ньорпахкский	6	27	5,33	1,44	3,88	1,25
Центральный	17	52	1,34	1,57	1,34	1,26

что значимо (уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ) эти параметры различаются для рудников «Железный» и «Ньорпахк», а для рудника «Центральный» значимо не различаются. В последнем случае можно говорить об опасности потери устойчивости борта карьера не только в приконтурной зоне, но и в глубине массива.

В результате показано, что мощность нарушенной зоны в большинстве случаев превышает 3 м. Это свидетельствует о недостаточной устойчивости уступов, но при формировании вертикальных уступов с применением специальной технологии взрывных работ, снижающих динамическое воздействие на законтурный массив, мощность нарушенной зоны имеет тенденцию к снижению до 1 м и менее. Приме-



Рис. 1.74. Северо-западный борт карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК».



ром практического применения полученных закономерностей является увеличение наклона бортов карьера рудника «Железный» (рис. 1.74). На фотографии виден переход (слева направо) от обычного наклона борта к более крутому.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Напряженно-деформированное состояние пород исследованных бортов карьеров относится к гравитационно-тектоническому типу, что предполагает действие в массиве горизонтальных напряжений, превышающих вертикальные на сравнительно неглубоких карьерах.

2. Мощность нарушенной зоны борта карьера в большинстве случаев превышает 3 м, что свидетельствует о недостаточной устойчивости уступов, но при формировании вертикальных уступов с применением специальной технологии ведения взрывных работ, снижающих динамическое воздействие на законтурный массив, мощность нарушенной зоны имеет тенденцию к снижению до 1 м и менее.

3. Действующие в массиве пород напряжения, а также снижение мощности нарушенной зоны вследствие совершенствования буровзрывных работ на конечном контуре карьера повышают вероятность динамических проявлений горного давления в карьерах, что требует разработки методов и средств контроля геомеханического состояния бортов карьера, совершенствования порядка ведения горных работ, проведения профилактических мероприятий.

#### **1.14.7. Ретроспективный анализ сейсмичности Хибинского и Ловозерского массивов**

Напряженное состояние и сейсмоактивность Хибинского и Ловозерского массивов (Кольский полуостров) являются их генетически определенными свойствами. Ведение открытых и подземных горных работ в этих массивах привело к возникновению ряда уникальных природно-техногенных систем и ускорению сейсмодеструкционных процессов. Для анализа связи региональных тектонических структур и сейсмичности в районах возникших ПТС разработана тектоноструктурная схема Хибинского массива и выполнен ретроспективный анализ сейсмичности по данным ISC (International Seismological Centre) с учетом взрывных работ на горных предприятиях. На разработанной совместно с Геологическим институтом КНЦ РАН тектоноструктурной схеме хибинских апатитнефелиновых месторождений (рис. 1.75, см. вклейку). Выделено 87 разломов. Формы блоков разновозрастных пород рудного поля Хибинских месторождений (Кукисвумчоррского, Юкспорского, Расвумчоррского, Коашвинского, Ньоркпахкского) определяются наличием вертикальных или крутопадающих радиальных и концентрических систем трещин, горизонтальной системы трещин и иногда усложняются одной-двумя диагональными системами трещин.

Положение границ блоков разновозрастных пород массива строго подчиняется его кольцевому строению. Радиальные и концентрические трещины, оставаясь взаимно перпендикулярными, закономерно меняют свою ориентировку в соответствии с кольцевым строением интрузивных комплексов. В распределении границ блоков, выполненных жильными и дайковыми образованиями, намечается следующая закономерность. Жилы нефелиновых сиенитов и пегматитов обычно приурочены к горизонтальной системе трещин или располагаются вдоль плоскости

стратификации расслоенных интрузий. Породы дайкового комплекса заполняют радиальные и концентрические системы трещин. Жилы эгирино-альбитового состава на участках Рестеньюн—Эвеслогчорр следуют трещинам концентрических направлений. К радиальным системам трещин приурочены зоны альбитизации, ожелезнения (горы Рестиньюн, Коашкар) и шпреуштейнизации (горы Юкспор, Расвумчорр). Величины и направления главных напряжений достаточно детально изучены в пределах обрабатываемых участков апатитовых месторождений и могут служить для надежного геодинамического прогноза в пределах рудников.

Для интерпретации сейсмических данных глобальных и региональных систем разработана и апробирована методика объемного прогноза крупных сейсмических событий, основанная на критерии  $EVT$  — изменении пространственно-временной плотности площади группы трещин во времени. Если объем зоны разрушений, по данным А. А. Маловичко, ограничен как

$$V_{\max} < E/c_m,$$

где объем  $V_{\max}$  выражен в  $\text{м}^3$ , энергия  $E$  в Дж,  $c_m = 20 \text{ Дж/м}^3$ , то, приняв элемент разрушения в виде трещины с соотношением размеров 1 : 100 : 100 и объем, равный предельному, получим

$$V_{\max} = E/c_m = 0,01 \cdot L_{\text{тр}}^3,$$

площадь трещин равной

$$S = L_{\text{тр}}^2 = 100 \cdot V^{2/3} = 100(E/c_m)^{2/3},$$

где  $L_{\text{тр}}$  — наибольший размер трещины, м.

Удельная поверхность трещин в объеме  $\Delta V$  за период  $\Delta T$

$$K_{EVT} = S/(\Delta V \cdot \Delta T) = 100(E/c_m)^{2/3}/(\Delta V \cdot \Delta T).$$

Оценка разрушений в горной породе для подземных рудников в виде суммы площадей плоских трещин (а не суммарной длины трещин) является более логичной и может применяться, в отличие от классической сейсмологии, с объемным, а не плоским полем сейсмических событий. Тогда пространственно-временная плотность площади группы трещин будет определяться как

$$K_{EVT} = K_1(\Sigma E_n/c_m)^{2/3}/(\Delta V \cdot \Delta T),$$

где  $K_1$  — коэффициент формы трещины, принят равным 100;  $E_n$  — суммарная энергия в рассматриваемом объеме, Дж;  $\Delta V$  — объем участка массива пород, в принятой методике это объем элементарной ячейки ( $50 \times 50 \times 50 \text{ м}$ ) или объем зоны, складывающийся из объемов входящих в нее элементарных ячеек,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta T$  — анализируемый интервал времени, сут.

Приведенная методика использования критерия  $EVT$  была апробирована для ретроспективного анализа и возможности использования для прогноза разрушений выработок на примере горно-тектонического удара 15.02.2001 г. на гор. +252 м Кировского рудника. Пороговое значение критерия  $EVT$  для событий с малой энергией установлено  $K_{EVT} = 1$ , что соответствует площади около  $123,2 \text{ см}^2$  трещин на  $1 \text{ м}^3$  в сутки.

На рис. 1.76, 1.77 приведены распределения сейсмических событий и критерия  $EVT$  для районов Хибинского и Ловозерского массивов, заштрихованы зоны

ведения горных работ. На рис. 1.78 приведена гистограмма для энергий сейсмических событий в указанном районе. Из данных были исключены технологические взрывы.

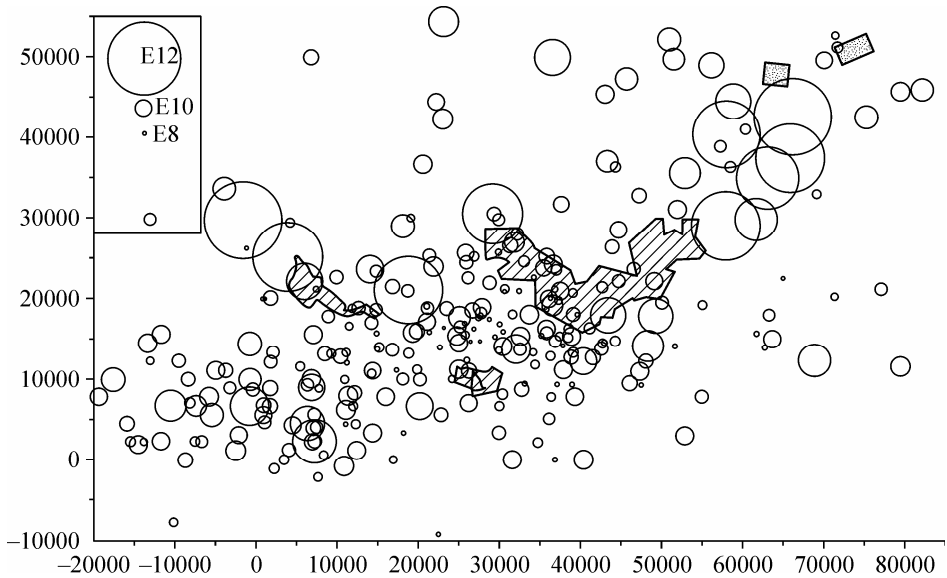


Рис. 1.76. Распределение сейсмических событий в районе геомониторинга (хибинский и ловозерский массивы) по данным ISC.

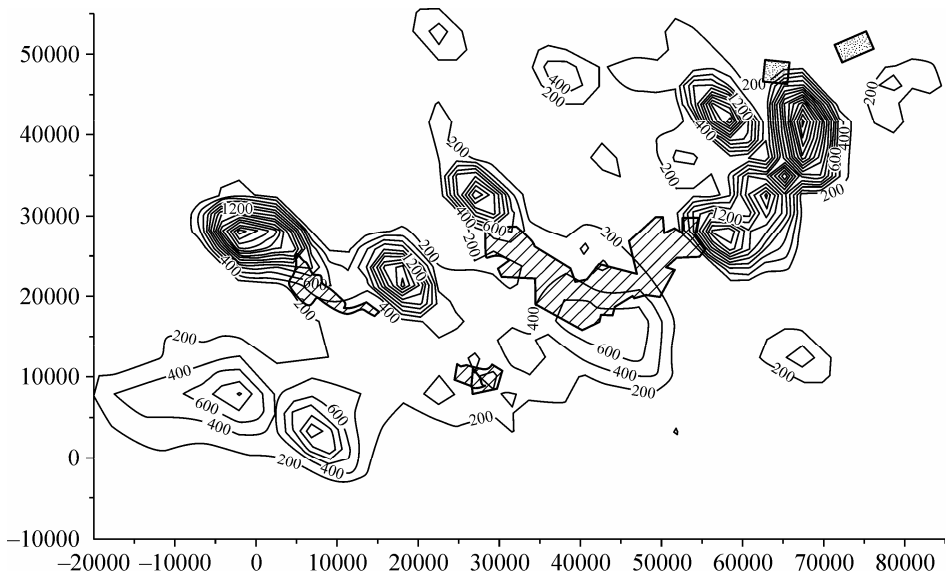


Рис. 1.77. Районирование района геомониторинга по критерию EVT удельной пространственно-временной плотности площади сейсмогенных трещин. Начало координат помещено в точку 33 град. в. д., 67,5 град. с. ш. Показаны горные отводы ОАО «Апатит» (штриховка) и ОАО «Свередмет».

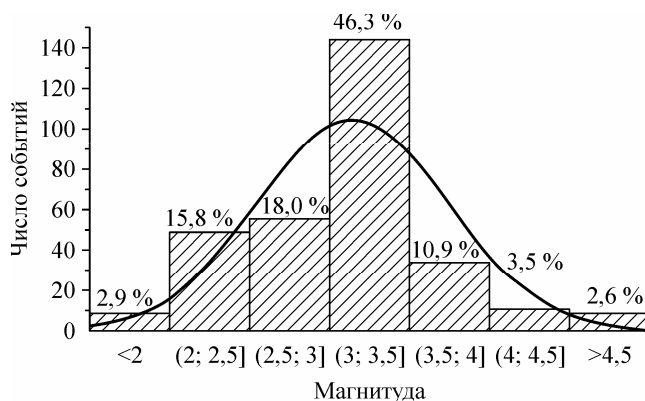


Рис. 1.78. Распределение магнитуд сейсмических событий в районе хибинского и ловозерского массивов за период 1957—2002 гг. по данным ISC. Общее число событий 798, в гистограмме учтены 309.

Пространственное распределение событий указывает на следующие тенденции: тяготение сейсмоактивных зон к зонам ведения горных работ; генерирующая сейсмическая зона находится между двумя горно-рудными районами, под Умбозером.

Итак, многоуровневый и системно-организованный геомониторинг позволяет эффективно решать научные и практические задачи горного производства, повышая их безопасность.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

Сформулированы принципы методики мониторинга состояния геологической среды природно-технической системы.

Разработана численная модель Хибинского массива с целью более детального исследования его напряженного состояния и выделения зон повышенной энергонасыщенности.

Предложена методика диагностики критических состояний участков геологической среды и выбора технических решений для обеспечения безопасности горных работ для управления геодинамическим риском.

Проведена оценка влияния взрывных работ на сейсмичность в рудниках и предложена методика качественного прогноза состояния высоконапряженного массива горных пород при воздействии на него динамических нагрузок от массовых и технологических взрывов.

Предложен алгоритм геомеханического обоснования устойчивых параметров конструктивных элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых и способов управления геодинамическими рисками при ведении горных работ в энергонасыщенных зонах геологической среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чузуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.

2. *Мирошниченко М. И., Кужсенко В. С.* Изучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // *Физика твердого тела*. — 1980. — Т. 22, вып. 5.
3. *Егоров П. В., Иванов В. А., Колпакова Л. А. и др.* Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород // *ФТПРПИ*. — 1988. — № 5.
4. *А. С. № 1086160 СССР.* Способ определения напряженного состояния массива горных пород / Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г. и др. // *БИ*. — 1984. — № 4.
5. *Chi-Yu King.* Electromagnetic emission before earthquakes // *Nature*. — 1983. — V. 301, N 3.
6. *Перельман М. Е., Хатиаишвили Н. Г.* О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // *Докл. АН СССР*. — 1981. — Т. 220, № 1.
7. *Поиск электромагнитных предвестников землетрясений* / Под ред. Гохберга. — М.: ИФЗ АН СССР, 1988.
8. *А. С. № 1740665 СССР.* Способ прогноза разрушения горных пород / Курленя М. В., Кулаков Г. И., Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е. // *БИ*. — 1992. — № 22.
9. *Кужсенко В. С., Манжииков Б. И., Ма Jin и др.* Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // *ФТПРПИ*. — 1987. — № 1.
10. *Ваганова В. А., Лазаревич Л. М., Шинеев О. В. и др.* Комплекс геофизических методов наблюдения за состоянием тектонических нарушений на Таштагольском руднике / Горная геофизика. Труды Международной конференции // *ВНИМИ*. — Л., 1988.
11. *Курленя М. В., Опарин В. Н.* Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженного состояния горных пород. — Новосибирск: Наука, СИФ. РАН, 1999.
12. *Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е.* Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
13. *Polysos N., Peters S.* Determination and IT-supported evaluation of rock mechanical parameters and their utilisation during application of roof bolting techniques. 20th International Conference on Ground Control in Mining Morgantown. — WV, USA, 2001.
14. *Курленя М. В., Опарин В. Н., Акинин А. А. и др.* Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа // *ФТПРПИ*. — 1997. — № 3.
15. *Опарин В. Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф.* Нелинейные деформационные процессы в окрестности выработок. Ч. I // *ФТПРПИ*. — 2003. — № 4.
16. *Опарин В. Н., Акинин А. А., Востриков В. И. и др.* Нелинейные деформационные процессы в окрестности выработок. Ч. II // *ФТПРПИ*. — 2003. — № 6.
17. *4-я Международная специализированная выставка-конференция NDT «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».* 17—20 мая 2005 г., Москва. — М., 2005.
18. *Опарин В. Н., Востриков В. И., Акинин А. А. и др.* Видеокаротажный зонд // *ФТПРПИ*. — 2006. — № 6.
19. *Патент RU 2265867.*
20. *Сенин Л. Н., Сенина Т. Е.* Регистратор сейсмических сигналов «Регистр» // *ПТЭ*. — 2005. — № 6.
21. *Патент № 2097558 РФ.* Способ контроля напряженно-деформированного состояния в блочных структурах геосферы, базовая опора, деформометр и регистратор / Опарин В. Н., Курленя М. В., Акинин А. А. и др. // *Опубл. в БИ*. — 1997. — № 33.
22. *ГОСТ Р 51330.0-99.* Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования.
23. *ГОСТ Р 51330.10-99.* Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь i.
24. *ГОСТ 14254.* Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP).
25. *ПБ-06-111-95.* Единые правила безопасности при разработке рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых подземным способом. — Кемерово: ВостНИИ, 1995.

26. РД 06-329-99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам.
27. Указания по безопасному ведению горных работ на Талнахском и Октябрьском месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. — Норильск: ОАО «ГМК «Норильский никель»», 2001.
28. ГОСТ 24754-81. Электрооборудование рудничное нормальное. Общие технические требования и методы испытаний.
29. Гольдин С. В., Юшин В. И., Ружич В. В., Смекалин О. П. Медленные движения — миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы I Междунар. школы-семинара, 9—15 сентября, 2001. — Красноярск, 2002.
30. Clymer R. W., McEvilly T. V. Travel-time monitoring with VIBROSEIS // Bull. Seism. Soc. Am. — 1981. — V. 71, N 6.
31. Karageorgi E., Clymer R., McEvilly T. V. Seismological studies at Parkfield. II. Search for temporal variations in wave propagation using Vibroseis // Ibid. — 1992. — V. 82, N 3.
32. Kunitomo T., Kumazawa M. Active monitoring of the earth's structure by the seismic ACROSS // The Proceedings of 1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04) – Mizunami, Japan, 2004.
33. De Fazio T. L., Aki K., Alba J. Solid Earth tide and observed change in the in situ seismic velocity // J. Geophys. Res. — 1973. — V. 78, N 8.
34. Yushin V. I., Geza N. I., Velinsky V. V. et al. Vibroseismic monitoring at the Baikal region // J. Earthquake Prediction Research. — 1994. — N 3.
35. Юшин В. И., Велинский В. В., Геца Н. И., Саввиных В. С. Экспериментальная оценка тензочувствительности коры в районе Байкала по данным активного вибросейсмического мониторинга и упругого прилива // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40, № 3.
36. Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Там же.
37. Еманов А. Ф., Селезнев В. С., Соловьев В. М. и др. Исследование динамических особенностей сезонных изменений волновых полей при вибросейсмическом мониторинге среды // Там же.
38. Юшин В. И., Егоров Г. В., Сперанский Н. Ф. и др. Акустическое исследование нелинейных и реологических явлений в ближней зоне сейсмического вибратора // Геология и геофизика. — 1996. — Т. 37, № 9.
39. Геца Н. И., Егоров Г. В., Мкртумян Ю. В., Юшин В. И. Экспериментальное исследование мгновенных вариаций скорости и затухания сейсмических волн в рыхлой среде *in situ*, подвергаемой пульсирующей динамической нагрузке // Там же. — 2001. — Т. 42, № 7.
40. Геца Н. И., Егоров Г. В., Сапрыкин И. В., Юшин В. И. Попытка локализации наведенных сейсмических границ в ближней зоне мощного вибратора // Физ. мезомеханика. — 2002. — Т. 5, № 5.
41. Тимофеев В. В. Технические и программно-методические средства мониторинга опасных состояний массивов горных пород хибинских апатитовых рудников. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003.
42. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1977.
43. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1978.
44. А. С. № 945431 СССР. Способ определения напряжений в массиве горных пород / Аксенов В. К., Курленья М. В., Липчанский Б. М. и др. // Опубл. в БИ. — 1982. — № 27.

45. Белов Н. И. Определение напряжений в массиве и степени его удароопасности по параметрам разрушения керна и ствола скважины, пробуренной в борту карьера // Открыто-подземная разработка мощных рудных месторождений. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995.
46. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Савченко С. Н. и др. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики // ФТПРПИ. — 2001. — № 4.
47. Воларович М. П., Томашевская И. С., Будников В. А. Механика горных пород при высоких давлениях. — М.: Наука, 1979.
48. Сейсмические опасности. Тематический том / Под ред. Г. А. Соболева. — М.: КРУК, 2000.
49. Тимофеев В. В. Об одном способе оценки напряженного состояния пород в массиве по скоростям продольных упругих волн // Повышение эффективности разработки и обогащения руд месторождений Кольского полуострова. — Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1979.
50. Тимофеев В. В., Панин В. И., Меденков Ф. Г. Взаимосвязь сейсмоакустических параметров с удароопасностью пород // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций / ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1985.
51. Kozurev A. A., Reshetnyak S. P., Maltsev V. A., Rybin V. V. Analysis of stability loss in open-pit slopes and assessment principles for hard, tectonically stressed rock masses / Slope stability in surface mining / Ed. W. A. Hustrulid, M. K. McCarter, D. J.A. Van Zyl. — Littleton, Colorado, USA, 2001.
52. Melnikov N. N., Kozurev A. A., Reshetnyak S. P. et al. Methodical approach to value of an optimal open pit slope angle in hard rocks/ Proc. of the ISRM International Symposium 3rd ARMS / Y. Ohnishi, K. Aoki (eds). — Rotterdam: Millpress, 2004.
53. Козырев А. А., Панин В. И., Иванов В. И. и др. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Ч. I, II. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996.
54. Kozurev A. A., Maltsev V. A., Kasparian E. V. et al. Mining induced earthquakes in the open pits of the Kola Peninsula // Proc. of 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. — Perth, Western Australia, 2005.

## Глава 2

### **РАЗВИТИЕ ОСНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ЭМИССИОННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ КРИТИЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

Одна из возможностей бесконтактного контроля деформирования образцов пород связана с их электромагнитным излучением (ЭМИ) при нагружении. При этом первопричина разрушения образцов связана с механическими напряжениями и деформациями, судить о которых можно посредством записи ЭМИ. В разделе рассматриваются вопросы соответствия одноосного деформирования образцов пород с сопутствующими сигналами ЭМИ. Исследование фонового ЭМИ в горных выработках и на карьерах представляет важное дополнение к практической реализации эффекта ЭМИ, которое фиксирует процессы разрушения, происходящие в массиве пород непрерывно и могут учитываться, складываясь с результатами исследования образцов. Получены уравнения, связывающие граничные значения компонент смещений и напряжений, реализация которых позволит исследовать натурные данные по деформированию образцов пород и их ЭМИ в процессе нагружения по уточнению контактных условий и их связи с разрушением.

#### **2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Исследования процесса разрушения образцов горных пород в лабораторных экспериментах с регистрацией уровня нагружения на образец и сопутствующего электромагнитного излучения проводились многими научными коллективами. Это, прежде всего, работы ОИФЗ РАН [1—5] и ФТИ им. А. Ф. Иоффе [6—9], где наряду с изменением нагрузки регистрировались импульсы ЭМИ и устанавливалось их количество, в основном, на стадии, предшествующей нарушению сплошности горных пород, а также величины амплитуд эмиссионных сигналов. Основные недостатки перечисленных работ следующие. Прежде всего, достаточно низкий диапазон регистрируемых частот — до 20 кГц в совместных экспериментах ОИФЗ и ИГД СО РАН [10, 11]. При этом авторы [6] считали, что разрешающая способность системы обработки информации в 300 мкс вполне достаточна для регистрации акустических или электромагнитных сигналов. При меньшем интервале между соседними импульсами они регистрировались как один низкочастотный сигнал, что могло приводить к недостоверным выводам относительно параметров эмиссионных сигналов, характеризующих процесс разрушения горных пород. Кроме того, время передачи сигналов из ОЗУ в память ПЭВМ в течение 1 с в процессе проведения эксперимента, когда эмиссионные сигналы не могли быть зарегистрированы, являлось существенным пропуском информации [9]. В работах ученых КузГТУ [12—16] определялась связь частотного диапазона сигналов ЭМИ и размеров



стартовых трещин при расколе породных образцов, однако здесь не было синхронной регистрации эмиссионных сигналов и нагрузки изучаемых образцов.

Исследования сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород специалистами ТГПУ [17–19] включали регистрацию количества электромагнитных импульсов, их амплитуд и длительности по мере нагружения. В последние годы тот же коллектив перешел к поиску прогнозных критериев разрушения, основанных на измерении параметров эмиссионных сигналов при акустическом воздействии на образец [20, 21]. Здесь необходимо отметить, что диапазон регистрируемых частот ЭМИ не превышал первых десятков килогерц, а при регистрации сигналов ЭМИ на высоких частотах не регистрировались сигналы нагрузки. Поэтому проведение лабораторных экспериментов преследовало своей целью более детальное изучение процесса разрушения образцов горных пород в электромагнитных образах на различных этапах их нагружения. Принципиальный интерес представляют исследования особенностей связей между напряженно-деформированным состоянием (НДС) пород и амплитудно-временными параметрами сигналов ЭМИ в условиях синхронной регистрации уровня нагружения хрупких и пластичных образцов горных пород и сопутствующих сигналов ЭМИ в более высоком диапазоне частот и периодов их следования. Есть основания ожидать, что изменения структуры эмиссионных сигналов на различных этапах нагружения позволят более детально и информативно исследовать процесс разрушения горных пород в электромагнитных образах. Это даст возможность проводить диагностику и разработку прогнозных критериев разрушения горных пород более обоснованно.

Для исследования процесса разрушения образцов горных пород по параметрам сигналов электромагнитной эмиссии в лабораторных условиях необходимо было:

- 1) разработать стенд и методику для регистрации сигналов электромагнитного излучения;
- 2) обеспечить синхронную регистрацию сигналов ЭМИ и нагрузки на образцы горных пород на различных стадиях нагружения в диапазоне частот до 250 кГц;
- 3) выявить информативные участки сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения;
- 4) определить количество импульсов ЭМИ при разрушении образцов горных пород, их длительности  $\tau$ , временные интервалы  $T$  между соседними импульсами и их изменение по мере увеличения нагрузки на образец;
- 5) осуществить анализ амплитудных характеристик сигналов ЭМИ на стадии нарушения сплошности образцов горных пород;
- 6) выявить особенности изменения в структуре сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения образцов горных пород и на их основе установить закономерности подготовки и протекания процесса разрушения последних в электромагнитных образах;
- 7) предложить прогнозные признаки разрушения образцов горных пород.

### **2.1.1. Методика и стенд для проведения экспериментальных исследований**

Эксперименты выполнялись на лабораторном стенде (рис. 2.1, см. вклейку), включающем гидравлический пресс усилием до 300 кН. Для регистрации сигналов

ЭМИ использовались датчики, выполненные в виде антенн конденсаторного типа с плоскими (размерами  $75 \times 25$  мм) и цилиндрическими (диаметром 30 мм) обкладками высотой 30 мм, а также широкополосный усилитель с полосой пропускания 3 Гц—300 кГц с коэффициентом усиления 500. Для регистрации нагрузки на образец использовался датчик силы, выполненный в виде кольцевого цилиндра высотой 75 мм, толщиной стенки 6 мм и внешним диаметром 50 мм с наклеенными на его поверхности тензорезисторами типа 2ФКПА-10100 ГВ с номинальным сопротивлением 200 Ом, включенными по мостовой схеме и подключенными к симметричному усилителю постоянного тока (типа УПТ) с полосой пропускания сигнала от 0 до 200 кГц и с коэффициентом усиления 500.

Датчики с образцом размещались в стальном экране, выполненном в виде прямоугольного параллелепипеда высотой 110 см, шириной боковых сторон 67 и 50 см, толщина стального листа стенок — 3 мм. Стенд включает гидравлический пресс с двумя металлическими плитами размерами  $300 \times 180 \times 45$  мм, с установленной неподвижно на четырех стальных колоннах диаметром 35 мм верхней плитой и нижней, с ходом 30 мм (образец 1 помещен между плитами); приемную ЭМИ-антенну — 2, датчик измерения нагрузки — 3, систему усилителей — 4, систему регистрации АСИ-2 — 5, ПЭВМ — 6. Одноосное нагружение образцов осуществлялось до полного их разрушения, которое определялось по резкому падению нагрузки (потерей несущей способности образца).

Приемные ЭМИ-антенны размещались вблизи образца на расстояниях 1—5 мм от торцевой его части. Длина соединительных коаксиальных кабелей типа РК-120 выбиралась таким образом, чтобы расстояние с выхода антенны до входа усилителя было минимальное, обеспечивая минимальное влияние собственной емкости кабеля на уровень сигнала ЭМИ. Для различных экспериментов оно изменялось от 10 мм до 50 мм, при этом собственная емкость кабеля снижалась до величин в первые единицы пикофард.

### **2.1.2. Регистрация и анализ синхронных записей сигналов ЭМИ и нагрузки**

На описанном выше стенде исследовалась структура сигналов ЭМИ при одноосном нагружении образцов со скоростью приложения нагрузки 0,316 кН/с. В качестве образцов использовались: мраморная мелкозернистая плитка размерами  $80 \times 80 \times 20$  мм, диабаз — высотой 60 мм и диаметром 20 мм, песчаник, базальты, граниты, кварциты, туфы, магнетитовые руды, сиениты, мраморизованные известняки и другие породы, физико-механические свойства которых приведены в табл. 2.1.

Обеспечение синхронной регистрации сигналов ЭМИ и нагрузки на образец по мере ее роста осуществлялось следующим образом. Сигнал ЭМИ с выхода приемной антенны передавался на усилитель, а затем на вход ПЭВМ со встроенным четырехканальным двенадцатирядным АЦП. В процессе экспериментов регистрировались синхронно по двум каналам сигналы ЭМИ и нагрузки, параметры которых на экране монитора отображались в виде отдельных кадров. Каждый кадр содержал по  $2^{14}$  отсчетов напряжений (амплитуд сигналов) с выходов датчиков, взятых с интервалами 2 мкс, т. е. длительность каждого кадра составляла 32,768 мс.

Таблица 2.1

Физико-механические свойства образцов горных пород [9, 12, 15, 22]

Месторождение	Тип породы	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , МПа	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Объемная плотность, $\text{кН/м}^3$	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	Скорость продольной волны $V_p$ , $10^3$ м/с
Таштагольское	Магнетитовая руда	8,7	143	0,25	44	$10-10^5$	6	2,7
	Сиениты	6,0	87	0,25	26	$10^2-10^5$	7—14	5,8
	Известняки	3,5	64	0,31	21	$10^2-10^3$	8—15	1,8
Шерегешевское	Магнетитовая руда	7,2	174	0,18	44	$10-10^5$	6	2,7
	Сиениты	5,1	236	0,26	26	$10^3-10^5$	7—14	5,8
Зыряновское	Туфы	6,7	82	0,23	52	$10^3$	3	3,6
	Кварциты	6,3	84	0,20	26	$10^2-10^5$	7	1
Абаканское	Туфы	4,1	94	0,22	52	$10^3-10^4$	4	3,6
Искитимское	Мраморы	3,5	52	0,28	28	$10^2-10^3$	8—10	1,7
Горный карьер	Диабазы	4,6	76	0,24	32	$10^2$	14—17	—
	Базальты	5,0	92	0,21	38	$10^3$	4	—

Полученные кадры последовательно соединялись, и по ним строились графики для кривых нагружения и эмиссионных сигналов. Всего было испытано более ста образцов различных горных пород.

На рис. 2.2 в качестве примера приведены синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) для образца мрамора до разрушения. Перевод мВ в кН для осциллограммы нагрузки (б) осуществлялся с коэффициентом  $K = 1,6$  кН/мВ. На осциллограмме (а) приведены сигналы ЭМИ, регистрируемые приемной емкостной антенной конденсаторного типа, выполненной в виде плоской пластины. Система регистрации настроена так, что амплитуды импульсов сигнала ограничивались на уровне  $\pm 2,5$  В.

В данном случае процесс регистрации до разрушения длился около 3,2 мин. Сигналы ЭМИ до нагрузки на образец 37,89 кН регистрируются достаточно редко, а после этого значения — интенсивно. При этом через 10 мс от начала нагружения образца происходят существенное повышение нагрузки до значения 45,8 кН и последующий переход образца в упругопластическое состояние, которое можно идентифицировать с участком стабилизации нагрузки. Это состояние характеризуется излучением большого числа электромагнитных сигналов малых амплитуд (количество одиночных сигналов в данном случае около 50—60), принимающих значения в пределах от 0,57 до 1,61 мВ. После этого нагрузка снова повышается и достигает предельного уровня относительно прочности образца (55 кН). На осциллограмме ЭМИ это отражено в виде нескольких низкочастотных малоамплитудных (0,65—0,97 мВ) импульсов. Максимальная нагрузка стабилизируется на опре-

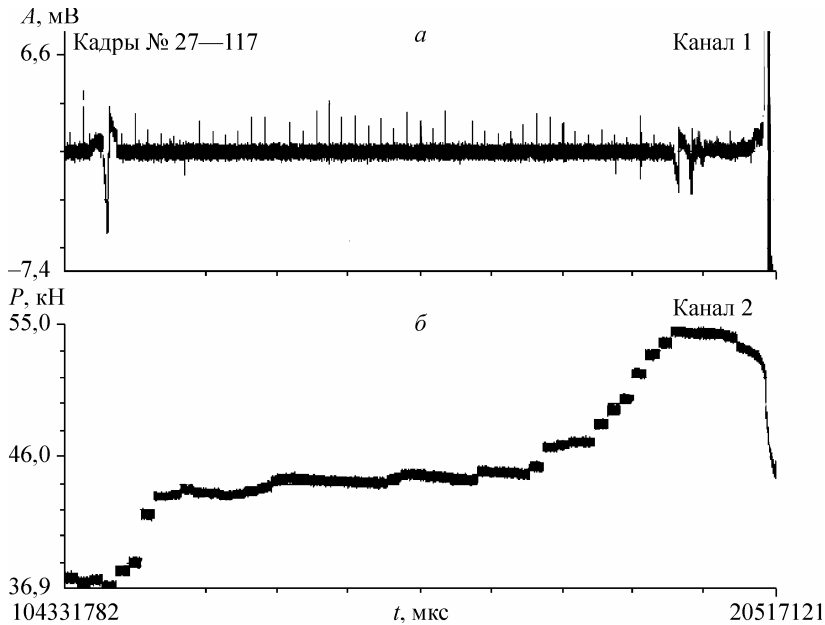


Рис. 2.2. Синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) при нагружении образца белого крупнозернистого мрамора.

деленное время, а затем резко падает за промежуток времени, равный 10 мс, до значения 45,8 кН.

На рис. 2.3 приведены графики изменения относительных значений нагрузки (а) и энергии сигналов ЭМИ (б) при регистрации информации по кадрам, на рис. 2.4 — то же в реальном времени соответственно.

По оси ординат на рис. 2.3, 2.4, а, показана нагрузка, нормированная к максимальной ее величине  $P_{\max}$ , а на рис. 2.3, 2.4, б — нормированная к максимальной энергии сигнала ЭМИ в реальном масштабе времени, определяемая по формуле

$$E_i = \frac{\sum_k [a_i(k)]^2}{\max_i \left\{ \sum_k [a_i(k)]^2 \right\}}, \quad (2.1)$$

где  $E_i$  — нормированная энергия сигнала ЭМИ в  $i$ -м кадре длительностью  $\approx 40$  мс,  $i = 0, \dots, N - 1$ ;  $N$  — число кадров (в описываемом эксперименте  $N = 117$ );  $a_i(k)$  —  $k$ -й отсчет сигнала ЭМИ в  $i$ -м кадре.

Суммирование в выражении (2.1) производится по всем отсчетам сигнала ЭМИ в  $i$ -м кадре. Длительность всего процесса от начала нагружения до разрушения составила 205 с.

Из анализа графиков следует, что в ходе нагружения образца каждый раз при локальном (кадры 32 и 56) либо глобальном падении нагрузки (кадр 117) возникают сигналы ЭМИ, средняя мощность которых увеличивается по сравнению с величиной мощности в них на начальных этапах нагружения.

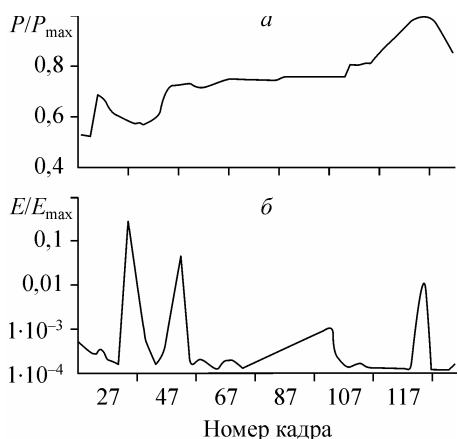


Рис. 2.3. Графики изменения относительной нагрузки  $P/P_{\max}$  (а) и относительной энергии сигналов ЭМИ  $E/E_{\max}$  (б) при регистрации сигналов по кадрам.

Количество пиков на графике ЭМИ соответствует числу актов возникновения трещин в образце. Прорастание трещин и лавинное разрушение образца характеризуются глобальным падением нагрузки (кадр 117), максимальная величина которой составила 55 кН. Это сопровождается существенным повышением энергии сигнала ЭМИ, максимум которого, приведенный к выходу антенны, достиг величины 7 мВ (амплитуда сигнала ЭМИ в момент падения нагрузки была ограничена). Ниже будет описана серия экспериментов, при которых определены величины амплитуд сигналов ЭМИ на стадии нарушения сплошности.

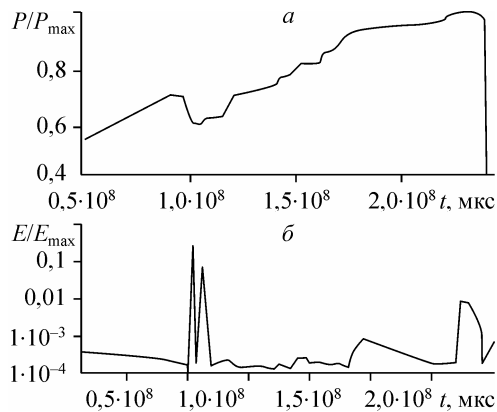


Рис. 2.4. Графики изменения относительной нагрузки  $P/P_{\max}$  (а) и относительной энергии сигналов ЭМИ (б)  $E/E_{\max}$  при регистрации сигналов в реальном времени.

На рис. 2.5 приведена еще одна синхронная запись осциллограмм сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) на стадии, близкой к нарушению сплошности образца белого крупнозернистого мрамора. Особенности этого эксперимента являются непрерывное нагружение образца с постоянной скоростью, равной 0,139 кН/с, и медленное падение нагрузки его при разрушении. Процесс регистрируется, начиная с 2,9 с от начала нагружения, при этом нагрузка достигает 21,8 кН. Образуется значительное количество мелких трещин, что отражено на осциллограмме сигналов ЭМИ в виде большого числа (100 и более) различных по амплитуде эмиссионных сигналов (0,22—3,44 мВ). При достижении максимальной нагрузки (29,78 кН) образец начинает разрушаться. Сигнал ЭМИ при разрушении достигает 10 мВ.

Для этого типа разрушения характерно то, что, во-первых, максимальная нагрузка невелика (~29 кН) по сравнению, например, с предыдущим экспериментом, когда она достигала 55 кН. Во-вторых, после достижения максимального значения нагрузка начинает медленно падать: время ее падения достигает 5 мс. Амплитуды сигналов ЭМИ колеблются в пределах от 0,15 до 0,23 мВ и достигают значений 0,35 мВ. Следует отметить, что в этом случае, особенно на стадии медленного падения нагрузки, число импульсов ЭМИ существенно пре-

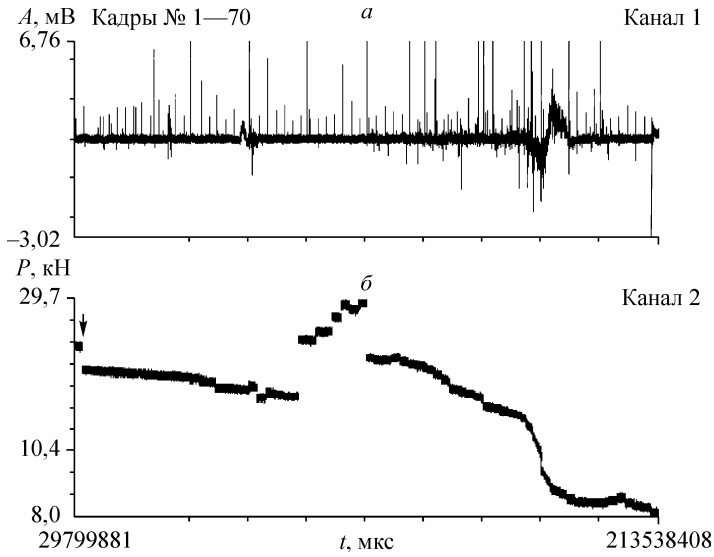


Рис. 2.5. Синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) в процессе разрушения образца белого крупнозернистого мрамора при медленном падении нагрузки.

вышает количество зарегистрированных ранее (см. рис. 2.2, ~100 импульсов) и достигает более 250.

Проводя анализ графиков, представленных на рис. 2.6 и 2.7, можно видеть, что в ходе нагружения образца при локальном (кадры 23, 35, 48) либо глобальном (кадры 52—62) падении нагрузки также возникают сигналы ЭМИ, средняя мощность которых увеличивается со временем. Прорастание трещин в локальных участках и лавинное разрушение образца характеризовалось общим падением нагрузки (см. рис. 2.6, кадры 52—62) и значительным повышением энергии соответствующих сигналов ЭМИ, максимум которых на выходе антенны достиг 9,99 мВ. Примечательно, что наибольшего значения сигнал ЭМИ достигает в данном случае не в момент потери устойчивости образца, а несколько раньше, причем имеет место корреляция между моментами падения нагрузки и возникновения импульсов ЭМИ.

Каждому временному этапу формирования под действием увеличивающейся нагрузки определенного участка разрушения в образце, соответствующему возникновению как ло-

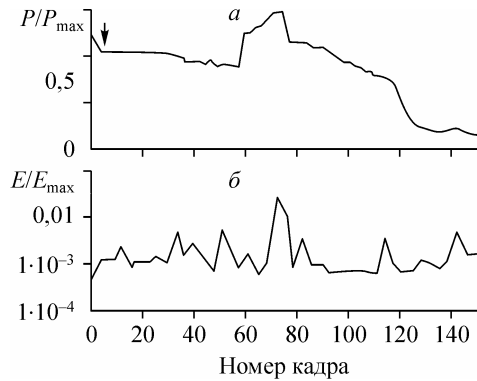


Рис. 2.6. Графики изменения относительной нагрузки  $P/P_{\max}$  (а) и относительной энергии сигналов ЭМИ  $E/E_{\max}$  (б) для образца белого крупнозернистого мрамора при регистрации сигналов по кадрам.

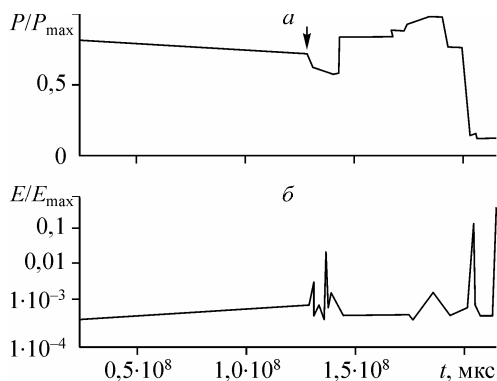


Рис. 2.7. Графики изменения относительной нагрузки  $P/P_{\max}$  (а) и относительной энергии сигналов ЭМИ  $E/E_{\max}$  (б) для образца белого крупнозернистого мрамора при регистрации сигналов в реальном масштабе времени.

тотная измерительная система типа YAMANA OPL YMF719-SA2, работающая в диапазоне частот до 20 кГц. На рис. 2.8 и 2.9 представлены синхронные осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) в одном и том же эксперименте, зарегистрированные соответственно с помощью системы АСИ-2 и YAMANA OPL YMF719-SA2. Эта система позволяет регистрировать весь процесс разрушения от начала приложения нагрузки до разделения образца на фрагменты.

На рис. 2.8 приведены синхронные осциллограммы записей сигналов ЭМИ и нагрузки системой АСИ-2 при разрушении образца розового среднезернистого мрамора Искитимского месторождения для интервала времени, соответствующего его разрушению. Нагрузка уменьшилась от  $P_{\text{нач}} = 29,8$  кН до  $P_{\text{кон}} = 8$  кН. Из осциллограмм рис. 2.8 видно, что нагрузка достигла уровня 29,8 кН и через некоторое время начала снижаться, одновременно по каналу ЭМИ начал регистрироваться сигнал, величина которого постепенно увеличивалась. В момент времени  $t = 117056088$  мкс от начала нагружения нагрузка резко упала. Это момент разрушения образца, который раскололся на три неравные части.

На рис. 2.8 моменту разрушения образца соответствуют изменение структуры и резкое увеличение амплитуд эмиссионных сигналов. Первый и последующие зарегистрированные импульсы ограничились уровнем  $U = 16,50$  мВ. Общая длительность времени эксперимента составляла 12 с. Наиболее информативным с точки зрения разработки диагностических признаков разрушения является участок осциллограммы, предшествующий падению нагрузки. Отметим, что система АСИ-2 была настроена таким образом, что она срабатывала только в режиме «появление сигнала ЭМИ», который записывался на диск и при необходимости мог отображаться на экране дисплея. В остальное время система была настроена на режим «ожидания», и моменты времени, когда сигнал ЭМИ отсутствовал, не регистрировались. В то время как низкочастотная система YAMANA OPL YMF719-SA2 позволяла регистрировать весь процесс разрушения от начала приложения нагрузки до разделения образца на фрагменты.

кальных, так и глобального участков падения нагрузки, предшествует увеличение энергии сигнала ЭМИ. Аналогичные результаты при регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) получены в [2, 23, 24]. Завершение формирования каждого локального участка разрушения сопровождается последовательным увеличением и уменьшением энергии сигнала ЭМИ. Близкие к этому особенности наблюдаются при регистрации сейсмических колебаний от землетрясений [25—28, 33].

Совместно с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ и нагрузки системой АСИ-2 в процессе эксперимента использовалась низкочастотная измерительная система типа YAMANA OPL YMF719-SA2, работающая в диапазоне частот до 20 кГц.

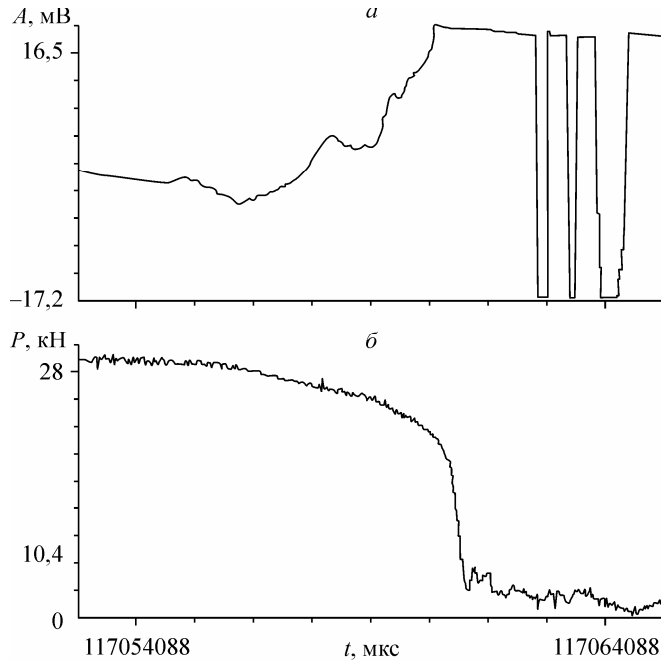


Рис. 2.8. Осциллограммы ЭМИ (а) и нагрузки (б) в период времени, соответствующий разрушению образца мрамора при регистрации сигналов в системе АСИ-2.

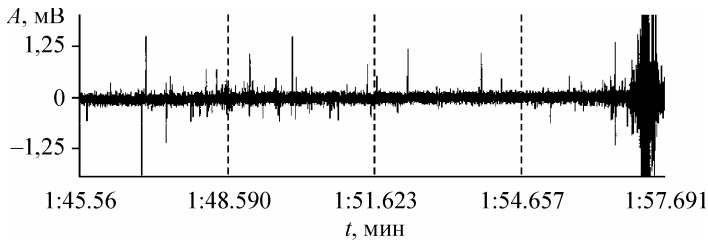


Рис. 2.9. Осциллограмма сигналов ЭМИ при разрушении образца розового среднезернистого мрамора, зарегистрированная с помощью системы YAMAHA OPL YMF719-SA2.

Временные параметры обеих систем и структурные характеристики эмиссионных сигналов имеют расхождение. Из осциллограмм эмиссионных сигналов рис. 2.8 и 2.9 следует, что хотя их структура различна, но в момент падения нагрузки энергия сигналов ЭМИ, зарегистрированная обеими системами, наибольшая. Отметим также, что система YAMAHA OPL YMF719-SA2 может регистрировать только низкочастотные сигналы, при этом нагрузка на образец изменялась достаточно медленно (частота изменения сигнала нагрузки — около 10 Гц), т. е. сигнал при ее изменении мог быть зарегистрирован только в момент резкого падения нагрузки, и поэтому нагрузочная характеристика, представляющая собой прямую линию на оси абсцисс, нами исключена из рассмотрения как малоинформа-



тивная. Итак, период времени падения нагрузки равен 1 мин. 57,691 с (см. рис. 2.9), а на предшествующем этому участке времени, начиная от 1 мин. 45,356 с, зарегистрировано значительное количество импульсов эмиссионных сигналов, наибольший по длительности и амплитуде из которых соответствует моменту разрушения.

Исследования на образцах горных пород, находящихся под сжимающей нагрузкой, равномерно распределенной по их поверхности, подтвердили, что в напряженном материале, благодаря формирующимся механоэлектрическим источникам, возникает электромагнитное излучение в широком диапазоне частот. При этом излучение на повышенных частотах присутствует в процессе трещинообразования (стадия предразрушения), что подтверждает выводы, полученные в [29].

Таким образом, регистрация и анализ синхронных записей осциллограмм сигналов ЭМИ и нагрузки позволяют отметить следующее:

наблюдается два типа разрушения образцов: резкое, в течение 5—10 мкс и «медленное» — в течение нескольких десятков мс;

переход образцов в упругопластическое состояние характеризуется стабилизацией нагрузки, а сигналы ЭМИ при этом представлены большим количеством импульсов, чем на начальных этапах нагружения;

представление графиков относительной нагрузки и сигналов ЭМИ по кадрам позволяет утверждать, что при «локальных» либо глобальном (на критической стадии) падении нагрузки возникающие сигналы ЭМИ коррелируют с моментами падения нагрузки и соответственно нарушения сплошности образцов. Наиболее энергоемкие сигналы ЭМИ регистрируются на этапах, близких к моментам нарушения сплошности образцов горных пород.

### **2.1.3. Структурные особенности сигналов ЭМИ при многостадийном падении нагрузки в процессе разрушения образцов горных пород**

При исследовании связи между параметрами ЭМИ и нагружения породных образцов обычно предполагается, что максимальные значения сигналов ЭМИ имеют место при прорастании магистральной трещины, обуславливающей потерю их сплошности. Например, в [30] авторы полагают, что моменты полного разрушения и появления серии импульсов ЭМИ связаны между собой, при этом моменту разрушения образца соответствует наиболее значительный по длительности и амплитуде пакет импульсов ЭМИ. Этот вывод распространяется как на испытываемые образцы, так и на массив горных пород.

Рассмотрим экспериментальные данные, свидетельствующие о случаях существования нескольких серий импульсов ЭМИ, связанных с падением нагрузки в образцах при достижении ими предела прочности. Примером тому может служить одноосное с постоянной скоростью 0,26 кН/с нагружение образцов мрамора Искитимского месторождения [31] с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ и нагрузки. Подробное описание методики, стенда, систем датчиков, а также регистрации и обработки информации приведено выше. Всего было испытано 40 образцов размерами 2,5 × 2,3 × 2 см, а также пять образцов размерами 2,1 × 2,1 × 6,6 см. Сведения о типичных результатах экспериментов приведены в табл. 2.2—2.4.

Таблица 2.2

Параметры сигналов ЭМИ и нагрузки на стадии разрушения образцов мрамора Искитимского месторождения

Номер образца	Размеры образца, см	1 этап падения нагрузки			2 этап падения нагрузки			T, мс
		A <sub>1</sub> , мВ	τ <sub>1</sub> , мс	ΔP <sub>1</sub> , кН	A <sub>2</sub> , мВ	τ <sub>2</sub> , мс	ΔP <sub>2</sub> , кН	
1	2,5 × 2,3 × 2,0	425,00	20	6,20	267,0	19	52,55	5754
2	2,5 × 2,3 × 2,0	210,00	23	5,00	156,0	21	36,20	105598
3	2,5 × 2,3 × 2,0	239,00	9	8,45	67,0	24	21,20	38648
4	2,5 × 2,3 × 2,0	11,88	360	5,00	12,8	545	20,50	17433
5	2,1 × 2,1 × 6,6	43,20	71	22,75	15,6	370	1,75	6720
6	2,5 × 2,3 × 2,0	94,00	17	19,80	—	—	—	—
7	2,1 × 2,1 × 6,6	31,25	16	6,50	37,3	24	3,50	4051

Таблица 2.2 содержит параметры сигналов ЭМИ и нагрузки при поэтапном ее падении: будем считать этапом 1 падения нагрузки на образец — частичное ее падение; этапом 2 падения нагрузки — полное ее падение, соответствующее состоянию нарушения сплошности в образце. Между этапами 1, 2 нагрузка плавно возрастала (образцы: № 3, рис. 2.10; № 5, рис. 2.11; № 7, рис. 2.12). Здесь использованы следующие обозначения: A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub>, τ<sub>1</sub> и τ<sub>2</sub>, ΔP<sub>1</sub> и ΔP<sub>2</sub> — амплитуды сигналов ЭМИ, длительности и величины падения нагрузок для этапов 1 и 2 (разрушения) соответственно; T — временной интервал между этапами 1 и 2 падения нагрузки. Первая колонка таблицы содержит номера нагружаемых образцов.

В табл. 2.3 приведены численные значения величин A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>, τ<sub>1</sub>/τ<sub>2</sub> и ΔP<sub>1</sub>/ΔP<sub>2</sub> на первом и втором этапах нагружения и соотношения между амплитудами сигналов ЭМИ и изменениями нагрузок, а в табл. 2.4 — численные значения величин нагрузок (P<sub>1</sub>), (P<sub>2</sub>) и их изменений на первом (P'<sub>1</sub>) и втором (P'<sub>2</sub>) этапах нагружения соответственно. На основании этих сведений все результаты экспериментов разделены на пять групп (последняя колонка в табл. 2.3). Так, для образцов 1, 2, отнесенных к I группе, характерны следующие соотношения между параметрами амплитуд сигналов ЭМИ и падениями нагрузок: A<sub>1</sub> > A<sub>2</sub>, ΔP<sub>1</sub> < ΔP<sub>2</sub> (всего образцов, отнесенных к I группе, было испытано 18). Группе II соответствуют соотношения

Таблица 2.3

Соотношения параметров сигналов ЭМИ 1 и 2 этапов нагружения в соответствии с табл. 2.2

Номер образца	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>	τ <sub>1</sub> /τ <sub>2</sub>	ΔP <sub>1</sub> /ΔP <sub>2</sub>	Соотношение параметров	Группа
1	1,59	1,05	0,155	A <sub>1</sub> > A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> < ΔP <sub>2</sub>	I
2	1,34	3,28	0,122	A <sub>1</sub> > A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> < ΔP <sub>2</sub>	I
3	3,56	0,375	0,420	A <sub>1</sub> > A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> < ΔP <sub>2</sub>	II
4	0,93	0,66	0,560	A <sub>1</sub> ≈ A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> < ΔP <sub>2</sub>	II
5	2,76	0,19	12,600	A <sub>1</sub> > A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> > ΔP <sub>2</sub>	III
6	—	—	—	Один импульс	IV
7	0,84	0,66	1,850	A <sub>1</sub> < A <sub>2</sub> ΔP <sub>1</sub> > ΔP <sub>2</sub>	V

Таблица 2.4

Параметры 1 и 2 этапов нагружения образцов при разрушении мрамора

Номер образца	$S, \text{см}^2$	1 этап разрушения		2 этап разрушения	
		$P_1, \text{кН}$	$P_1', \text{кН}$	$P_2, \text{кН}$	$P_2', \text{кН}$
1	5,75	60,5	54,30	54,5	1,75
2	5,75	23,5	18,50	52,8	16,60
3	5,75	21,2	12,75	35,0	13,80
4	5,75	19,0	14,00	18,5	2,00
5	4,41	35,5	12,75	13,5	11,75
6	5,75	31,8	12,50	—	—
7	4,41	17,5	11,00	13,0	9,50

$A_1 \cong A_2$ ,  $\Delta P_1 < \Delta P_2$  (11 образцов), группе III — соотношения  $A_1 > A_2$  и  $\Delta P_1 > \Delta P_2$  (пять образцов), IV группу составляют экспериментальные данные с одностадийным падением нагрузки (восемь образцов), а к V группе относятся эксперименты с соотношениями  $A_1 < A_2$ ,  $\Delta P_1 > \Delta P_2$  (три образца).

На рис. 2.10—2.12 приведены синхронные осциллограммы сигналов на выходе датчиков ЭМИ и нагрузки: *а* — для первого этапа падения нагрузки, *б* — для второго. При этом, например, для образца 3 (см. рис. 2.10) соблюдается соотношение  $A_1 > A_2$ ,  $\Delta P_1 < \Delta P_2$ . Здесь на первом этапе падение нагрузки составляет 8,45 кН, амплитуда сигнала ЭМИ — 239 мВ (см. табл. 2.2), а для второго этапа — 21,2 кН и 67 мВ соответственно.

Для образца 5 (см. рис. 2.11) выполняется  $A_1 > A_2$ ,  $\Delta P_1 > \Delta P_2$ , что существенно отличается от рассмотренного выше. В этом случае падение нагрузки на первом

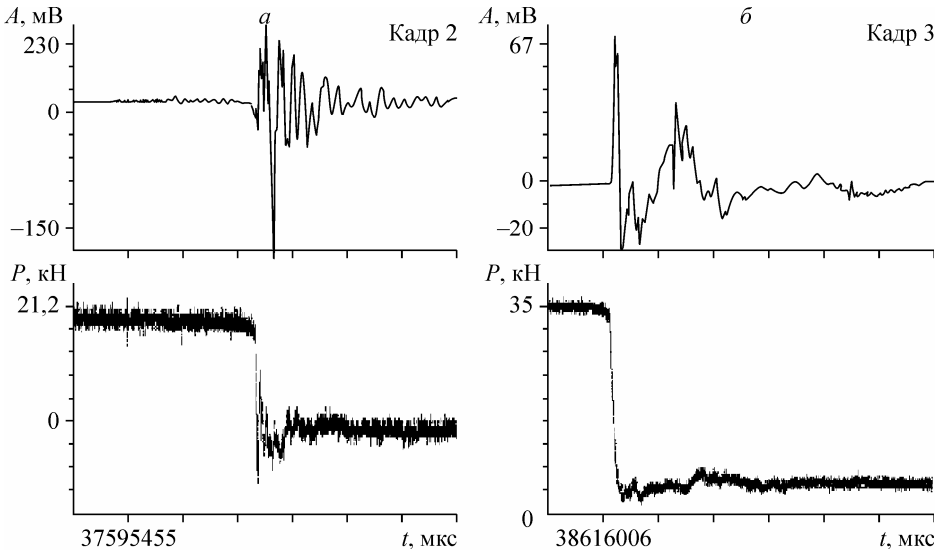


Рис. 2.10. Осциллограммы сигналов ЭМИ и падения нагрузки этапов 1 (*а*) и 2 (*б*) разрушения образца 3 (белый крупнозернистый мрамор).

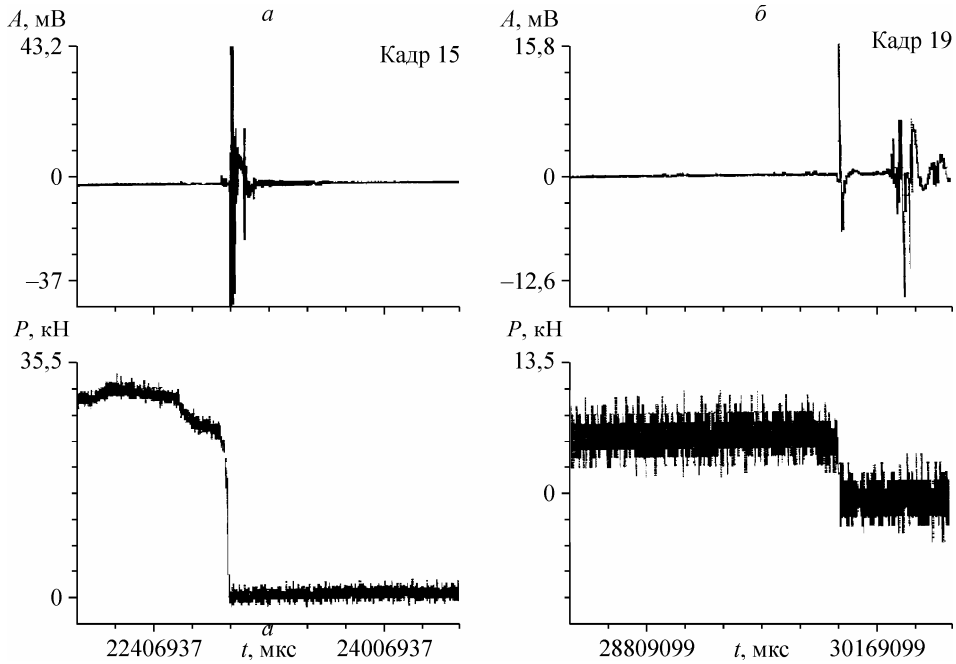


Рис. 2.11. Осциллограммы сигналов ЭМИ и падения нагрузки этапов 1 (а) и 2 (б) разрушения для образца 5 (розовый среднезернистый мрамор).

этапе (22,7 кН) было значительно больше, чем на втором (1,75 кН), т. е. нагрузка уменьшилась в 12,6 раза, в то время как амплитуды сигналов ЭМИ составили соответственно 43,2 и 15,6 мВ, т. е. изменились лишь в 2,76 раза. Для образца 7 (см.

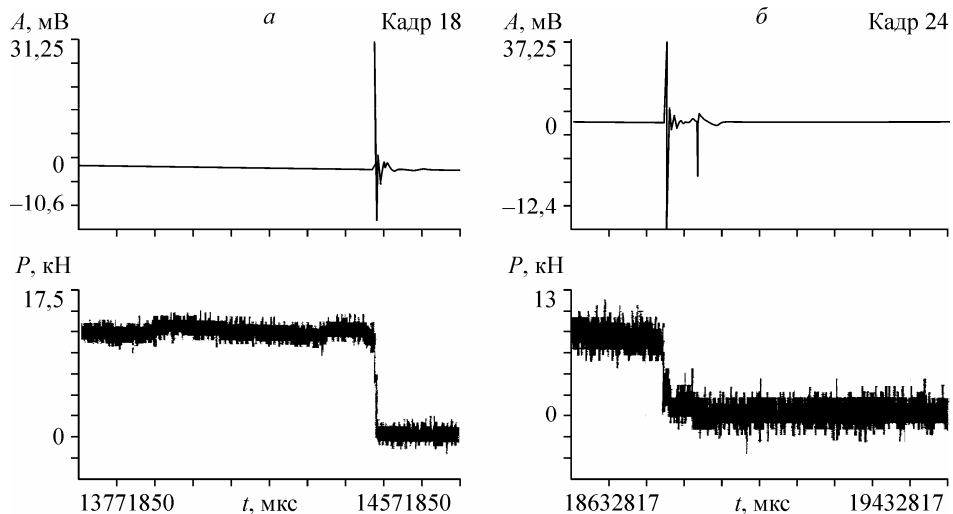


Рис. 2.12. Осциллограммы сигналов ЭМИ и падения нагрузки этапов 1 (а) и 2 (б) разрушения для образца 7 (белый мелкозернистый мрамор).

рис. 2.12) имеет место  $A_1 < A_2$ ,  $\Delta P_1 > \Delta P_2$ , при этом перепад нагрузки на первом этапе составляет 6,5 кН, а на втором — 3,5 кН с амплитудами сигналов 31,2 и 37,2 мВ соответственно.

Сравнивая соответствующие записи для образцов 3, 5 и 7, видим, что анализируемые процессы различаются между собой. Эти особенности отражены в табл. 2.3 введением групп I—V, при этом к группе I отнесены процессы, описываемые осциллограммами типа приведенных на рис. 2.10, к группе III — на рис. 2.11, а к группе V — на рис. 2.12. По соотношению прироста нагрузок  $\Delta P_1/\Delta P_2$  все группы табл. 2.3 можно разбить на два класса:

$$\text{I} - \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} > 1; \quad \text{II} - \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} < 1.$$

К первому из них относятся образцы 5 и 7, а ко второму — 1, 2, 3 и 4, 6. В табл. 2.2 приведены величины временных интервалов между сравниваемыми этапами падения нагрузки, которые колеблются от 4 с (образец 7) до 105 с (образец 2), т. е. изменяются в 26 раз.

В табл. 2.4 приведены величины изменения нагрузки на 1 и 2 этапах ее падения, откуда следует, что возможны различные варианты такого изменения: от слабого (пряжка 5—10 кН) на 1 этапе и существенных (порядка 30—50 кН) на 2 до значительных (порядка 20 кН) на 1 этапе и слабых (5—3 кН) на 2. Однако наибольшее количество образцов (18) разрушалось при слабом падении нагрузки на этапе 1 и значительном — на этапе 2.

Изложенное соответствует случаю, когда по падению нагрузки и соответствующим сигналам ЭМИ регистрируются два этапа разрушения в одном и том же образце.

Обратим внимание на приведенные особенности исследуемых процессов в связи с тем, что в экспериментах с образцами достаточно часто (восемь случаев из 45) наблюдается один этап падения нагрузки, а соответствующий ему сигнал ЭМИ максимален по амплитуде и длительности (см. табл. 2.2, образец 4). Примечательно, что среди сорока пяти испытанных образцов было зарегистрировано пять случаев трехэтапного падения нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что появление значительных (в 2—5 раз больших по сравнению с обычно регистрируемыми в данном эксперименте) по амплитуде и длительности сигналов ЭМИ не обязательно отвечает общему нарушению сплошности образца, но может являться следствием его частичного разрушения. Это можно объяснить тем, что, чем больше поврежден материал, тем выше уровень напряжений в еще ненарушенной части нагружаемого образца. Это, в свою очередь, вызывает последующее еще более интенсивное трещинообразование [38].

Таким образом, при формировании двух и более ярко выраженных центров локального разрушения в породных образцах, нагружаемых с постоянной скоростью, равной 0,26 кН/с, временной интервал между прорастанием по ним магистральных трещин может быть различным и изменяться в зависимости от прочностных характеристик образцов в пределах от 4 до 106 с. При этом происходит изменение предела прочности от 0,65 до 0,97 $\sigma^*$ , а в структуре сигнала ЭМИ в эти моменты формируются характерные пакеты импульсов, по которым можно наблю-

дать различие соотношений между величинами падения нагрузки и значениями амплитуд импульсов ЭМИ. Это позволило на основании анализа результатов синхронных записей осциллограмм сигналов ЭМИ и нагружения образцов горных пород установить, что при скоростях нагружения от 0,26 кН/с до 0,316 кН/с может иметь место одно-, двух- или трехстадийное падение нагрузки в образце, что и обуславливает, по-видимому, неоднозначность связи между величинами нагрузки на образец и соответствующими им амплитудами сигналов ЭМИ на различных этапах нагружения. Так, величине падения нагрузки (например, 52,55 кН) может соответствовать сравнительно небольшой амплитудный уровень сигнала ЭМИ (267 мВ), а малому значению падения нагрузки (6,2 кН) — достаточно большая величина сигнала ЭМИ (425 мВ).

#### 2.1.4. Амплитудные характеристики сигналов электромагнитного излучения в моменты нарушения сплошности образцов мрамора

Рассмотрим более детально амплитудные характеристики сигналов ЭМИ, регистрируемые в моменты времени, отвечающие актам нарушения сплошности мраморных образцов. Было испытано 25 образцов [39]. Это крупно-, средне- и мелкозернистые белые и розовые мраморные образцы различных нарушенности и слоистости.

В качестве датчиков ЭМИ использовались емкостные антенны, выполненные в виде медных пластин размером  $15 \times 30 \times 2$  мм, устанавливаемые через изоляционную прокладку из текстолита (для изоляции образца от металлических конструкций и деталей пресса) на нагружаемый образец и соединенные с усилителем с полосой пропускания 3 Гц—300 кГц и коэффициентом усиления 100. Одноосное нагружение образцов осуществлялось с постоянной скоростью, равной 0,316 кН/с, до их полного разрушения с синхронной записью сигнала ЭМИ и нагрузки. В табл. 2.5 представлены данные измерений параметров ЭМИ при разрушении образцов мрамора. В таблицах, иллюстрациях и тексте настоящего параграфа приняты следующие обозначения:  $A'_{\max}$  — размах сигнала ЭМИ на входе усилителя, мВ:

$$A'_{\max} = \frac{DA_i}{K_{yc}} \quad (2.2)$$

Здесь  $K_{yc}$  — коэффициент усиления усилителя;  $A_{\max_i}$  — величина максимальной амплитуды импульса в сигнале ЭМИ на выходе усилителя, мВ;  $A_{\min_i}$  — величина минимальной амплитуды сигнала ЭМИ на выходе усилителя, мВ;  $DA_i = A_{\max_i} - A_{\min_i}$  — разность между максимальной и минимальной амплитудами;  $DP_i = P_{\max_i} - P_{\min_i}$  — разность между максимальной и минимальной нагрузками в момент разрушения, кН;  $i$  — номер эксперимента (образца);  $t$  — длительность электромагнитного сигнала, мкс;  $m_A$  — среднеарифметическое значение величины  $A_i$  за время  $t$ , которое вычислялось по формуле

$$m_A = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k A_j, \quad (2.3)$$

где  $A_j$  — отсчеты напряжений в сигнале ЭМИ, взятые через 2 мкс за цикл наблюдений  $t$  (всего ~40000 мкс).

Таблица 2.5

Амплитудные характеристики сигналов ЭМИ и величины нагрузок при испытаниях образцов мрамора

Номер образца	Размеры образца, см	$A'_{\max}$ , мВ	$A_{\max}$ , мВ	$A_{\min}$ , мВ	$P_{\max}$ , кН	$P_{\min}$ , кН	$m_p$ , кН	$m_A$ , мВ
1	2,5 × 4,5 × 3,0	755	3910	-530	81,5	77,0	734	24,4
2	2,3 × 6,0 × 4,5	90	300	-230	14,3	12,0	25,71	3,02
3	2,5 × 4,5 × 3,0	71	280	-140	19,5	13,0	-17,88	2,36
4	2,3 × 5,0 × 3,5	358	1700	-410	61,0	54,6	501	3,49
5	6,5 × 2,0 × 3,0	107	80	-2710	62,3	40,3	335	-0,49
6	2,3 × 4,5 × 5,0	78	330	-550	69,0	66,0	610	1,15
7	2,0 × 3,3 × 6,8	194	480	-130	35,0	14,0	286,7	29,58
8	2,3 × 7,0 × 6,5	137	480	-20	104,0	65,0	640	1,11
9	2,3 × 4,0 × 6,0	403	640	-330	18,5	15,5	59,46	1,04
10	2,3 × 4,0 × 5,6	175	250	-40	56,0	16,0	40,15	0,92
11	2,3 × 4,5 × 5,8	234	130	-1250	77,5	73,0	671	-0,89
12	2,0 × 4,8 × 5,2	610	1730	-1860	63,5	15,0	129	-162,94
13	2,0 × 4,5 × 3,5	187	590	-510	25,5	13,0	86,5	-1,75
14	2,0 × 4,5 × 7,0	76	360	-90	64,8	53,2	466,8	1,47
15	2,0 × 6,0 × 6,0	500	1310	-1634	24,0	11,2	49,6	12,64
16	2,0 × 5,9 × 6,8	984	1860	-3930	20,0	10,0	16,77	1,19
17	6,7 × 4,4 × 2,0	1357	3950	-4030	80,5	20,5	752	-866,0
18	1,9 × 5,6 × 2,0	763	3986	-510	41,8	37,8	1,57	-34,5
19	1,9 × 4,5 × 7,0	4250	4130	-3860	47,0	22,0	0,29	0,67
20	1,9 × 5,7 × 5,2	478	2470	480	140,0	132,0	2,11	5,48
21	1,9 × 6,4 × 3,4	874	3940	-1200	88,0	28,0	2,49	40,92
22	1,9 × 3,4 × 5,0	154	520	-390	28,0	10,5	6,67	-1,55
23	1,9 × 4,7 × 5,5	248	400	-1060	70,0	47,0	1,19	16,97
24	1,9 × 5,5 × 6,0	290	610	-1100	132,0	138,0	0,307	-2,49
25	1,9 × 2,3 × 8,5	562	260	-440	63,0	55,0	0,57	-89,42

Так как в задачи описываемой серии экспериментов входила регистрация величин сигналов ЭМИ и нагрузки только в моменты актов нарушения сплошности в образцах, то эти процессы, как правило, происходили при резком падении нагрузки в течение одного кадра (всего за ~40000 мкс),  $k$  — число отсчетов величин напряжений за время  $t$  (~20000 отсчетов);  $j$  — номер отсчета;  $m_p$  — среднеарифметическое значение величины  $P_j$  за время  $t$

$$m_p = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_j, \quad (2.4)$$

где  $P_j$  — отсчеты нагрузки, взятые через 2 мкс за цикл наблюдений по каждому образцу  $t$ .

Значения амплитуд сигналов ЭМИ и нагрузки, геометрические размеры образцов и значения параметров по каждому из нагружаемых образцов мрамора приведены в табл. 2.5.

В табл. 2.6 даны характеристики испытываемых породных образцов, величины их напряжений разрушения и соответствующие этому максимальные амплитудные значения сигналов ЭМИ ( $A_i$ ), объединенные в три группы. К первой группе отнесены образцы с высотой от 2 до 3,5 см; ко второй — от 4,5 до 6 см и к третьей — от 6,5 до 8,5 см соответственно. В последних двух колонках представлены величины изменения нагрузки при нарушении сплошности образца ( $DP_i$ ) и размах амплитуды сигнала ЭМИ ( $DA_i$ ).

На рис. 2.13 приведены диаграммы изменения максимальных амплитуд сигналов ЭМИ ( $A_i$ , табл. 2.6) для образцов различной высоты в момент общего нарушения сплошности в зависимости от достигнутых предельных напряжений. Из данных табл. 2.6 следует, что наибольшие величины амплитудных значений сигналов ЭМИ наблюдались у образцов 17 и 18 (высотой 2 см, входят в группу 1); 16 и 19 (высотой 6,8 и 7,0 см соответственно, входят в группу 3). Основное количество образцов (4, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 20—25) — это мраморные образцы различной высоты с амплитудами, принимающими значения в моменты нарушения сплошно-

Таблица 2.6

Характеристики величин напряжений и соответствующих им сигналов ЭМИ на стадии нарушения сплошности для образцов мрамора

Номер образца	$\sigma$ , МПа	$S$ , см <sup>2</sup>	$h$ , см	$A_i$ , мВ	$DP_i$ , кН	$DA_i$ , мВ
1	4	11,25	3	755	4,5	4440
3	5,8	11,25	3,0	71	6,5	530
4	5,6	11,25	3,5	358	6,4	420
5	16,9	13,0	3,0	107	22	212
13	24,2	9,0	3,5	187	7,8	3590
17	2,9	29,48	2,0	874	60	5790
18	31,8	10,64	2,0	1357	4	7980
21	28,6	12,16	3,4	763	60	900
2	1,7	13,8	4,5	90	2,3	320
6	2,9	10,35	5,0	78	3	630
10	32,6	9,2	5,6	175	30	290
11	4,3	10,35	5,8	234	4,5	320
12	50,5	9,6	5,2	610	48,5	1380
20	7,4	10,83	5,2	478	8	7990
22	27,1	6,46	5,0	154	17,5	5140
23	25,8	8,93	5,5	248	23	910
7	31,8	6,6	6,8	194	21	460
8	24,2	16,1	6,5	137	39	500
9	3,3	9,2	6,0	403	3	810
14	9,6	9,0	7,0	76	8,6	1100
15	10,7	12	6,0	500	12,8	450
16	8,5	11,8	6,8	984	10	2944
19	29,2	8,55	7,0	4250	25	4490
24	5,7	10,4	6,0	610	6	1460
25	18,5	4,37	8,5	562	8	1710



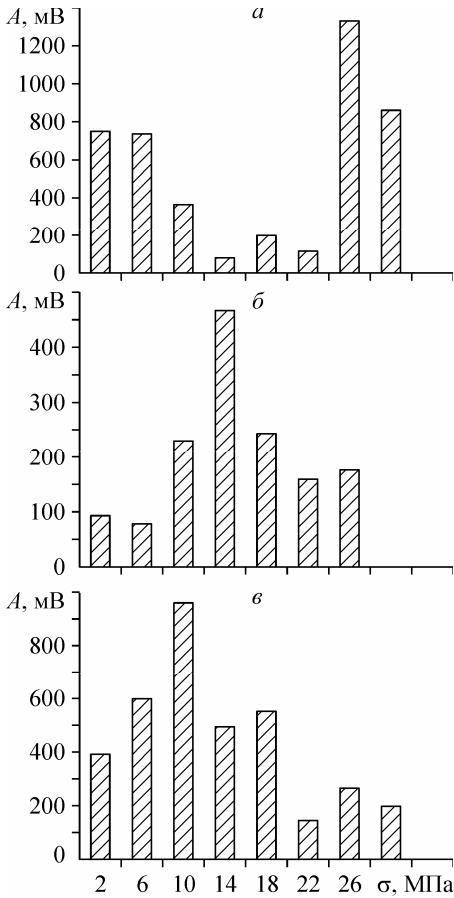


Рис. 2.13. Диаграммы распределения максимальных амплитуд эмиссионных сигналов в образцах мрамора в зависимости от напряжений на стадии нарушения сплошности: для образцов с высотой: 2,0—3,5 см (а), 4,5—5,8 см (б), 5,8—6,5 см (в).

сти в пределах нескольких сотен милливольт. Наименьшие амплитудные значения принимали образцы 2, 3, 5, 6, 14 высотой от 3 до 7 см. Различие между максимальной и минимальной амплитудами составляло два порядка.

Отмечено также, что напряжения в образцах на стадии нарушения сплошности в них увеличиваются пропорционально площади образца. Так для образцов 10, 21, 23 и др. с площадями 51,5, 41,3 и 48,9 см<sup>2</sup> и высотами 6, 5,6 и 5,8 см соответственно напряжения в образцах принимают значения 32,6, 28,6 и 25,8 МПа соответственно, а для образцов 1, 4, 22 площадями 33,75, 39,35 и 32,3 см<sup>2</sup> и высотами 3, 3,5 и 5,0 см — 4,0, 5,6 и 27,1 МПа соответственно, т. е. проявляется масштабный фактор. Из диаграмм наблюдается (например, образцы 5, 7, 9, 13, 14, 17 и др.) неоднозначное соответствие между величинами напряжений и уровнем сигналов ЭМИ. Однако, в основном, большим величинам напряжений в образцах соответствуют и большие значения амплитуд эмиссионных сигналов (образцы 12, 15, 18, 19 и др.).

Из диаграммы распределений максимальных амплитуд сигналов ЭМИ в зависимости от напряжений в образцах крупно-, средне- и мелкозернистого белого и розового мрамора на стадии нарушения их сплошности (рис. 2.14) сле-

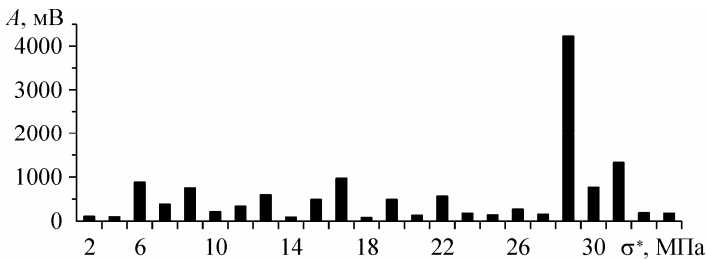


Рис. 2.14. Диаграмма распределения максимальных амплитуд сигналов ЭМИ в образцах мрамора в зависимости от напряжений на стадии нарушения их сплошности.

дует, что в большинстве образцов (в 17 из 25) при нарушении их сплошности уровни сигналов ЭМИ достигали значений, меньших 500 мВ, в шести случаях в образцах регистрировались сигналы ЭМИ от 500 до 1000 мВ, в одном случае — до 1500 мВ, и в одном случае сигнал ЭМИ достигал значения 4500 мВ.

На рис. 2.15 приведены графики относительных величин  $DA_i = DA_i / \max(DA_i)$  и  $DP_i = DP_i / \max(DP_i)$  в зависимости от номера эксперимента для испытанных 25 образцов. Здесь введены следующие обозначения:  $i$  — номер образца; 1 и 2 — изменение величин относительной амплитуды сигнала ЭМИ ( $DA_i$ ) и предельной нагрузки ( $DP_i$ ) на образец соответственно в зависимости от номера эксперимента (образца). Видно, что их изменения статистически согласованы, т. е. большим величинам приращения нагрузок соответствуют большие изменения сигналов ЭМИ.

Из графика изменения величин максимальных амплитуд сигналов ЭМИ в зависимости от предельной нагрузки на образцы (рис. 2.16) следует, что не всегда соблюдается пропорциональность между величинами напряжений на образцы и уровнем сигнала ЭМИ. Так, например, предельному значению  $\sigma^* = 5$  МПа соответствует амплитуда сигнала ЭМИ в 1400 мВ, а значениям 20 и 23 МПа соответствуют амплитуды сигналов ЭМИ 200 мВ, однако, в основном, большим по величине предельным нагрузкам на образцы соответствуют и большие амплитуды эмиссионных сигналов.

Таким образом, экспериментально установлено, что:

величины амплитуд сигналов ЭМИ в момент разрушения образцов мрамора существенно (на один—три порядка) превышают уровень этих значений на промежуточной стадии их нагружения;

наибольшие амплитудные значения сигналов ЭМИ наблюдались у образцов со средней зернистостью, а наименьшие — у крупнозернистых;

напряжения в образце на стадии нарушения сплошности в нем зависят от структурно-текстурных его особенностей и увеличиваются пропорционально объему образца.

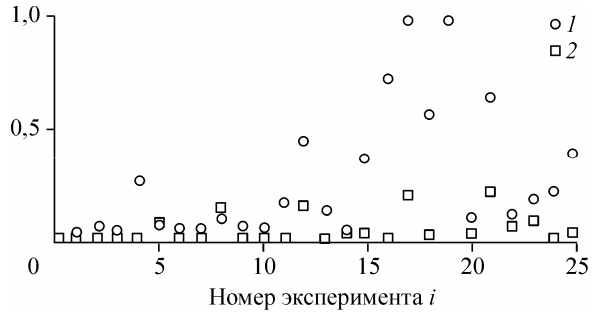


Рис. 2.15. Сопоставление относительных характеристик сигналов ЭМИ и нагрузки в момент разрушения для 25 испытанных образцов мрамора.

Поясн. см. в тексте.

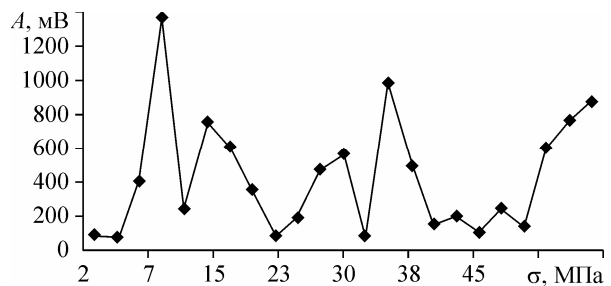


Рис. 2.16. График изменения уровня сигналов ЭМИ в зависимости от изменения предельной нагрузки на образцы мрамора.

### 2.1.5. Трехстадийность процесса разрушения образцов горных пород на основании регистрации сигналов электромагнитного излучения

В данном разделе изучим более детально развитие процесса разрушения горных пород с позиций ЭМИ и в сравнении с другими методами (сейсмоакустический (САЭ), акустический (АЭ)). Как было отмечено ранее, разработанные в ИФЗ РАН модели разрушения (применительно к землетрясениям) основываются на трехстадийности этого процесса [34, 35, 38]. В [27, 36] констатируется, что стадии 1 и 2 изучаемого процесса характеризуются на начальных этапах нагружения возникновением (под действием тектонических напряжений) трещин небольшого размера с незначительными по амплитуде сигналами ЭМИ с резким увеличением количества этих трещин на стадии, предшествующей нарушению сплошности, а также увеличением самого размера этой области. На заключительной — третьей стадии развивается процесс неустойчивого деформирования, локализующийся в узкой области будущего макроразрыва. Эту стадию авторы [36] назвали стадией неустойчивости.

Интересный результат, характеризующий взаимосвязь продолжительности между динамическими проявлениями горного давления в виде сейсмособытий с энергией более 1000 Дж с продолжительностью чередующихся циклов пригрузки шахтных полей в условиях рудника «Таймырский», был получен в [32] при пространственно-временном анализе сейсмособытий в привязке к геомеханической ситуации. Здесь показано, что характер развития геомеханических процессов в массивах тесно связан с сейсмическим режимом шахтных полей. Сейсмические события с энергией большей  $10^3$  Дж чередовались по мере подработки породных толщ со все уменьшающимся периодом их следования перед крупными смещениями геоблоков больших масштабов (десятки—сотни метров). Имея в виду потенциальную значимость этого положения для детализации заключительной стадии разрушения горных пород, результаты лабораторных экспериментов анализировали для сигналов электромагнитного излучения и, с этих позиций, принимая другой масштабный уровень.

Поэтому одной из задач исследований являлась проверка корректности описания трехстадийной моделью разрушения образцов горных пород с соответствующим третьей стадии уменьшением периодичности появления электромагнитных сигналов по мере нагружения породных образцов и приближения момента их разрушения.

Эксперименты по нагружению горных пород с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ и нагрузки проводились на стенде по методике, описанной в [29]. При этом предусматривалась синхронная регистрация нагрузки и появляющихся сигналов ЭМИ в ждущем режиме. Можно было определять время появления каждого электромагнитного импульса и изменение их «периодичности» по мере приближения этапа нарушения сплошности образцов горных пород. Испытывались образцы белого и розового мрамора средне- и мелкозернистого Искитимского месторождения с размерами  $20 \times 50 \times 80$  и  $20 \times 50 \times 45$  мм соответственно.

При одноосном сжатии образца мрамора было зафиксировано (рис. 2.17), что процесс нагружения с постоянной скоростью 0,316 кН/с занимает 1,605 мин. Ста-

дия 1 (согласно [38], в образце возникают хаотично расположенные трещины) занимает по времени примерно 1 мин., при этом соседние электромагнитные импульсы регистрируются последовательно через 5,17, 5,37, 4,99, 2,91, 1,83, 1,26 с. Затем по мере роста нагрузки от уровня  $0,42\sigma^*$ , где  $\sigma^*$  — предельное напряжение (10,33 кН), периоды между импульсами уменьшаются, составляя менее 1 с. Например, серия импульсов ЭМИ при  $0,64\sigma^*$  регистрируется через временные интервалы с меньшей периодичностью, измеряемой в миллисекундах: соседние импульсы регистрируются последовательно через 1034, 791, ..., 250, ..., 129 мс. При увеличении нагрузки на образец до  $0,88\sigma^*$  (25,84 кН) соседние импульсы начинают регистрироваться последовательно через 40, 15, 14, 10, 4 мс и т. д.

Таким образом, видно, что периоды появления смежных импульсов по мере роста нагрузки сокращаются последовательно на один, два, три порядка. Увеличение количества сигналов ЭМИ с длительностью ( $200 \pm 50$ ) мкс и уменьшение периода их следования от первых десятков до единиц секунд, а затем и до сотен миллисекунд, иллюстрирует переход от стадии 1 к стадии 2. Отметим также, что некоторые сигналы ЭМИ имеют длительность в пределах от 400 до 180 мкс.

В табл. 2.7 представлены величины амплитуд сигналов ЭМИ, их длительности и периоды следования, начиная с момента времени, когда нагрузка близка к максимальной — 27,4 кН. Здесь введены следующие обозначения:  $N$  — номер измерения по порядку кадра (длительностью  $\sim 40$  мс);  $A$  — амплитуда сигнала, мВ;  $P$  — нагрузка на образец, кН;  $T$  — период следования импульсов, мс;  $\tau$  — длительность одиночного импульса, мкс;  $S$  — амплитудная дисперсия сигнала ЭМИ, мВ.

Анализ данных табл. 2.7 позволяет сделать вывод о том, что стадии 1 нагружения, когда нагрузка на образец приближается к максимальной, соответствуют

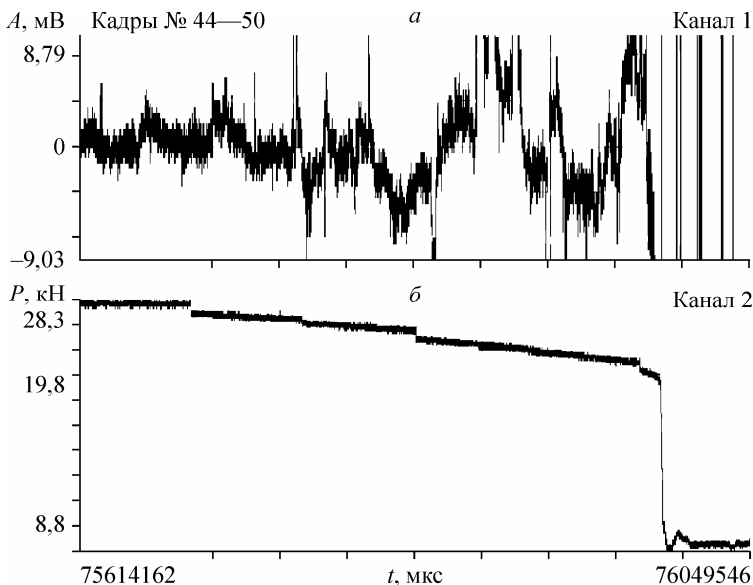


Рис. 2.17. Осциллограммы сигналов ЭМИ (а) и нагрузки (б) на стадии предразрушения образца розового среднезернистого мрамора.

Таблица 2.7

Характеристики сигналов электромагнитного излучения образца розового среднезернистого мрамора при приближении нагрузки к предельной

Номер образца	Номер кадра	$A$ , мВ	$P$ , кН	$T$ , мс	$\tau$ , мкс	$S$ , мВ
1	27	0,086	23,36	1839	126	3,23
2	28	0,150	24,05	2480	1034	2,60
3	36	0,048	28,44	1467	462	2,34
				2	206	
4	37	0,075	28,44	2689	162	3,60
5	38	0,075	28,44	1264	322	3,70
6	42	0,274	27,40	3382	1530	7,27
				14	196	
7	43	0,204	27,40	383	138	1,99
				25	104	
				7		
8	44	*	27,40	144	*	
				16		
				12		
9	46	0,66	26,65	108	308	9,08
				16	114	
				12		
10	47	0,489	25,90	33	1106	7,02
				11	144	
				7		
				5		
11	48	0,854	24,05	63	1312	6,59
				14	256	
				7		
				3		
12	49	0,874	22,71	38	3310	8,40
				16	250	
				4		
				2		
13	50	1630	8,39	37	32124	

Примечание. Здесь величина максимальной нагрузки — 28,44 кН; \* — в столбцах 3 и 7 показания амплитуд сигналов ЭМИ и длительностей отдельных импульсов не представлены, так как в этом кадре было зарегистрировано девять импульсов с различными амплитудами и периодами.

одиночные импульсы с амплитудами от 0,048 до 0,150 мВ, длительностями от 200 до 500 мкс. При этом периоды их следования постепенно изменяются от 3000 мс до ~1000 мс, затем уменьшаются до 100 мс и менее.

Из графика изменения амплитуды сигнала ЭМИ в зависимости от изменения нагрузки на стадии, предшествующей нарушению сплошности образца (рис. 2.18), следует, что при достижении предельной нагрузки на образец амплитуды эмиссии

онных сигналов достигают достаточно малых величин, принимая значения в десятки микровольт, а при потере несущей способности образца амплитуды сигналов ЭМИ увеличиваются. Наибольшие значения амплитуды принимают в момент нарушения сплошности образца (см. № 13 табл. 2.7,  $A = 1630$  мВ).

Далее из табл. 2.7 следует, что, по мере приближения к моменту разрушения, количество сигналов ЭМИ на равных временных интервалах увеличивается, т. е. периоды следования между ними сокращаются с одновременным уменьшением длительности импульсов ЭМИ.

На рис. 2.19 в качестве иллюстрации этого положения представлен участок осциллограммы, кадр 44, равный ~40 мс. Для корректной оценки количества одиночных импульсов ЭМИ, их длительности, периодичности следования удобно представить его в более крупном временном масштабе (равном, например, ~1000 мкс). В таком представлении можно выделить девять импульсов ЭМИ различной амплитуды и длительности и

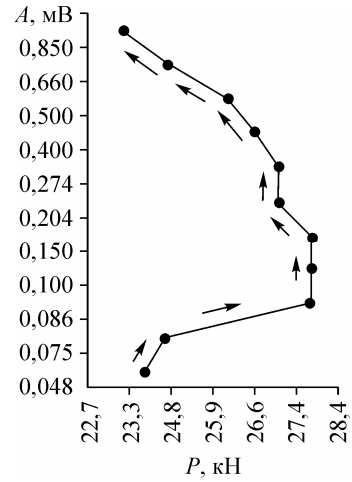


Рис. 2.18. График зависимости величины амплитуды сигналов ЭМИ от изменения нагрузки на стадии, предшествующей разрушению сплошности образца розового среднезернистого мрамора.

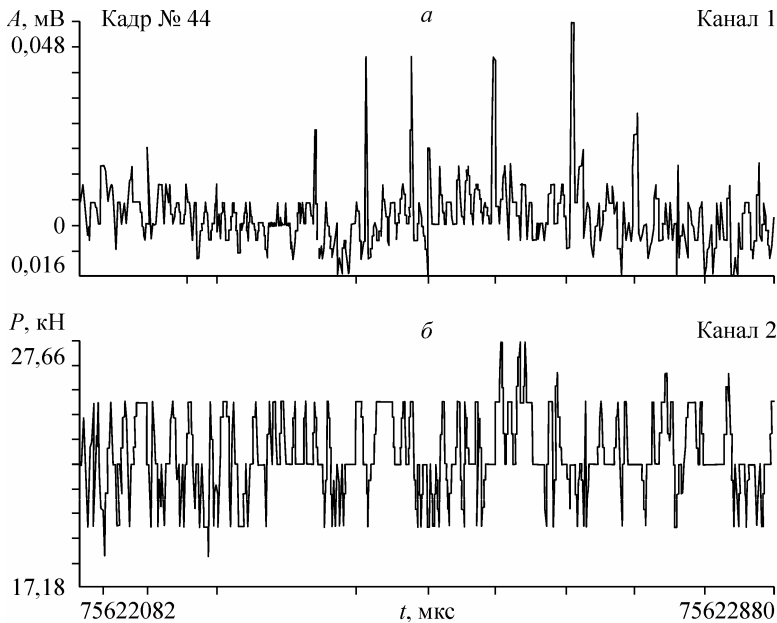


Рис. 2.19. Синхронные записи сигналов ЭМИ ( $a$ ) и нагрузки ( $b$ ) на начальном этапе падения нагрузки.

определить периоды их следования. При проведении всех экспериментальных исследований для выделения и последующей записи полезного сигнала, в том числе — небольшой амплитуды (например, первые десятки микровольт), предусматривалось следующее. Перед проведением каждого эксперимента записывалась помехошумовая реализация сигнала помехи и шума, а затем при нагружении образцов горных пород — суммарное значение величин полезного сигнала с помехошумовой реализацией. После этого сигнал помехи программно вычитался из суммарного сигнала.

Рассматривая подробнее эту серию импульсов, можно констатировать, что на различных стадиях нагружения, например, на стадии, предшествующей нарушению сплошности образца, могут возникать серии достаточно коротких по длительности одиночных сигналов ЭМИ, а поскольку, согласно [39, 40], длительность импульса соответствует поперечному размеру трещины, то возникновение таких сигналов может соответствовать возникновению значительного числа мелких трещин, которые могут впоследствии сливаться в более крупные [41]. Из рис. 2.17 и табл. 2.7 видно, что уже на начальной стадии падения нагрузки, когда оно еще незначительно, в записях процесса ЭМИ появляются периодические более низкочастотные компоненты.

Параметры отдельных сигналов, их длительности и периоды следования для кадра 44, представленные на рис. 2.19, сведены в табл. 2.8. Из табл. 2.8 и рис. 2.19 видно, что количество сигналов на временном интервале порядка 1000 мкс увеличивается, периодичность следования ЭМИ ( $T$ ) сокращается, а длительность ( $\tau$ ) уменьшается.

Из анализа табл. 2.7 и 2.8, а также рис. 2.19 (кадр 44 — начало потери несущей способности образца) следует, что перед нарушением сплошности в образце за сравнительно небольшой (10 мс) по отношению к длительности одного кадра (~40 мс) промежуток времени возникает достаточно большое количество (в данном случае — девять) короткопериодных (8—12 мкс) и низкоамплитудных (26—59 мкВ) импульсов.

Анализируя результаты рассматриваемого эксперимента, можно выделить определенную стадийность процесса разрушения горных пород. Первая стадия отмечается появлением соседних эмиссионных импульсов, следующих через единицы секунд (см. рис. 2.17: 5,17, 5,37, 4,99, 2,91, 1,83, 1,26 с). Вторая — появлением сигналов через сотни миллисекунд (1034, 791, ..., 250, ..., 129 мс). Последняя стадия

Таблица 2.8

Характеристики сигналов ЭМИ на начальной стадии падения нагрузки для образца розового среднезернистого мрамора

Характеристика	Номер импульса								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A$ , мкВ	26	34?9	26	48	59	59	48	26	48
$T$ , мкс	200	50	40	50	100	30	70	50	50
$\tau$ , мкс	8	8	12	10	12	10	8	8	12

характеризуется возникновением коротких малоамплитудных импульсов ЭМИ с временными промежутками их следования в первые сотни и десятки миллисекунд (40, 15, 14, 10, 4 мс). Аналогичные результаты были получены на образцах розового среднезернистого и белого крупнозернистого мрамора, а также образцах диабазов. Всего было испытано 10 образцов.

Таким образом, на основании экспериментальных исследований установлено, что при нагружении образцов пород до разрушения сопутствующие сигналы ЭМИ, регистрируемые последовательно, возникают со все возрастающей частотой и, соответственно, уменьшающимся временным интервалом их следования на критической стадии нагружения. При этом весь процесс разрушения можно представить как трехстадийный с неуклонно увеличивающимся количеством электромагнитных импульсов, уменьшением периода их следования и соответствующим увеличением скорости нагружения образцов.

## **2.2. ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПУАССОНОВСКОГО ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

Задача обнаружения сигнальной составляющей в нестационарном пуассоновском потоке импульсов неизвестной интенсивности возникает при решении многих практических задач: при обнаружении масс-спектральных пиков в масс-спектрометрии [42], обнаружении смены стадий разрушения горных пород [29] и др. Содержательная постановка задачи применительно к обнаружению смены стадий разрушения горных пород состоит в следующем. Процесс разрушения горных пород характеризуется стадийностью: зарождение микротрещин, накопление микротрещин, прорастание трещин, ветвление трещин, формирование и ветвление магистральной трещины, лавинное разрушение [29], причем появление трещин сопровождается появлением импульсов электромагнитного излучения. Интенсивность потока импульсов резко изменяется при переходе от одной стадии разрушения к другой. В [43] для описания потока импульсов в целом (без подразделения на стадии) предложена херстовская статистика; в [44], исходя из общих посылок, предложена пуассоновская модель распределения трещин в образце. В работе [45] предложено процесс образования трещин на отдельных стадиях разрушения рассматривать как однородный пуассоновский пространственно-временной процесс, причем регистрируемый электромагнитный сигнал с учетом возможного наложения импульсов представляется как профильтрованный пуассоновский процесс. Использование такой модели при построении алгоритмов обнаружения смены стадий разрушения требует больших вычислительных затрат и сложен в аппаратной реализации. Кроме того, интенсивность потока импульсов из-за изменения напряженности горных пород может изменяться во времени. Поэтому здесь предлагается рассматривать поток импульсов электромагнитного излучения как нестационарный пуассоновский процесс, а обнаружение смены стадий разрушения производить на основе обнаружения резкого изменения интенсивности потока.



### 2.2.1. Формулирование задачи обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов

Разобьем интервал наблюдения  $T$  на  $n$  подынтервалов длительностью  $\Delta T$  каждый. Длительность подынтервала  $\Delta T$  выбрана таким образом, чтобы наблюдаемый пуассоновский процесс в пределах этого подынтервала можно было считать стационарным. Обозначим  $\lambda_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , интенсивность процесса в пределах  $i$ -го подынтервала. Величины  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  являются априорно неопределенными и могут отличаться друг от друга. Для определенности будем рассматривать случай, когда изменение свойств пуассоновского потока импульсов, связанное с резким увеличением его интенсивности при смене стадий разрушения, может произойти в пределах  $n$ -го подынтервала. В этом случае значение  $\lambda_n$  превосходит средневзвешенное по остальным подынтервалам значение интенсивностей  $\lambda_j$ ,  $j < n$ . Таким образом, сформулируем задачу обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов как задачу проверки сложных статистических гипотез:

$$\begin{aligned} H_0 \sim \lambda_n \leq \gamma \sqrt[n-1]{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i} \quad (\text{изменение свойств потока не произошло}), \\ H_1 \sim \lambda_n > \gamma \sqrt[n-1]{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i} \quad (\text{изменение свойств потока произошло}). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Коэффициент  $\gamma$  в выражении (2.4) показывает, во сколько раз интенсивность  $\lambda_n$  должна превышать среднее геометрическое по остальным подынтервалам значение интенсивности, чтобы можно было уверенно сделать заключение о резком увеличении интенсивности потока и, соответственно, о смене стадий разрушения.

Пусть за время  $\Delta T$  в  $i$ -м подынтервале наблюдаемого процесса зафиксировано  $m_i$  импульсов,  $i = 1, \dots, n$ . Их совместное распределение вероятностей может быть представлено в форме

$$p(m_1, \dots, m_n) = \frac{\exp\left\{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta T\right\} \exp\left\{\sum_{i=1}^n m_i \log(\lambda_i \Delta T)\right\}}{\prod_{i=1}^n m_i!}. \quad (2.5)$$

Преобразуем распределение вероятностей (2.5) к виду, удобному для формулировки и решения задачи обнаружения сигнальной составляющей:

$$\begin{aligned} p(m_1, \dots, m_n) = & \frac{\exp\left\{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta T\right\} \exp\left\{m_n \left[\log(\lambda_n \Delta T) - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \log(\gamma \lambda_i \Delta T)\right]\right\}}{\prod_{i=1}^n m_i!} \times \\ & \times \exp\left\{\sum_{i=1}^{n-1} \log(\lambda_i \Delta T) \left(m_i + \frac{m_n}{n-1}\right)\right\} \exp\{m_n \log(\gamma)\} = \end{aligned}$$

$$= \frac{\exp\left\{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta T\right\}}{\prod_{i=1}^n m_i!} \gamma^{m_n} \exp\left\{m_n \log\left[\frac{\lambda_n}{\gamma\left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i\right)^{\frac{1}{n-1}}}\right] + \sum_{i=1}^{n-1} \left(m_i + \frac{m_n}{n-1}\right) \log(\lambda_i \Delta T)\right\}. \quad (2.6)$$

Распределение (2.6) характеризуется одномерным полезным параметром

$$\vartheta = \log\left(\frac{\lambda_n}{\gamma_n^{n-1} \sqrt[n-1]{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i}}\right) \text{ и } (n-1)\text{-мерным мешающим параметром } \mu = \{\mu_1, \dots, \mu_{n-1}\},$$

$\mu_i = \log(\lambda_i \Delta T)$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ . Задача (2.4) обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов может быть сформулирована как задача проверки сложных статистических гипотез относительно параметров распределения вероятностей (2.6):

$$\begin{aligned} H_0 &\sim \vartheta \leq 0, \mu_i \in (-\infty, +\infty), \\ &i = 1, \dots, n-1 \text{ (изменение свойств потока не произошло)}, \\ H_1 &\sim \vartheta > 0, \mu_i \in (-\infty, +\infty), \\ &i = 1, \dots, n-1 \text{ (изменение свойств потока произошло)}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

### 2.2.2. Синтез алгоритма обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов

Распределение (2.6) принадлежит экспоненциальному семейству, обладает достаточными статистиками  $U = m_n$  и  $T = \{t_1, \dots, t_{n-1}\}$ ,  $t_i = m_i + \frac{m_n}{n-1}$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ ,

при гипотезе  $H_0$  зависит от  $(n-1)$ -мерного параметра  $\mu$ , область значений которого содержит  $(n-1)$ -мерный интервал, поэтому по теореме о полноте [46] при гипотезе  $H_0$  оно является полным, и функция мощности любого алгоритма непрерывна. Согласно [46], равномерно наиболее мощный (РНМ) несмещенный алгоритм обнаружения совпадает с РНМ-подобным на границе между гипотезой  $H_0$  и альтернативой  $H_1$  алгоритмом, который, в свою очередь, обладает неймановской структурой.

Поскольку распределение (2.6) удовлетворяет условиям теоремы [46], то РНМ-подобный и, следовательно, РНМ-несмещенный алгоритм обнаружения примет вид

$$\varphi(U, T) = \begin{cases} 1, & U > C(\alpha, T), \\ \psi, & U = C(\alpha, T), \\ 0, & U < C(\alpha, T). \end{cases} \quad (2.8)$$

Здесь  $C(\alpha, T)$  — пороговая функция, зависящая от уровня вероятности ложной тревоги  $\alpha$  и достаточной статистики  $T$ ,  $0 \leq \psi \leq 1$ . Пороговая функция  $C(\alpha, T)$  и константа  $\psi$  определяются из уравнения

$$M[\varphi(U, T) | \vartheta = 0, T] = \alpha, \quad (2.9)$$

где  $M[\cdot | \vartheta = 0, T]$  — условное математическое ожидание при  $\vartheta = 0$ .

Для решения уравнения (2.9) необходимо найти условную вероятность

$$p(U | \vartheta = 0, T) = \frac{p(U, T | \vartheta = 0)}{p(T | \vartheta = 0)}. \quad (2.10)$$

Совместное распределение достаточных статистик  $P(U, T)$  можно получить из выражения (2.6), если учесть, что якобиан преобразования  $\{m_1, \dots, m_n\} \rightarrow \{U, T\}$  равен единице, а  $m_n = U$ ,  $m_i = t_i - \frac{U}{n-1}$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ :

$$p(U, T) = \frac{\exp \left\{ -\exp \left[ \vartheta + \frac{\log \gamma}{n-1} + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \exp(\mu_i)}{n-1} \right] - \sum_{i=1}^{n-1} \exp(\mu_i) \right\}}{U! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{U}{n-1} \right)!} \gamma^U \exp \left\{ \vartheta U + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i t_i \right\}. \quad (2.11)$$

Найдем знаменатель в правой части выражения (2.10):

$$p(T | \vartheta = 0) = \sum_D p(U, T | \vartheta = 0), \quad (2.12)$$

где  $D$  — область допустимых значений переменной  $U$ . Суммирование в (2.12) производится по всем  $m_n$  из области  $D$ . Исходя из того, что  $m_k \geq 0$  при любых  $k = 1, \dots, n$ , находим, что область  $D$  задается системой неравенств

$$0 \leq U < (n-1) [\min(t_1, \dots, t_{n-1})]. \quad (2.13)$$

Из (2.11) с учетом (2.12) и (2.13) получаем

$$p(U | \vartheta = 0, T) = \frac{\gamma^U}{U! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{U}{n-1} \right)! \left[ \sum_{k=0}^{(n-1) \min(t_1, \dots, t_{n-1})} \frac{\gamma^k}{k! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{k}{n-1} \right)!} \right]}. \quad (2.14)$$

Подставляя (2.14) в (2.10), получаем уравнение для нахождения пороговой функции  $C(\alpha, T)$ :

$$\frac{\sum_{U=C(\alpha, T)}^{(n-1) \min(t_1, \dots, t_{n-1})} \frac{\gamma^U}{U! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{U}{n-1} \right)!}}{\sum_{k=0}^{(n-1) \min(t_1, \dots, t_{n-1})} \frac{\gamma^k}{k! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{k}{n-1} \right)!}} = \alpha. \quad (2.15)$$

Для нахождения вероятности правильного обнаружения  $\beta$  необходимо найти математическое ожидание решающей функции  $\varphi(U, T) = \varphi(U, t_1, \dots, t_{n-1})$  алгоритма (2.8), используя совместное распределение вероятностей  $P(U, T)$ :

$$\beta = \sum_{t_1=0}^{\infty} \dots \sum_{t_{n-1}=0}^{\infty} \sum_{U=C(\alpha, T)}^{(n-1)\min(t_1, \dots, t_{n-1})} \left\{ \exp \left\{ -\exp \left[ \vartheta + \frac{\log \gamma}{n-1} + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \exp(\mu_i)}{n-1} \right] - \sum_{i=1}^{n-1} \exp(\mu_i) \right\} \times \right. \\ \left. \times \frac{\gamma^U \exp \left\{ \vartheta U + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i t_i \right\}}{U! \prod_{i=1}^{n-1} \left( t_i - \frac{U}{n-1} \right)!} \varphi(U, t_1, \dots, t_{n-1}) \right\}. \quad (2.16)$$

### 2.2.3. Пример реализации алгоритма обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов

В качестве примера рассмотрим обнаружение изменения свойств пуассоновского потока импульсов электромагнитной эмиссии в связи с переходом от стадии накопления микротрещин к стадии их прорастания. Стадия накопления микротрещин характеризуется стационарным потоком импульсов электромагнитной эмиссии, поэтому можно ограничиться случаем  $n = 2$ . Рассмотрим структуру и характеристики алгоритма (2.8) при  $n = 2$  подробнее. Его структура, выраженная через компоненты исходной выборки, имеет вид:

$$\varphi(m_1, m_2) = \begin{cases} 1, & m_2 > C(\alpha, m_1 + m_2), \\ \psi, & m_2 = C(\alpha, m_1 + m_2), \\ 0, & m_2 < C(\alpha, m_1 + m_2). \end{cases} \quad (2.17)$$

Пороговая функция  $C(\alpha, m_1 + m_2)$  и параметр рандомизации  $\psi$  зависят от заданного уровня вероятности ложной тревоги  $\alpha$ , значения суммы  $m_1 + m_2$  и определяются как решение уравнения (2.15), которое при  $n = 2$  имеет вид

$$\sum_{y=C(\alpha, m_1+m_2)+1}^{m_1+m_2} \binom{m_1+m_2}{y} \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right)^y \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)^{m_1+m_2-y} + \psi \binom{m_1+m_2}{C(\alpha, m_1+m_2)} \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right)^{C(\alpha, m_1+m_2)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)^{m_1+m_2-C(\alpha, m_1+m_2)} = \alpha, \quad (2.18)$$

где  $\alpha$  — заданный уровень вероятности ложной тревоги.

Если ограничиться рассмотрением только нерандомизированных алгоритмов обнаружения (положить  $\psi = 0$ ), то для нахождения пороговой функции необходимо решить неравенство

$$\max_{C(\alpha, m_1+m_2)} \sum_{y=C(\alpha, m_1+m_2)+1}^{m_1+m_2} \binom{m_1+m_2}{y} \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right)^y \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)^{m_1+m_2-y} \leq \alpha. \quad (2.19)$$

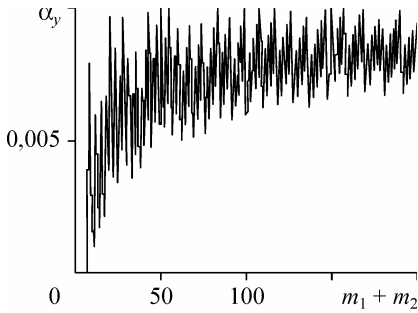


Рис. 2.20. Зависимость условной вероятности ложной тревоги от значения статистики  $m_1 + m_2$  при  $\alpha = 0,01$ ;  $\gamma = 1$  (нерандомизированный алгоритм обнаружения).

Найденная таким образом пороговая функция из-за того, что исходная выборка носит целочисленный характер, приводит к некоторым колебаниям условной вероятности ложной тревоги при изменении значений статистики  $m_1 + m_2$ .

На рис. 2.20 показана зависимость условной вероятности ложной тревоги нерандомизированного алгоритма  $\alpha_y(m_1 + m_2)$  в виде функции от  $m_1 + m_2$  при  $\alpha = 0,01$ ;  $\gamma = 1$ . Подчеркнем, что условная вероятность ложной тревоги зависит только от объема выборки  $m_1 + m_2$ , заданного уровня вероятности ложной тревоги  $\alpha$ , параметра  $\gamma$  и не зависит от параметров распределения исходной выборки  $\lambda_1, \lambda_2$ .

При  $(m_1 + m_2) \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left( \frac{1}{1+\gamma} \right) > 9$  и  $\frac{1}{m_1 + m_2 + 1} < \frac{\gamma}{1+\gamma} < \frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + 1}$  для вычисления

пороговой функции  $C(\alpha, m_1 + m_2)$  и параметра рандомизации  $\psi$  можно воспользоваться аппроксимацией биномиального распределения в (2.17) нормальными со средним  $(m_1 + m_2)[\gamma/(\gamma + 1)]$  и дисперсией  $(m_1 + m_2)[\gamma/(\gamma + 1)][1/(\gamma + 1)]$  [46]:

$$C(\alpha, m_1 + m_2) = \text{int} \left\{ (m_1 + m_2) \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right) + F^{-1}(1-\alpha) \sqrt{(m_1 + m_2) \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)} \right\};$$

$$\alpha - \left\{ 1 - F \left[ \frac{C(\alpha, m_1 + m_2) + 1 - \frac{(m_1 + m_2)\gamma}{1+\gamma}}{\sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\gamma}{(1+\gamma)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)}} \right] \right\}$$

$$\psi \approx \frac{\left( \frac{C(\alpha, m_1 + m_2) + 1 - \frac{(m_1 + m_2)\gamma}{1+\gamma}}{\sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\gamma}{(1+\gamma)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)}} \right) - F \left( \frac{C(\alpha, m_1 + m_2) - \frac{(m_1 + m_2)\gamma}{1+\gamma}}{\sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\gamma}{(1+\gamma)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)}} \right)}{F \left( \frac{C(\alpha, m_1 + m_2) + 1 - \frac{(m_1 + m_2)\gamma}{1+\gamma}}{\sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\gamma}{(1+\gamma)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)}} \right) - F \left( \frac{C(\alpha, m_1 + m_2) - \frac{(m_1 + m_2)\gamma}{1+\gamma}}{\sqrt{\frac{(m_1 + m_2)\gamma}{(1+\gamma)} \left( \frac{1}{1+\gamma} \right)}} \right)}, \quad (2.20)$$

где  $\text{int}\{x\}$  — целая часть числа  $x$ ,  $F^{-1}(1-\alpha)$  — функция, обратная к интегральной функции стандартного нормального распределения вероятностей с нулевым средним и единичной дисперсией.

На рис. 2.21 показана зависимость вероятности правильного обнаружения  $\beta$  алгоритма (2.17), в котором пороговая функция  $C(\alpha, m_1 + m_2)$  и параметр рандомизации  $\psi$  вычисляются в соответствии с выражениями (2.20), от отношения сигнал/шум  $q = \lambda_2 / \lambda_1$  при различных значениях вероятности ложной тревоги и интенсивности шумовой компоненты. Зависимости получены методом имитационного моделирования алгоритма (2.17) на ЭВМ.

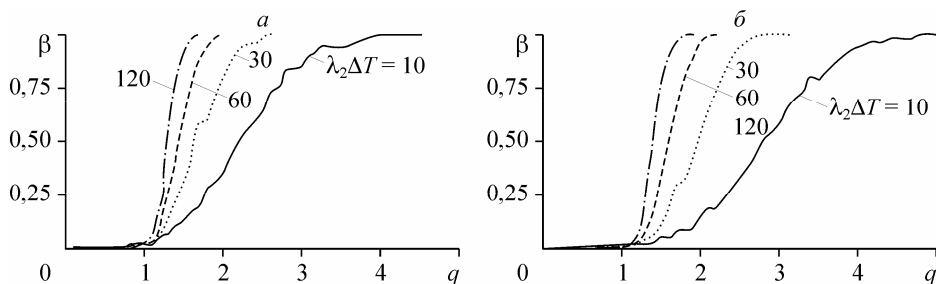


Рис. 2.21. Зависимость вероятности правильного обнаружения  $\beta$  от отношения сигнал/шум  $q$  при вероятности ложной тревоги  $\alpha = 0,01$  (а) и  $\alpha = 0,001$  (б) при различных значениях интенсивности шума  $\lambda_2\Delta T$ .

Из рис. 2.21 видно, что вероятность правильного обнаружения алгоритма (2.17) зависит не только от отношения сигнал/шум, но и от интенсивности шума. Вероятность ложной тревоги (на рис. 2.21 область  $q \leq 1$ ) при этом не превосходит заданного уровня  $\alpha$ .

Таким образом, разработанный алгоритм обнаружения сигнальной составляющей в нестационарном пуассоновском потоке импульсов неизвестной интенсивности обладает следующими практически важными свойствами:

вероятность ложной тревоги алгоритмов не превосходит наперед заданного значения  $\alpha$  при любых фактических значениях интенсивности компоненты, содержащей сигнальную составляющую. Следовательно, алгоритм автоматически подстраивается под характеристики регистрируемого процесса;

структура решающих функций алгоритмов не зависит от фактических значений  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , т. е. они структурно устойчивы. Это свойство особенно важно при реализации в автоматических системах обнаружения сигналов;

вероятность правильного обнаружения алгоритмов максимальна в классе всех несмещенных алгоритмов при любых значениях параметра  $q$ .

Результаты практического применения разработанного алгоритма показали хорошую (удовлетворительную) сходимость с экспериментальными данными и показали, что он может быть использован при анализе обнаружения сигнальной составляющей в нестационарном пуассоновском потоке импульсов неизвестной интенсивности.

### 2.3. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В КАРЬЕРЕ «ЛОЖОК» И В ОТБИТОЙ МАССОВЫМ ВЗРЫВОМ ГОРНОЙ ПОРОДЕ

Карьер «Ложок» ведет добычу известняка открытым способом с буровзрывной отбойкой. Скважины диаметром 300 мм бурят рядами параллельно бортам ранее вынутого слоя. Глубина скважин 6 м. При массовых взрывах расходуется до 10—12 т взрывчатого вещества (ВВ), что в удельном выражении составляет 0,1—0,3 кг на тонну отбитой руды. Взрывы производятся с периодичностью от недели до месяца. Пониженный расход ВВ связан с ослаблением массива при выемке предыдущих слоев и относительно малой высотой отбиваемых слоев.

Исследования в карьере «Ложок» включали изучение особенностей электромагнитных полей в пределах карьера и электромагнитного излучения массива отбитой горной массы и скважин, пробуренных в борту карьера. В борт карьера на высоте 1,5 м от почвы пробурены две измерительные скважины диаметром 110 мм и длиной 4,0 м. Расстояние между скважинами 0,4 м. В одной из скважин размещался прибор ЗЭМИ-1 (зонд скважинный для регистрации электромагнитного излучения в скважинах). Зонд состоит из диэлектрической штанги длиной 1,7 м и 4,0 м, на удаленном конце которой закреплен датчик-антенна для приема электромагнитного излучения стенок скважины, а со стороны устья скважины — регистратор ЭМИ типа РЭМИ-2. Датчик представляет собой полый цилиндр из диэлектрического материала диаметром 40 мм и длиной 300 мм, в осевой полости которого размещена емкостная цилиндрическая антенна, выполненная из трех металлических колец, соединенных резисторами с высоким сопротивлением, размещенными под углом 120°, и инструментальный усилитель. Сигнал с антенны по экранированному проводу поступает на регистратор РЭМИ-2, который снабжен световым и звуковым сигнализаторами и жидкокристаллическим цифровым табло.

Серийный прибор РЭМИ-2 снабжен магнитной антенной в составе двух катушек, расположенных под углом 90° относительно друг друга. Катушки в приборе ЗЭМИ-1 были отключены, и к электронной схеме прибора была подключена через экранированный провод емкостная антенна приемного устройства. В ряде экспериментов вместо емкостной антенны использовалась магнитная, размещаемая в таком же цилиндрическом корпусе. Антенный блок собран по дифференциальной схеме, что обеспечивало повышение выходного сигнала в два раза и снижение помех. Зонд ЗЭМИ-1 был тарирован в стандартном поле с использованием специального устройства из двух колец Гельмгольца.

План карьера и расположение измерительных станций приведены на рис. 2.22. Большими «звездами» отмечены участки массовых взрывов. Некоторые результаты измерений с использованием упомянутого зонда при исследованиях в карьере «Ложок» приведены в табл. 2.8. Сведения приведены в условных единицах показаний прибора, которые прямо пропорциональны напряженности ЭМИ.

Исследование ЭМИ отбитой взрывом горной массы (табл. 2.9) выполнены прибором ИЭМИ-1. Интенсивность ЭМИ на различных участках отбитой горной массы колебалась, но не выходила за указанные в таблице пределы. Интенсивность ЭМИ в зоне отбитой горной массы превышала фоновое ЭМИ в карьере до массового взрыва. Измерения были повторены при нескольких массовых взрывах (см. рис. 2.22).

Проведены исследования интенсивности ЭМИ на отдельных участках дна карьера. Измерения выполнялись в пределах локальных площадок размером не более  $0,3 \times 0,3$  м. Прибор ИЭМИ-1 в процессе измерения укладывался на исследуемую поверхность. Выбранный локальный участок разделялся двумя координатными осями на четыре октанта. В каждом октанте прибор укладывался с поворотом на 90° вдоль одной оси и вдоль второй оси.

Измерения по площади карьера показали, что интенсивность электромагнитного излучения изменяется по локальным участкам, отстоящим один от другого на 2—4 м (ст. 1, ст. 3, ст. 4).

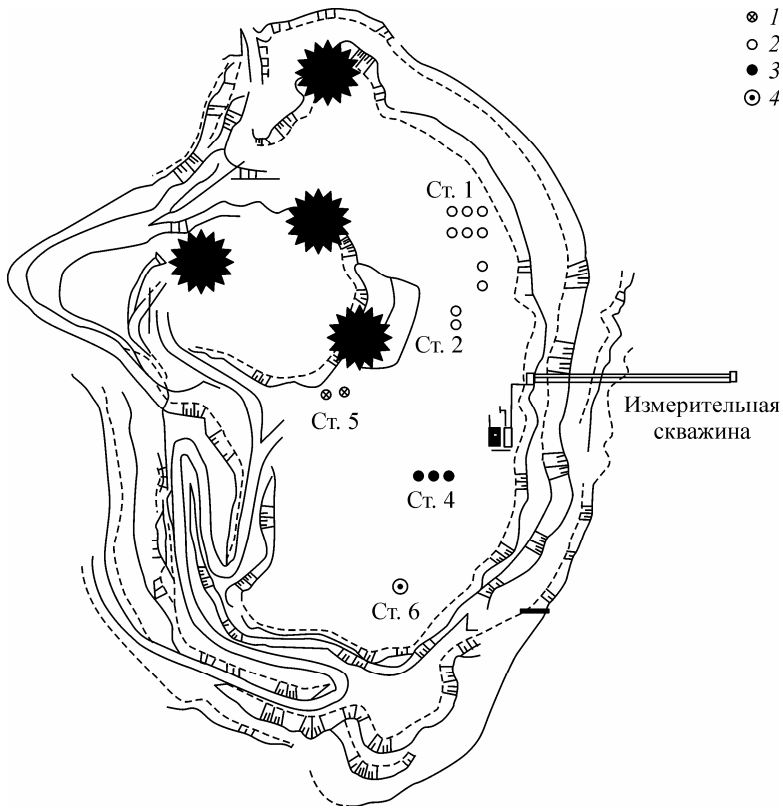


Рис. 2.22. Схема экспериментов по измерениям электромагнитного излучения в карьере с июля 2006 по апрель 2007 гг.

1 — измерение ЭМИ в зоне отбитой породы; 2 — измерение ЭМИ прибором ИЭМИ-1;  
3 — измерение ЭМИ зондом; 4 — измерение ЭМИ в отбитом блоке 1,8 м<sup>3</sup>.

**Пример.** Три точки измерения по одной линии. Прибор ИЭМИ-1 № 22. 16.03.07:

Т. 1	Т. 2	Т. 3
308—310—309	293—293—293	302—314—305

Расстояние между точками замера не более 3—4 м, но показания по отсчетам существенно различаются. Направления максимумов в точках разные, практически — случайные. Таких замеров выполнено десятки, особенно в летний период.

**Возможная гипотеза.** Структура излучателей по почве карьера различна, что обуславливает неоднородную интенсивность излучения. Почва деформировалась в процессе массовых взрывов. Это обусловило зональность расположения трещин, зональность сформировавшихся структурных блоков и зональность сложившихся между ними сил взаимодействия. Соответственно, имеют зонную структуру и поля напряжений в породах дна карьера. Если вертикальная компонента напряжений вблизи поверхности дна карьера нулевая, то горизонтальные компоненты имеют зонную структуру в соответствии со структурой пород дна карьера. Порождаемое развитием трещин ЭМИ отражает особенность поля напряжений.



Таблица 2.8  
Сведения по измерению ЭМИ в карьере «Ложок»

Дата, время	Место измерения	Отсчет по табло прибора, отн. ед.	Примечание
26.01.07 13 <sup>00</sup> —13 <sup>30</sup>	Устье скважины; емкостная антенна	293—287—309 292—306—314 292—294 292—294	Замеры выполнены через два часа после массового взрыва
14 <sup>00</sup> —14 <sup>30</sup>	То же	305—305—293 293	Стабилизация
15 <sup>00</sup> —15 <sup>30</sup>	То же	293—294 299—303—309 298—309—299—309 298—303—309—311	
16.03.07	То же	308—310	
16.03.07	Магнитная антенна	120 138—139—140 129	Измерение в скважине до взрыва
22.06.06	После взрыва	88—94 77—82—84 77—82—84	Измерение в устье скважины прибором ИЭМИ-1 № 15
10 <sup>30</sup>	До взрыва	91—86—80	
15 <sup>00</sup>	После взрыва	84—88—90	

Таблица 2.9  
Электромагнитное излучение в зоне отбитой горной массы

Дата, время	Место измерения	Отсчеты по табло прибора, отн. ед.	Примечание
16.06.06 13 <sup>00</sup> —14 <sup>00</sup>	Измерения выполнены в скважинах, пробуренных в борту карьера, до массового взрыва	82—85 82—84	Прибор ИЭМИ-1 № 15
15 <sup>00</sup>		После взрыва у отвала отбитой породы	
22.06.06 10 <sup>30</sup> 13 <sup>00</sup>	До взрыва	91—86—80 84—88—90	Колебания общего фона ЭМИ после взрыва при измерениях в течение 5—10 минут
	После взрыва через 2—3 часа на расстоянии от отвала отбитой массы 5—10 м	Фон 75—77—81—82— 84—86—91	
		75—77—81—86— 91—92	

В углублениях в отбитой горной массе на глубине до 2—3 м заметного повышения ЭМИ не зафиксировано. Повышенный фон ЭМИ в зоне отбитой массивом взрывом породы фиксируется и через несколько суток. Механизм формирования ЭМИ в этих случаях не достаточно ясен. Возможны пути формирования ЭМИ в отвалах за счет: а) трещинообразования в кусках и блоках отбитой горной массы; б) процессов релаксации напряжений в сформировавшихся блоках; в) проникновения ЭМИ из более глубоких слоев пород, подстилающих слой отбитой породы; г) трибоэффекта — трения кусков породы в процессе уплотнения отбитых пород.

По мере накопления опыта измерений и количества замеров, была принята следующая схема измерений и записи результатов замеров. На выбранной площадке прибор ориентировался по направлениям С—Ю и З—В. В блокноте рисовалась прямоугольная система координат. На схемах приведены выбранные оси координат, цифрами отмечены отсчеты по табло прибора в условных единицах.

На схеме 1 (рис. 2.23) отсчеты вдоль горизонтальной оси заметно ниже, чем вдоль вертикальной оси, на схеме 2 (рис. 2.24) отсчеты по обеим осям примерно оди-

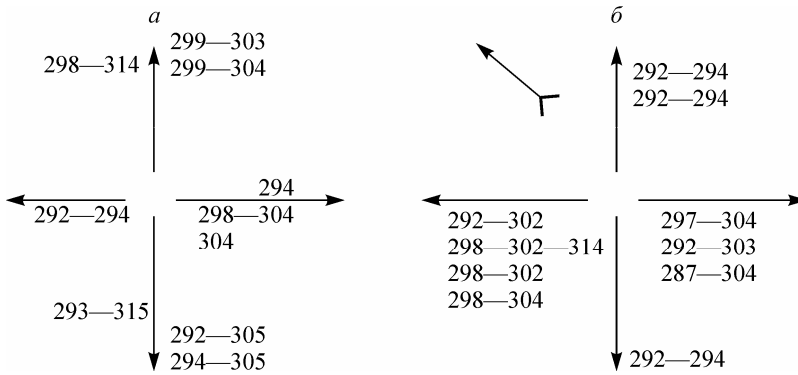


Рис. 2.23. Измерение сигналов ЭМИ в локальном участке карьера «Ложок».

Замерная точка № 1: а — до взрыва; б — после взрыва.

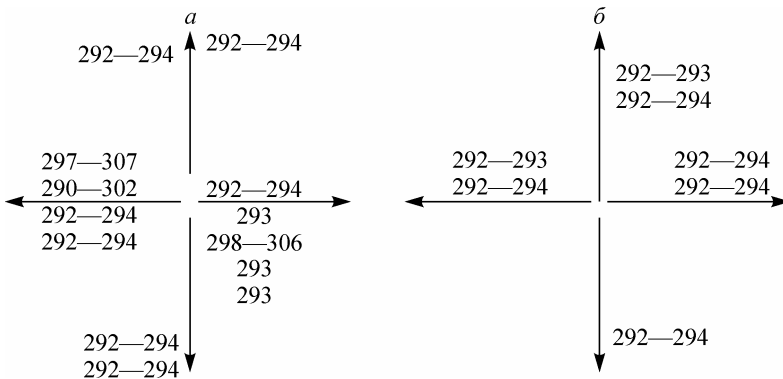


Рис. 2.24. Измерение сигналов ЭМИ в локальном участке карьера «Ложок».

Замерная точка № 3: а — до взрыва; б — после взрыва.

наковы. Прибор при измерениях ориентировался параллельно оси и строго по ее направлению. При повороте прибора на  $180^\circ$  в ряде случаев заметно изменялся отсчет по прибору.

После взрыва направление ориентации и величины максимальной напряженности ЭМИ в замерных точках существенно изменились, а в случае на рис. 2.24 из неоднородного по горизонтальной оси они стали однородными по всем направлениям. Вывод здесь очевиден — динамические воздействия на массив дна карьера изменяют структуру массива и полей напряжений в породах, и, соответственно, изменяются параметры электромагнитного излучения в локальных точках массива, что прибор и фиксирует.

Из приведенных схем видно, что интенсивность излучения в разных направлениях изменяется. В ряде участков карьера максимальная интенсивность ЭМИ ориентирована в субмеридиональном направлении. Глыбы породы размером до  $1\text{--}2\text{ м}^3$  также в ряде случаев давали электромагнитное излучение, обычно небольшой интенсивности, причиной которого, вероятно, являются температурные колебания и релаксация остаточных напряжений (ст. 6).

На интенсивность фонового ЭМИ в карьере влияют не только излучения вмещающих пород, бортов и дна карьера, но также наличие различных электрических аппаратов: линии электропередачи к работающим установкам, электроприводы буровых станков и т. п. Как показывают измерения, интенсивность фонового ЭМИ в карьере зависит от сезонов года, состояния погоды, времени суток. В частности, зафиксировано повышение фонового ЭМИ во время дождя.

Некоторые результаты измерения ЭМИ в скважинах в борту карьера с использованием скважинного зонда приведены на рис. 2.25. Измерения выполнены с использованием конденсаторной и магнитной антенн. Графики отражают изменение фонового ЭМИ в скважине на протяжении двух лет. Включены показания прибора, которые снимались до очередного массового взрыва. Изменение напряженности электромагнитного поля в скважине колебалось в пределах от 20 до 200 отн. ед., т. е. в 10 раз. Максимумы графиков приурочены к зимнему периоду.

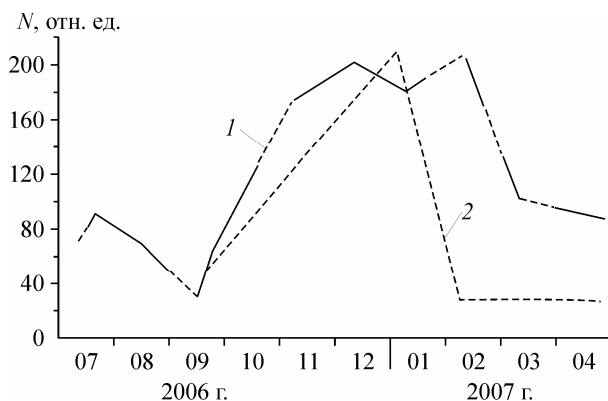


Рис. 2.25. Графики изменения во времени сигнала ЭМИ в скважине.

1 — конденсаторная антенна; 2 — магнитная антенна.

Итак, экспериментальные исследования электромагнитного излучения массива горных пород в чаше карьера позволили изучить ряд особенностей фонового ЭМИ в карьере:

установлено, что под влиянием массовых взрывов по отбойке горной массы на карьере изменяется интенсивность фонового ЭМИ в скважинах, пробуренных в бортах карьера;

установлено зональное распределение интенсивности фонового ЭМИ в придонной части карьера, что связано, в частности, с зональной структурой поверхности дна карьера, формирующейся под воздействием напряжений, возникающих в массиве в процессе массовых взрывов;

ЭМИ в зоне отвала отбитой массивным взрывом горной породы всегда превышает фоновое ЭМИ в чаше карьера. Наиболее интенсивное ЭМИ наблюдается в первые часы после массового взрыва. В последующем его интенсивность постепенно снижается до уровня первоначального фонового ЭМИ. Процесс такой стабилизации ЭМИ в зонах отбитой горной породы может продолжаться несколько суток;

ориентация полей ЭМИ вблизи поверхностного слоя дна карьера носит зонный характер и различна в соседних локальных участках, что обусловлено изменением структуры массива под воздействием сил массового взрыва.

Измерение ЭМИ по почве карьера и в скважинах, пробуренных в бортах карьера, позволяет судить об изменениях структуры массива горных пород. При этом метод регистрации ЭМИ в скважинах отличается простотой, достоверностью получаемых результатов и рекомендуется к широкому использованию.

Промышленное использование разработанного в ИГД СО РАН скважинного зонда ЗЭМИ-1 показало простоту прибора и его полезность при измерениях ЭМИ в скважинах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993.
2. *Поиск электромагнитных предвестников землетрясений /* Под ред. Гохберга М. Б. — М.: ИЗЗ АН СССР, 1988.
3. *Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Добровольский И. П.* Источники электромагнитных предвестников землетрясений // Докл. АН СССР. — 1980. — Т. 250, № 1.
4. *Соболев Г. А.* Предвестники землетрясений в условиях лабораторного эксперимента // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1980. — № 12.
5. *Соболев Г. А., Демин В. М.* Кинетика электромагнитного и акустического излучений как предвестник неустойчивости контактов блоков // Докл. АН СССР. — 1988. — Т. 303, № 4.
6. *Куксенко В. С., Мансуров В. А.* Локализация разрушения в горных породах на разных масштабных уровнях // ФТПРПИ. — 1986. — № 3.
7. *Мирошниченко М. И., Куксенко В. С.* Излучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // ФТТ. — 1980. — Т. 22, вып. 5.
8. *Куксенко В. С., Томлин Н. Г., Ма Лип и др.* Электростатические явления при деформировании горных пород // Материалы I Межд. школы-семинара. — Красноярск, 2002.
9. *Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. Ц. и др.* Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // ФТПРПИ. — 1987. — № 1.
10. *Гуфельд И. Л., Никифорова Н. Н., Яковицкая Г. Е. и др.* Характеристики источников электромагнитного излучения в массиве горных пород // Напряженно-деформированное

- состояние массивов горных пород. Сб. научн. тр. / ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1988.
11. *Гуфельд И. Л., Рожной А. А., Никифорова Н. Н. и др.* Спектрально-временные характеристики электромагнитного излучения и токов в образце на стадии его разрушения // Там же.
  12. *Курлень М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В.* Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, СИФ РАН, 2001.
  13. *Егоров П. В., Иванов В. В., Колпакова Л. А.* О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 1.
  14. *Егоров П. В., Иванов В. В., Колпакова Л. А., Пимонов А. Г.* Динамика трещин и электромагнитное излучение горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 5.
  15. *Егоров П. В., Колпакова Л. А., Бабенко А. В., Торгаев С. А.* Исследование изменения форм сигналов импульсного электромагнитного излучения при деформировании твердых материалов с различной структурой // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2004. — № 2 (39).
  16. *Егоров П. В., Колпакова Л. А., Мальшин А. А., Бабенко А. В.* Изучение зависимости параметров импульсного электромагнитного излучения от размера структурной неоднородности твердого материала // Там же. — 2002. — № 2.
  17. *Воробьев А. А., Завадовская Е. К., Сальников В. Н.* Изменение электропроводимости и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // Докл. АН СССР. — 1975. — Т. 220, № 1.
  18. *Беспалько А. А., Хорсов Н. Н.* Аппаратурный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в шахтах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Тр. Межд. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
  19. *Гольд Р. М., Яворович Л. В., Матов Ш. Р. и др.* Оценка НДС пород на Таштагольском месторождении и тоннелях БАМ экспрессным электромагнитным методом // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. Сб. научн. тр. / ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1985.
  20. *Беспалько А. А., Гольд Р. М., Яворович Л. В., Дацко Д. И.* Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // ФТПРПИ. — 2003. — № 2.
  21. *Беспалько А. А., Гольд Р. М., Яворович Л. В., Дацко Д. И.* Влияние текстурных особенностей образцов алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении // Там же. — 2002. — № 2.
  22. *Иванов В. В., Егоров П. В., Колпакова Л. А., Пимонов А. Г.* Динамика трещин и электромагнитное излучение горных пород // Там же. — 1988. — № 5.
  23. *Урусовская А. А.* Электрические эффекты, связанные с пластическими деформациями ионных кристаллов // Успехи физических наук. — 1968. — Т. 96, вып. 1.
  24. *Bredy V. T., Glen F. Rowell.* Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture // Nature. — 1986. — V. 321, N 6069.
  25. *Эйби Дж. А.* Землетрясения. — М.: Мир, 1986.
  26. *Уруцкоев Л. И.* О возможном механизме землетрясений // Прикладная физика. — 2000. — № 4.
  27. *Соболев Г. А., Пономарев А. В.* Физика землетрясений и предвестники. — М.: Наука, 2003.
  28. *Рикитаке Т.* Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1978.
  29. *Курлень М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е.* О структуре сигналов электромагнитного излучения и связанных с ними актов разрушения образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2000. — № 1.

30. Трапезников Ю. А., Манжиков Б. Ц., Богомолов Л. М. Амплитудные спектры акустической эмиссии при ступенчатом нагружении горных пород // Вулканология и сейсмология. — 2000. — № 2.
31. Курлень М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
32. Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Статистические характеристики сигналов электромагнитного излучения / Геодинамика и напряженное состояние земных недр / ИГД СО РАН. — Новосибирск, 1999.
33. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. Садовского М. А. — М.: Наука, 1982.
34. Алексеев А. С., Аксенов В. В. Об электрическом поле в очаговой зоне землетрясений // Докл. РАН. — 2003. — Т. 392, № 1.
35. Садовский М. А., Соболев Г. А., Мигунов М. И. Изменение естественного излучения радиоволн при сильном землетрясении в Карпатах // Докл. АН СССР. — 1979. — Т. 224, № 2.
36. Соболев Г. А., Тюпкин Ю. С. Анализ процесса выделения энергии при формировании магистрального разрыва в лабораторных исследованиях по разрушению горных пород и перед сильными землетрясениями // Физика Земли. — 2000. — № 2.
37. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения в 2003 г. Ч. III: Рудник «Таймырский» // ФТПРПИ. — 2004. — № 6.
38. Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Прогноз разрушения горных пород на основе особенностей спектрально-временных характеристик сигналов электромагнитного излучения // ПМТФ. — 1995. — № 6.
39. Куксенко В. С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1986.
40. Хатиаишвили Н. Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галоидных кристаллах и горных породах // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1984. — № 9.
41. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А. и др. О прогнозировании разрушения горных пород // Там же. — 1977. — № 6.
42. Разников В. В., Разникова М. О. Информационно-аналитическая масс-спектрометрия. — М.: Наука, 1991.
43. Алексеев Д. В., Егоров П. В., Иванов В. В. и др. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород // ФТПРПИ. — 1993. — № 5.
44. Разрушение. Т. 2 / Под ред. Г. Либовиц. — М.: Мир, 1975.
45. Курлень М. В., Вострецов А. Г., Яковицкая Г. Е. Об одной модели сигналов электромагнитного излучения нагруженных горных пород // ФТПРПИ. — 1996. — № 3.
46. Леман Э. Проверка статистических гипотез / Пер. с англ. Ю. В. Прохорова. — М.: Наука, 1979.
47. Богданович В. А., Вострецов А. Г., Пономаренко Б. В. Оценивание временного положения пакета импульсов с учетом рассеяния сигнала // Радиотехника. — 2006. — № 6.
48. Вострецов А. Г., Павлов А. С. Обнаружение сигнала от быстродвижущегося источника при наличии мешающих отражений от подстилающей поверхности // Докл. Академии наук высшей школы России. — 2008. — № 1(10).
49. Абегауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. — М.: Воениздат, 1970.
50. Курлень М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. — Ч. I. — 1999. — № 3; Ч. II. — 2000. — № 4.

51. *Опарин В. Н., Балмашинова Е. Г., Востриков В. И.* О динамическом поведении напряженных блочных сред. Ч. II // ФТПРПИ. — 2001. — № 5.
52. *Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашинова Е. Г.* О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // Там же. — 1998. — № 5.
53. *Мусхелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966.
54. *Грицко Г. И., Власенко Б. В.* Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980.
55. *Миренков В. Е., Шутов В. А.* Аналитические вопросы механики разрушения. — Новосибирск: Изд-во НарХИ, 1996.
56. *Юшкин В. Ф., Опарин В. Н., Жигалкин В. М. и др.* Особенности разрушения одномерной модели блочных сред при длительном одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2002. — № 4.

## Глава 3

### **РАЗВИТИЕ ОСНОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УКРАИНЫ**

Проблема оценки и контроля напряженно-деформированного состояния горного массива с учетом газодинамических явлений важна и актуальна для всех стран с развитой горно-добывающей промышленностью. Изучение условий формирования геодинамических процессов в горном массиве при отработке полезных ископаемых, создание диагностических систем и прогнозных критериев их развития — актуальные задачи наук о Земле.

Постоянный рост интенсивности техногенного воздействия на геосреду при разработке полезных ископаемых с возрастанием глубины проникновения в земную толщу и соответствующим усложнением геологического и тектонического строения горного массива предопределяет активизацию энергообменных и деформационных процессов в породных структурах, высокий уровень напряженности, возникающий в массиве горных пород, может приводить к выходу накопленной потенциальной энергии в виде быстро протекающих динамических процессов (горных ударов, газодинамических явлений и масштабных обрушений пород) и в результате — к нарушению технологического процесса, разрушению горных выработок и нередко к аварийным ситуациям с человеческими жертвами. Например, на угольных шахтах Донбасса происходит до 150 газодинамических явлений и до 130 завалов горных выработок в год.

Неоднозначность протекания геомеханических процессов, связанная со сложным блочно-иерархическим строением горного массива, геологической многофакторностью (структурная, литологическая, тектоническая анизотропия углевмещающих толщ) и влиянием горно-технологических условий, в частности, на газодинамические проявления, предопределяет необходимость постоянного мониторинга геодинамического состояния горного массива в области очистных работ.

Проблема создания мониторинговых систем, ориентированных на прогнозирование катастрофических природных и техногенных явлений, особенно актуальна при отработке месторождений, находящихся в геодинамически активных регионах с высокой концентрацией шахт и рудников, в условиях больших глубин со сложным геологическим строением породных массивов, а также в густонаселенных регионах, характеризующихся высокой степенью подработки. В данной проблеме представляют интерес следующие направления:

изучение сейсмоопасности региона в целом с учетом его геологического строения, особенностей сейсмических проявлений; создание методов и средств прогнозирования и мониторинга сейсмических процессов;



изучение проявлений горных ударов, газодинамических и других процессов, вызванных обработкой месторождений полезных ископаемых на больших глубинах с учетом геологического строения разрабатываемой толщи пород; разработка теоретических и методических основ прогноза горных ударов и газодинамических проявлений (ГДЯ) при обработке угольных пластов.

По первому направлению исследования были ограничены изучением сейсмопасности на территории Украины, базируясь, в основном, на результатах работ последнего времени [1—9]. По второму — рассмотрены особенности проявлений горных ударов, газодинамических и других процессов на угольных шахтах как России, так и Украины. Особое внимание уделено Донецкому региону.

Современный опыт показывает, что объективная оценка особенностей формирования и развития процессов перераспределения напряжений в горном массиве с учетом большого диапазона глубин обработки полезных ископаемых и необходимости контроля значительных территорий возможна на основе использования динамических и кинематических показателей искусственных и естественных упругих волновых полей. Насыщенная параметризация сейсмических волн позволяет не только контролировать изменение полей напряжений в горном массиве, но и устанавливать тенденции формирования условий и областей возможных геодинамических проявлений.

В проведенных в рамках настоящего интеграционного проекта исследованиях было изучено влияние напряженно-деформированного состояния подрабатываемого массива на динамические параметры сигнала при активном сейсмическом зондировании геосреды. Результаты свидетельствуют о перспективности выбранного направления исследований и о возможности объективного и достоверного (по совокупности ряда динамических параметров) диагностического контроля и прогностической оценки трансформации во времени геомеханической ситуации подрабатываемого массива. Показано, что сейсмическое зондирование позволяет не только оценивать изменение полей напряжений в горном массиве, но и устанавливать тенденции формирования областей возможных геодинамических проявлений.

Результаты натуральных исследований низкочастотных сейсмодеоформационных событий, инициируемых собственными изгибными колебаниями консольной части пород над отработанным участком угольного пласта, подтверждают обоснованность предложенной геомеханической концепции формирования условий опасной геодинамической ситуации в подрабатываемом массиве. Параметры зафиксированных низкочастотных сейсмических событий (спектральные характеристики и энергетические показатели) в достаточной степени информативны в отношении геомеханического состояния породной толщи.

### **3.1. Сейсмопасность в Украине, методы и средства прогнозирования и мониторинга сейсмических явлений**

Изучение сейсмической опасности в Украине связано с территориями, находящимися в так называемых высокосейсмичных районах, ограниченных границами тектонических плит, горами и предгорной впадиной. Получаемая сейсмологическая информация подтверждает, что недра древних платформ, бывших ранее

сейсмически активными, также подпадают под влияние современных деформационных процессов, но в меньшей мере, чем их границы.

Сейсмоопасность территорий Украины, вызванная природными причинами, определяется ее непосредственной близостью на юго-западе и юге к мощному Средиземноморско-альпийскому складчатому сейсмически активному поясу. Его активность (выделяется около 15 % всей мировой энергии землетрясений) вызвана столкновением больших тектонических мегаплит: Евразийской, Африканской и Арабской, а также сформированных между ними меньших Анатолийской и Черноморской субплит [1]. Направление движения Анатолийской субплиты и ее ближайшего окружения имеет западную и юго-западную ориентацию, Евразийской мегаплиты — северо-восточную. Напряжения, которые скапливаются здесь на границах плит и на отдельных блоках земной коры, постоянно проявляются в движущихся оползнях и в землетрясениях разной силы — вплоть до максимально возможной для данного региона.

В целом сейсмоопасность территории Украины определяется как глобальной, так и локальной тектонической активностью, связанной со сложным нарушением напряженно-деформированного состояния тектонических структур. Самыми опасными районами являются Крым, Карпаты и юго-западные области Украины.

На территории Украины сейсмические эффекты землетрясений наблюдались в основном от зоны сейсмичности Вранча, которая расположена на остром изгибе горной дуги, где проходит сочленение Восточных Карпат с Западными на румынской территории. Последние сильные землетрясения происходили здесь в 1940, 1977, 1986 и 1990 гг. В Румынии и соседней Молдове они повлекли за собой существенный материальный ущерб, а землетрясения 1940 и 1977 гг. привели к человеческим жертвам.

Исследования, проведенные в Институте геофизики НАН Украины, показали, что интенсивность сейсмических толчков варьирует от 7—8 баллов на юго-западе Одесской области до 3—4 баллов в северо-восточных областях Украины [1]. Аномальное уменьшение сейсмической активности наблюдалось также в западных областях Украины. В частности, несмотря на близость зоны Вранча, в Транскарпатах толчки при сильных землетрясениях от этой зоны не превышают 4 баллов. В целом, приблизительно 40 % территории Украины может быть охвачено прямым влиянием опасных сейсмических событий, а 70 % ее территории — общим влиянием землетрясений с подтоплением, оползнями и другими инженерно-геологическими процессами, влияющими на устойчивость строений [1].

Одна из проблемных территорий Украины — Донецкий угольный бассейн, где сконцентрировано более половины угледобывающих шахт Донбасса. Отработка угольных пластов приводит к выводу из состояния равновесия геологических структур углевмещающей толщи, вызывая оседания земной поверхности, техногенные землетрясения локального характера, оползни и иные явления [4–9]. Кроме того, возникающие динамические явления, горно-технические и горные удары, газодинамические явления приводят к нарушению технологических процессов выемки полезного ископаемого, снижают безопасность ведения горных работ, приводят к человеческим жертвам.

Проблема техногенной сейсмичности актуальна для многих стран с развитой горно-добывающей промышленностью. Об этом свидетельствуют материалы ряда

международных симпозиумов по техногенной сейсмичности (1982, 2001 гг. — Йоханнесбург; 1988 г. — Миннеаполис; 1993 г. — Краков; 2004 г. — Апатиты; 2005 г. — Австралия и др.). По данным акад. В. И. Осипова (2004 г.), в 1990—1994 гг. ежегодное среднее количество техногенных катастроф возросло по сравнению с периодом 1965—1969 гг. почти в три раза.

Техногенная сейсмичность проявляется при взаимодействии человека с земной корой. Она многообразна: возникает при горных работах, при заполнении водохранилищ, при проведении подземных ядерных взрывов и т. п. По уровню она изменяется от слабых толчков до катастрофических техногенных землетрясений. Потому техногенная сейсмичность является важным объектом исследований не только сейсмологов, но и специалистов горного дела, гидростроителей, разработчиков нефти и газа, строителей наземных и подземных сооружений.

Применительно к Донецкому угольному бассейну основной задачей в решении этой проблемы должно быть [4, 7, 9]:

- 1) изучение изменений геологической среды при проведении горных работ с учетом возникающих напряжений и деформаций;
- 2) поиск эффективных критериев и диагностика предельных состояний породных массивов и отдельных их участков, разработка соответствующих прогнозных методик;
- 3) разработка способов обеспечения адаптивного развития горно-технических объектов в экстремальных горно-геологических и горно-технических условиях.

Как показал опыт применения локальных сетей сейсмостанций непрерывного контроля за удароопасностью массивов горных пород, в достаточной мере надежный прогноз негативных проявлений горного давления возможен лишь на основе комплексного применения геофизических и геомеханических методов контроля деформационно-волновых процессов в напряженных геосредах. Накопленные за 15 лет экспериментальные данные свидетельствуют о том, что геодинамические характеристики месторождений полезных ископаемых определяются как глобальными геофизическими ритмами, так и региональными и локальными геомеханическими процессами, связанными с отработкой месторождений. Это свидетельствует о том, что на стратегию построения автоматизированных систем геодинамической безопасности на шахтах следует смотреть также и с позиций их готовности к включению в глобальные системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений [1].

В Украине государственная сеть сейсмических станций (рис. 3.1) начала формироваться с конца XIX в. и сейчас работает при Национальной академии наук Украины (НАНУ). Кроме сейсмологических датчиков на геофизических станциях установлены магнетометры, тензометры, метеорологические датчики и некоторые другие приборы. Они позволяют привлекать для решения задач геодинамического мониторинга не только сейсмологические данные, но также тесно связанные с ними флуктуации других геофизических полей. К цифровой сейсмостанции «Киев-IRIS», оснащенной сейсмографами американского производства IRIS-2, в последнее время добавлено несколько сейсмостанций «Львов». «Симферополь» и «Dimer», оснащенных английской аппаратурой GURALP; девять сейсмостанций в Карпатской области оснащены цифровой аппаратурой ЦАС-03 собственного производства. Две сейсмостанции в Крыму — «Севастополь» и «Ялта» и еще две



Рис. 3.1. Схема расположения сейсмических и геофизических станций НАНУ [1].

сейсмостанции «Остров Змеиный» и «Имово-Днестровск» оборудованы цифровой аппаратурой российского производства [1, 3].

Сейсмология обладает достаточно мощным арсеналом вычислительных методов. Однако необходимо отметить, что в настоящее время наиболее надежный прогноз параметров толчков может быть точным только на основе непосредственных наблюдений. К сожалению, для осуществления этой цели сейсмологическая сеть на территории Украины не достаточно пространная. Она в состоянии достоверно контролировать сейсмичность только для района Карпат и Крыма, где станции сосредоточены сравнительно густо, и может регистрировать сейсмические события, начиная с седьмого балла мощности.

Усовершенствование сети сейсмологических наблюдений НАНУ осуществляется в двух направлениях: увеличением числа станций и переоборудованием уже существующих станций современной аппаратурой. С началом прямого финансирования сейсмических наблюдений через НАНУ появились предпосылки для технического оснащения сети сейсмических наблюдений. Ведущее место в этом процессе имеет Институт геофизики НАН Украины, где разрабатываются и внедряются в практику режимных сейсмологических наблюдений современные цифровые сейсмостанции ЦАС-04. Автором этой аппаратуры является д-р Сергей Вербицкий. ЦАС-04 по своим основным параметрам не уступает лучшим мировым аналогам, в то же время, ее стоимость меньше, чем у зарубежной такого же класса.

Важными аспектами современных систем мониторинга землетрясений и горных ударов являются: надежная количественная параметризация сейсмичности; комплексирование материалов сейсмологических наблюдений с данными геофизических и геотехнических методов, расчетами напряженно-деформированного

состояния (НДС). Количественная параметризация сейсмичности подразумевает, прежде всего, независимую оценку силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий, а именно: сейсмической энергии и скаляра/тензора сейсмического момента. Длительное время факту фундаментального различия между данными характеристиками не уделялось должного внимания. В частности, в практике обработки сейсмических материалов широкое распространение получили корреляционные связи между силовыми и деформационными очаговыми параметрами.

Опыт же сейсмологических наблюдений последних десятилетий свидетельствует о том, что отклонения от подобных корреляционных зависимостей как для землетрясений, так и сейсмических событий в шахтах могут достигать двух порядков. Вполне очевидно, что стандартизованная оценка силовых и деформационных характеристик очагов в системах мониторинга шахтной и региональной сейсмичности позволит более корректно проводить интерпретацию сейсмологических данных, а также откроет возможность их более глубокого комплексирования с геолого-геофизическими материалами и расчетами НДС. Наиболее перспективная форма комплексирования предполагает построение моделей участков земной коры или породного массива. Использование в данных моделях сейсмологической информации (параметров очагов сейсмических событий) имеет неоспоримые преимущества в силу ее интегрального характера [7, 8]. Действительно, в отличие от большинства геофизических и геотехнических методов, в которых измерения носят локализованный во времени и в пространстве характер, материалы сейсмологического мониторинга содержат сведения о процессах разрушения и деформирования трехмерных объемов в течение определенных промежутков времени. В силу ряда теоретических и технических сложностей описанные возможности комплексирования материалов сейсмомониторинга используются довольно редко. За рубежом (в частности, в золотодобывающих рудниках ЮАР) есть отдельные примеры комплексного использования геомеханических расчетов и сейсмомониторинга для оценки состояния подрабатываемых массивов.

Совершенно очевидно, что созрели предпосылки для объединения и координации усилий геофизиков и горняков в плане формирования элементов объединенной геомеханико-сейсмологической сети непрерывного контроля на базе соответствующих полигонов с перспективой их расширения и включения в государственные системы прогнозирования природных и техногенных землетрясений. Ясно, что в этом аспекте не обойтись без целенаправленных исследований, связанных с разработкой информационных геологических, геомеханико-геодинамических моделей строения и поведения массивов горных пород при отработке месторождений полезных ископаемых, их методологического наполнения, организации инструментального мониторинга и обеспечения оперативного обмена информацией в пределах многоуровневых систем связи (В. Н. Опарин, 2006).

К настоящему времени сложилось достаточно устойчивое представление о методах и системах сейсмического мониторинга, предназначенных для изучения временных изменений динамических и кинематических характеристик волновых полей. Базовый метод сейсмического мониторинга хорошо проработан и алгоритмизирован, что позволяет находить новые подходы в реализации как собственно метода, так и его аппаратно-программных решений. В геофизике известны и ак-

тивно изучаются нелинейные компоненты динамических характеристик сейсмических и акустических волновых полей. Установлены их корреляционные связи с элементами кинематических параметров. Например, зависимость коэффициента затухания от частоты исследуемого сигнала, от скорости распространения упругих волн. Выявление роли нелинейности в поведении геологических массивов, обусловленной их блочно-иерархической структурой, представляет собой сложную и одновременно чрезвычайно актуальную задачу, решить которую по силам лишь объединенным научным коллективам.

### **3.2. Горные удары, газодинамические и сопутствующие явления, вызванные процессами отработки полезных ископаемых**

На угольных шахтах России и Украины происходят динамические явления различного типа, среди которых преобладают горные удары, внезапные выбросы угля и газа, прорывы газа в горные выработки. Наиболее сложными и опасными по своим последствиям являются горные удары, сопровождаемые внезапными выбросами угля и газа. Они характеризуются быстропротекающим разрушением угольного пласта (пород) в горных выработках, сопровождаются, как правило, нарушением технологического процесса добычи угля, являются причиной аварий с тяжелыми последствиями.

Горные удары и газодинамические явления обусловлены изменением напряженно-деформированного состояния разрабатываемых пластов и вмещающих пород, наличием газа в пластах и породе, особенностями структуры и физико-механических свойств угля и вмещающих пород. В зависимости от сочетания этих факторов вышеупомянутые явления различаются между собой особенностями формирования, развития и протекания геофизических и, в частности, геомеханических процессов. Каждый из этих факторов зависит от множества других, которые можно разделить на природные, влияющие на предрасположенность пласта (пород) к проявлениям такого рода процессов; технологические, отражающие изменение напряженного состояния и пласта (пород) в процессе отработки; геомеханические, характеризующие вышеперечисленные изменения в зависимости от развития горных работ на разрабатываемом и соседних пластах [4, 7, 10].

Методы прогноза базируются, как правило, на анализе признаков, характеризующих основные факторы, обуславливающие данные явления: горное давление, заключенный в угле (породах) газ, физико-механические свойства пласта и пород [4, 9]. Причем, если учитывается не один, а несколько признаков, то такие методы прогноза характеризуют как комплексные. В наибольшей степени разработаны и нашли практическое применение методы прогноза внезапных выбросов угля и газа и примыкающих к ним отжимов и обрушений и методы прогноза горных ударов, включающих стрельяния, толчки и микроудары. Методы прогноза суфляров, прорывов газа в горные выработки и других ГДЯ находятся в стадии разработки [9].

Выбросоопасность пластов определяют три основных фактора: напряженность, газоносность и физико-механические свойства [4]. Выбросоопасность тем выше, чем больше напряженность, газоносность и чем менее прочен и более хрупок пласт. Достаточно глубоко изучены вопросы теории внезапных выбросов как многостадийного процесса и в этой связи общеизвестен механизм формирования и

развития выброса. Его формирует процесс образования (раскрытия) газонаполненных, параллельных забою трещин, а реализует — давление свободного газа в трещинах, которое преодолевает сопротивление сдвигу перемычки (пробки) между забоем выработки и трещинами.

Практика разработки опасных по горным ударам и внезапным выбросам угольных пластов показала, что проблема борьбы с этими явлениями сводится к решению двух основных задач: прогнозу и предотвращению этих явлений [7]. Причем первостепенное и главенствующее значение имеет прогноз, поскольку внезапные выбросы угля и газа проявляются локально, в определенных аномальных зонах пластов, площадь которых не превышает 10 % общей площади вынимаемых пластов. Следовательно, при надежном и достоверном прогнозе таких зон в 90 % случаев из 100 шахты могут работать без ограничений, связанных с внезапными выбросами.

Проблема горных ударов и газодинамических проявлений актуальна как для Донбасса, так и для шахт России [4, 9, 11]. На перспективных и стабильно функционирующих угольных шахтах России, разрабатывающих в основном мощные и средней мощности пологие пласты, внезапные выбросы угля и газа в лавах происходят, как правило, значительно реже. В лавах таких пластов даже на глубоких горизонтах шахт Воркуты внезапные выбросы не происходят вследствие того, что горно-технические условия разработки этих пластов (пологое залегание, столбовые системы разработки, управление кровлей полным обрушением, применение механизированных комплексов с узким захватом) обеспечивают плавный, естественный отжим угля, когда расстояние до области концентрации напряжений равно двух-трехкратной мощности пласта и когда работы по отбойке угля ведутся в отжатой (безопасной) зоне.

Однако с ухудшением геологической и горно-технической обстановки, ввиду углубления горных работ и их интенсификации, следует ожидать увеличения выбросоопасности и на перспективных и стабильно работающих шахтах. По данным, приведенным в [11], опасность внезапных выбросов в пластах Кузбасса уже на глубине 600—700 м будет сопоставима с выбросоопасностью пластов Донбасса. Поэтому внезапные выбросы угля и газа могут появиться в лавах мощных пластов Кузбасса. Пока же на современных глубинах наиболее опасными в отношении внезапных выбросов угля и газа являются забои подготовительных выработок, проводимых комбайновым или буровзрывным способом.

Внезапные выбросы угля и газа в забоях подготовительных выработок происходят из мягкой пачки нарушенного угля [12—15]. Такую пачку угля можно рассматривать как нарушенный пропласток, в непосредственной кровле и почве которого залегают более прочные угли. На перспективных и стабильно работающих шахтах Кузбасса — основного угольного бассейна России — пока зарегистрированы единичные случаи внезапных выбросов. Однако с понижением уровня горных работ следует ожидать увеличения выбросоопасности, особенно в Южном Кузбассе, в частности, в Томь-Усинском районе. Тенденция к увеличению выбросоопасности с глубиной, например в Воркуте, прослеживается четко [11]. Так, если в интервале глубин 400—500 м от поверхности в условиях пласта «Мощный» средний объем выброса составлял 10 т на один выброс, то в интервале глубин 500—600 м он увеличился до 30 т, а в интервале глубин 600—700 м — до 100 т.

Горные удары представляют собой хрупкое разрушение предельно напряженной части пласта, возникающее в условиях, когда скорость изменения напряженного состояния пласта превышает предельную скорость релаксации напряжений вследствие пластических деформаций. Горные удары на угольных пластах происходят как в очистных, так и в подготовительных выработках [16, 17]. В Кузбассе горные удары отмечаются в лавах шахт «Аларда» и «Распадская» [11].

Горные удары в лавах шахты «Аларда» проявляются на пласте 3—3<sup>а</sup>, когда вышележащий защитный пласт 1 отработан на значительной площади и основная кровля этого пласта прогибается на обширных участках, уплотняя обрушенные породы непосредственной кровли и оказывая давление на нижележащий подзащитный пласт, в результате чего этот пласт на отдельных участках становится по сути незащищенным. Горные удары на пласте 3—3<sup>а</sup> при этом происходят в лавах по первому слою в виде толчков при падении кливажа на выработанное пространство или в виде микроударов при падении кливажа на массив.

Самый распространенный тип горных ударов в лавах шахты «Распадская», которая разрабатывает мощные пологие пласты не слоями, а на полную мощность, — толчки и стреляния, которые являются как бы предвестниками будущих (на более глубоких горизонтах) собственно горных ударов. Толчки происходят, как правило, в зонах повышенного горного давления (ПГД) от целиков или краевых частей вышележащих пластов и проявляются чаще всего в глубине массива со стороны почвы в верхних частях лавы. Стреляния происходят в забое лавы.

Более остро на перспективных и стабильно работающих шахтах стоит проблема борьбы с горными ударами, происходящими в подготовительных и капитальных выработках. Наиболее опасным в этом отношении является Томь-Усинский район Южного Кузбасса. На шахтах рассматриваемого района «Аларда», «Усинская», «Томская», им. Ленина, им. Шевякова, «Распадская» разрабатывается целый ряд угрожаемых и опасных по горным ударам мощных пологих пластов. Породы основной кровли на этих пластах представлены мощными слоями (30—50 м) весьма прочного (100 МПа и более при одноосном сжатии) песчаника, склонного к зависаниям на больших площадях.

Пласты на шахтах вскрыты и подготовлены к выемке без учета удароопасности. В результате в процессе развития горных работ образуются весьма опасные очаги горных ударов в охранных целиках угля около выработок, особенно капитальных (уклоны, бремсберги). Сложная горно-техническая ситуация, сложившаяся к настоящему времени на шахтах «Усинская», «Томская» и им. Шевякова, является примером неудачного вскрытия мощных пластов центральными уклонами. Опасность центральных уклонов (бремсбергов) состоит в том, что они по всем пластам свиты расположены один под другим, охраняются большими целиками угля и являются в связи с этим самыми опасными очагами горных ударов.

Горные удары небольшой силы в виде толчков или стреляний происходят в забоях подготовительных выработок, проводимых вприсечку к выработанному пространству или отделенных от него узкими (5—10 м) целиками на шахте «Распадская». При нисходящем порядке отработки столбов (основной порядок отработки на этой шахте) примыкающими выработками являются вентиляционные штреки вновь подготавливаемых лав. В выработках, проводимых в нетронутым массиве, толчков, стреляний или других ГДЯ не наблюдалось.



Горные удары на шахтах Воркуты начали происходить в 60-е годы на глубине 400 м и происходили в основном в охранных целиках уклонов и пластовых штреков [11]. За 1967—1980 гг. в подготовительных выработках только пласта «Мощный» произошло 25 горных ударов. С 80-х годов, в связи с переходом на бесцеликовую охрану подготовительных выработок, число горных ударов значительно уменьшилось. Что касается внезапных прорывов газа, представляющих собой явления реализации свободного газа, скопившегося в трещинах и пустотах, обычно приуроченных к зонам геологических нарушений, то такие на шахтах России происходят пока не так часто.

Перейдем к рассмотрению угольных пластов на территории Украины, уделив особое внимание Донбассу. Угольные пласты региона отличает высокая газодинамическая активность [4, 7, 9]. В бассейне отмечаются все виды газодинамических явлений, к которым относятся внезапные выбросы угля, породы и газа. Обычно внезапные выбросы возникают при глубине разработки 200—300 м, с ростом интенсивности с увеличением глубины разработки, мощности и угла падения пласта [9]. В инициировании и развитии широкого спектра газодинамических явлений существенную роль играет газовый фактор.

С учетом существующих тектонических структур, марочного состава углей, условий залегания пластов, географических и экономических особенностей Донбасс делится на 24 геолого-промышленных района. Внезапные выбросы угля и газа зафиксированы в девяти районах, наибольшее число выбросов отмечено в Центральном и Донецко-Макеевском районах.

В плане разработки выбросоопасных пластов в свитах наиболее сложен центральный район Донбасса (ЦРД) [9]. Структурно он представляет антиклинальную складку, в пределах которой простираются пласты осложнено рядом крупных надвигов, являющихся в большинстве случаев естественными границами шахтных полей. Разрабатываемые пласты имеют мощность 0,5—2,5 м. Около 90 % запасов угля в районе сосредоточены в пластах мощностью до 1,3 м. Угол падения пластов на северном крыле антиклинали 55—65°, а на южном — 60—70°. По газу шахты района относятся к сверхкатегорным. Выделение метана в горные выработки превышает 15 м<sup>3</sup> на 1 т суточной добычи (т. с. д.) и достигает иногда 100 м<sup>3</sup>/т. с. д. Средняя глубина разработки угольных пластов в районе составляет около 800 м, достигая на отдельных шахтах 1000 м и более.

Данные о газодинамических явлениях, зарегистрированных с 1947 г. на шахтах ЦРД (табл. 3.1), систематизированы на основе информационных баз из актов расследования аварий и карточек внезапных выбросов по данным МакНИИ [7, 9]. В целом Донецко-Макеевский район (табл. 3.2) в сравнении с ЦРД отличается значительно меньшей насыщенностью угольными пластами, имеющими рабочую мощность [4]. О высокой степени газонасыщенности не только угольных пластов, но и вмещающих их толщ в пределах Донецко-Макеевского района свидетельствуют высокие уровни метанообильности шахт и многочисленные газопроявления из разведочных скважин. Количество и виды газодинамических явлений, зарегистрированных в Донецко-Макеевском районе, представлены в табл. 3.2 [9].

Всего до 2000 г. на угольных пластах в Донецком угольном бассейне зарегистрировано 7168 газодинамических явлений (табл. 3.3). В соответствии с приведенными сведениями количество газодинамических явлений в Донбассе постоянно

Таблица 3.1

Газодинамические явления в Центральном районе Донбасса

Вид газодинамического явления	Количество газодинамических явлений по десятилетиям						Итого до 2000 г.
	До 1950 г.	1950—1959 гг.	1960—1969 гг.	1970—1979 гг.	1980—1989 гг.	1990—1999 гг.	
Выброс	28	227	196	211	99	40	801
Высыпание	113	122	50	34	31	2	352
Выдавливание	1	24	13	50	198	29	315
Выброс при СВ	1	140	39	40	91	49	360
Выброс при вскрытии	–	9	19	33	44	16	121
Обрушение	18	165	187	175	102	68	715
Всего за десятилетие	161	687	504	551	565	204	2664

Таблица 3.2

Газодинамические явления в Донецко-Макеевском районе Донбасса

Вид газодинамического явления	Количество газодинамических явлений по десятилетиям						Итого до 2000 г.
	До 1950 г.	1950—1959 гг.	1960—1969 гг.	1970—1979 гг.	1980—1989 гг.	1990—1999 гг.	
Выброс	4	86	268	135	434	209	1136
Высыпание	9	30	20	3	4	0	66
Выдавливание	–	7	7	47	57	32	150
Выброс при вскрытии	–	–	8	3	2	6	19
Обрушение	–	6	19	21	10	0	56
Выброс при СВ	–	5	324	743	1140	830	3042
Всего за десятилетие	13	134	646	952	1647	1077	4469

Таблица 3.3

Газодинамические явления, зарегистрированные на шахтах Донбасса

Вид газодинамического явления	Количество газодинамических явлений по десятилетиям						Итого до 2000 г.
	До 1950 г.	1950—1959 гг.	1960—1969 гг.	1970—1979 гг.	1980—1989 гг.	1990—1999 гг.	
Выброс	32	313	464	346	533	249	1937
Высыпание	122	152	70	37	35	2	418
Выдавливание	1	31	20	97	255	61	465
Выброс при СВ	1	145	363	783	1231	879	3402
Выброс при вскрытии	0	9	27	36	46	22	140
Обрушение	18	171	206	196	112	68	771
Всего за десятилетие	174	821	1150	1495	2212	1281	7133

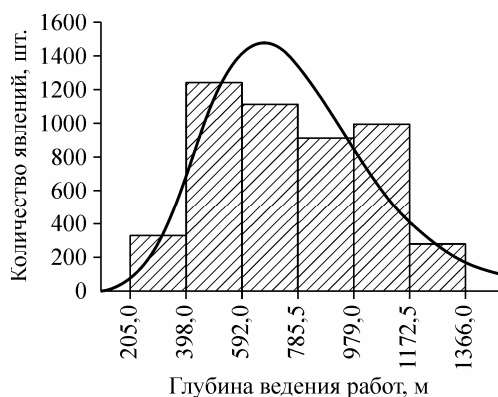


Рис. 3.2. Распределение газодинамических явлений на шахтах Донбасса в зависимости от глубины разработки угольных пластов.

сах в зависимости от газоносности угольных пластов (рис. 3.3).

К настоящему времени накоплен опыт разработки пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа в сложных геомеханических условиях шахт ЦРД [4, 7, 9]. Широкий диапазон горно-геологических, горно-технических и геомеханических условий, в которых наблюдаются ГДЯ, позволяет выявить основные закономерности изменения опасности пластов по этим проявлениям и поставить ряд вопросов, которые необходимо решить аналитическими, шахтными и лабораторными исследованиями.

Необходимые для анализа сведения о происшедших в наработанных и подработанных зонах опасных по выбросам пластов газодинамических явлениях были взяты из фондов МакНИИ. Это карточки и акты расследования. Соотношения горных работ по разрабатываемому и соседним пластам в местах явлений определялись по планам горных работ. Для этого по каждому зарегистрированному ГДЯ строились разрезы вкрест простирания и по простиранию пластов. При построении разрезов к учету принимались все сближенные пласты, залегающие на расстоянии 200 м выше и ниже пласта, на котором произошло газодинамическое явление.

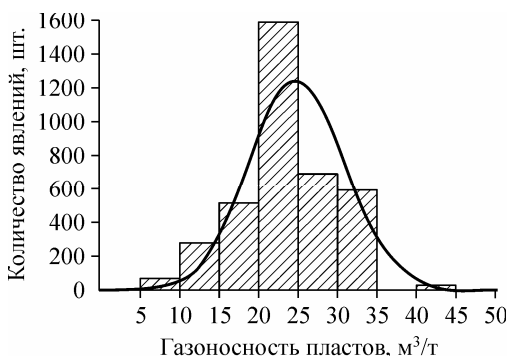


Рис. 3.3. Распределение газодинамических явлений на шахтах Донбасса в зависимости от природной газоносности угольных пластов.

возрастает, а некоторое снижение связано с закрытием глубоких шахт и снижением уровня добычи с 1990 г. Количество газодинамических явлений возрастает на глубинах до 500 м, после чего стабилизируется. Уменьшение количества ГДЯ на глубине более 1000 м связано с малым объемом горных работ.

Повышение опасности газодинамических проявлений на глубинах до 500 м на шахтах Донбасса (рис. 3.2) связано с возрастанием степени метаморфизма разрабатываемых пластов, что подтверждается сведениями о внезапных выбро-

сах в зависимости от газоносности угольных пластов (рис. 3.3). При построении разрезов к учету принимались все сближенные пласты, залегающие на расстоянии 200 м выше и ниже пласта, на котором произошло газодинамическое явление.

В выборке были приняты сведения о 515 газодинамических явлениях, происшедших при наработке угольных пластов, среди которых: 127 внезапных выбросов, 141 внезапное выдавливание, 247 внезапных обрушений и высыпаний угля. Количество ГДЯ на выбросоопасных пластах ЦРД и их распределение в зависимости от

расстояния до защитного пласта представлены на рис. 3.4. Анализ представленных данных показывает, что количество газодинамических явлений в условиях наработки не зависит от глубины разработки опасных по внезапным выбросам угля и газа пластов. Исходя из этого, можно прийти к выводу, что дальность защитного действия и, следовательно, величина зоны активного трещинообразования, в пределах которой происходит дегазация угольного пласта, также не связаны с глубиной ведения горных работ. Показательно отсутствие внезапных выбросов и выдавливаний угля в тех случаях, когда расстояние до защитного пласта не превышает 40 м. Анализ внезапных обрушений и высыпаний угля, зарегистрированных при меньших междупластьях (восемь ГДЯ из 247), позволяет предположить, что это были так называемые технологические обрушения, которые произошли по причине отсутствия крепления нависающего массива угля. Они не имеют отношения к внезапным выбросам и выдавливанию угля, для которых характерен отброс угля от забоя по простиранию.

К анализу количества внезапных выбросов в зависимости от величины междупластья при наработке выбросоопасных угольных пластов было принято 109 газодинамических явлений (рис. 3.5). В работе [9] была выполнена проверка гипотезы о том, что рассматриваемая случайная величина  $x$  подчиняется логнормальному закону распределения с плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $\mu$  — математическое ожидание логарифма случайной величины, которое принимается равным среднему выборочному значению нормального распределения;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение, которое принимается равным исправленному выборочному среднеквадратическому отклонению нормального распределения.

Согласно критерию Колмогорова—Смирнова,  $d_{\text{набл}} = 0,0467 < d_{\text{кр}} = 0,1205$  (при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ), закон логнормального распределения с параметрами функции плотности распределения ( $f(x)$ )  $\mu = 4,5397$  и  $\sigma = 0,4701$  можно принять в качестве гипотетического распределения внезапных выбросов в зависимости от величины междупластья в их генеральной совокупности и использовать эту закономерность для оценки поведения исследуемой случайной величины в различных интервалах ее значений.

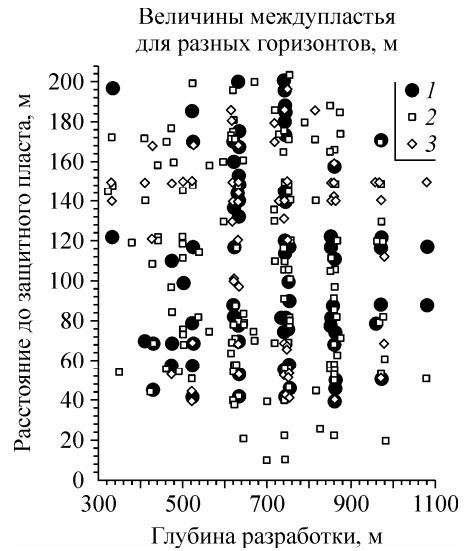


Рис. 3.4. Распределение газодинамических явлений по расстоянию до защитного пласта в зависимости от глубины разработки.

1 — внезапные выбросы; 2 — высыпания и обрушения; 3 — выдавливания.

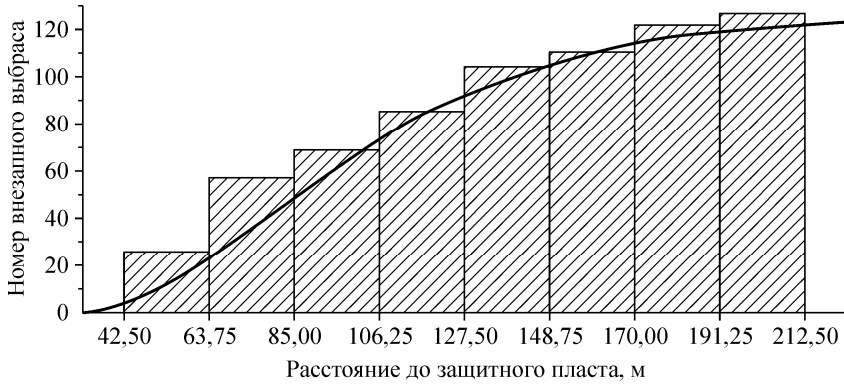


Рис. 3.5. Кумулятивная гистограмма и распределение внезапных выбросов по расстоянию до защитного пласта.

Оценка области наиболее вероятных значений позволяет сделать следующее заключение: если за границу взять  $2\sigma$ , чему соответствует вероятность 0,95, то можно утверждать, что при расстоянии до защитного пласта менее 43 м внезапные выбросы на опасном по ГДЯ угольном пласте не произойдут. При таком между-пластье произойдет практически полная дегазация пласта.

Исследования также показали, что расстояние  $m_{эф}$ , на которое распространяется зона эффективной трещиноватости в почву разрабатываемого угольного пласта, можно оценить по формуле  $m_{эф} = 57,87m_{пл} - 6,87m_{пл}^2$ , где  $m_{пл}$  — мощность пласта [9]. Исходя из этого, можно ввести граничный критерий оценки влияния этой зоны на защищаемый пласт:

$$m_m < m_{эф}$$

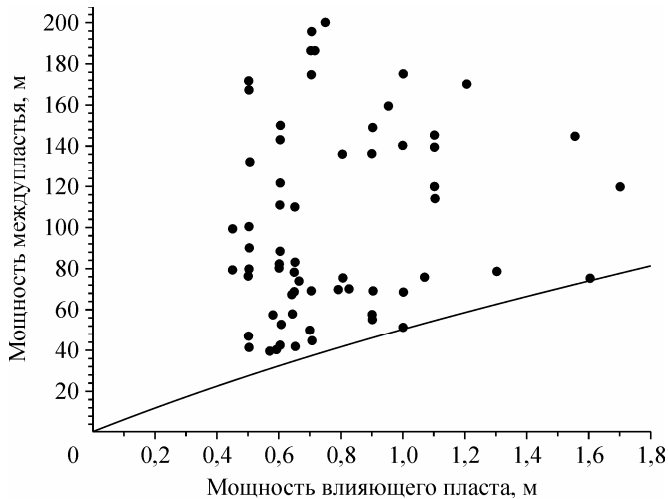


Рис. 3.6. Номограмма для определения размеров зоны эффективной трещиноватости под выработанным пространством очистного забоя.

где  $m_m$  — мощность междупластья. Соответствующая номограмма для определения размеров зоны эффективной трещиноватости под выработанным пространством очистного забоя представлена на рис. 3.6.

Полученный критерий справедлив для интервала значений  $0 < m_{пл} < 75$  или  $0 < m_m < 1,6$ . Это практически весь интервал влияния мощности разрабатываемого пласта на размеры зоны трещиноватости под выработанным пространством очистного забоя.

### 3.3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

По своему назначению различают региональный прогноз на стадии геолого-разведочных работ, прогноз перед вскрытием шахтопластов, локальный прогноз на действующем горизонте (определение критической глубины, на которой возможно появление горных ударов и ГДЯ) и текущий прогноз опасных зон в лавах или подготовительных выработках. В наибольшей степени методы прогноза разработаны для пластов, опасных по внезапным выбросам и горным ударам. На пластах, угрожаемых и опасных по внезапным выбросам угля и газа, наибольшее распространение получил текущий прогноз выбросоопасности по начальной скорости газовыделения и выходу бурового штыба [18]. Начальная скорость газовыделения в этом прогнозе косвенным образом характеризует давление газа в пласте и его газоносность, а выход бурового штыба — горное давление и прочность угля.

Текущий прогноз выбросоопасности по начальной скорости газовыделения и выходу бурового штыба применяется на угольных шахтах около 30 лет, однако данный прогноз нельзя считать надежным, тем более перспективным, поскольку ему присущи следующие недостатки.

Начальная скорость газовыделения, которая в данном прогнозе используется в качестве основного показателя выбросоопасности, не всегда правильно и однозначно отражает эту выбросоопасность, так как одновременно и неоднозначно связана и с газоносностью, и с газопроницаемостью призабойной части пласта. Отсюда в случае низкой газопроницаемости можно получить неопасные значения начальной скорости газовыделения на высокогазоносном (опасном) пласте или участке (ошибка первого рода). В случае высокой газопроницаемости можно получить критические (выбросоопасные) значения начальной скорости газовыделения на низкогазоносном (неопасном) пласте или участке (ошибка второго рода).

В практике применения текущего прогноза выбросоопасности по начальной скорости газовыделения и выходу бурового штыба таких ошибок было достаточно много. Если ошибки второго рода, неоправданно завышая протяженность опасных по прогнозу зон, отрицательно сказываются на технико-экономических показателях работы шахт, то ошибки первого рода зачастую приводят к авариям [4, 9, 11].

Прогноз по начальной скорости газовыделения и выходу бурового штыба применяется в остановленных (неподвижных) забоях, тогда как внезапные выбросы угля и газа происходят, как правило, в процессе добычи угля и проведения выработок, т. е. активная составляющая от воздействия на пласт этим прогнозом не учитывается.

И, наконец, прогноз по начальной скорости газовыделения и выходу бурового штыба в существующем виде не поддается автоматизации. Таким образом, заключение об опасности зоны пласта может зависеть от оператора (горного мастера по прогнозу), т. е. от субъекта, показания которого трудно, а иногда и невозможно проверить.

Применяемые в настоящее время методы текущего прогноза выбросоопасности по начальной скорости газовыделения (в Донбассе) и по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи (в Кузбассе) при бурении контрольных шпуров не являются непрерывными и характеризуются достаточно большой трудоемкостью [18]. На больших глубинах из-за высоких напряжений в призабойной зоне и пластового давления газа иногда не удается пробурить шпуры на требуемую глубину. Шпуры при бурении сильно разбураиваются, из-за чего их практически невозможно загерметизировать. Иногда процесс бурения скважин становится опасным, так как при этом происходят внезапные выбросы и другие газодинамические явления. Высокая трудоемкость этих методов при относительно небольшой протяженности собственно выбросоопасных зон способствует постепенному снижению качества работы шахтной службы прогноза вплоть до факта проявления газодинамического явления. В последние годы ослаблению внимания к проблеме внезапных выбросов способствует также недостаточное финансирование шахт, равно как и во всей угольной промышленности и Украины, и России.

Прогноз горных ударов как одного из видов ГДЯ базируется на выявлении перенапряженных участков угольного пласта, склонных к быстро протекающему хрупкому разрушению [14, 15, 19]. Прогноз удароопасности угольных пластов осуществляется по:

регистрации процессов и явлений, сопровождающих бурение контрольных шпуров;

определению изменений электропроводимости угля;

определению изменений влажности угля;

определению усилий вдавливания штампа в забой или стенки шпура.

Для каждого бассейна и месторождения выработан тот из перечисленных методов прогноза, который наиболее полно соответствует местным горно-техническим условиям. Однако в последние годы все большее распространение (особенно на пластах, одновременно опасных по горным ударам и внезапным выбросам) получает прогноз по параметрам фазово-физического состояния (ФФС) пластов [20].

Сущность метода заключается в следующем.

Угольный пласт рассматривается как трехфазная система (твердая часть— влага—газ), в которой выделяются по отношению к жидкой фазе три характерных показателя ФФС: максимальная гигроскопическая влажность  $W_{м.г.}$ , характеризующая сорбционный поровый объем угля; показатель структуры порового пространства  $G_{м.г.}$ , соответствующий долевого участию в общей пористости сорбционного порового объема; естественная влажность  $W_e$  или показатель естественного водонасыщения  $G_e$ .

Определение этих трех показателей осуществляется в лабораторных условиях на образцах угля, отбираемых в шахте. Критериями отнесения пластов угля марок Г, Ж, К, ОС и Т к ударо- или выбросоопасным служат следующие соотношения.

При  $W_e \leq W_{m, \Gamma}$  или  $G_e \leq G_{m, \Gamma}$  пласты считаются склонными к горным ударам. В опасных зонах таких пластов  $G_{m, \Gamma} \rightarrow 0,7$ ,  $W_e \leq W_{m, \Gamma}$  и  $W_{m, \Gamma} \leq 3\%$ .

При  $G_e \leq 0,5$  и  $W_e \leq W_{m, \Gamma}$  пласты считаются склонными к внезапным выбросам. В опасных зонах таких пластов  $W_{m, \Gamma} = 1,5—3,0\%$ ,  $G_{m, \Gamma} \leq 0,35$  и  $G_e \leq 0,25$ .

Основными недостатками данного метода прогноза ГДЯ являются его трудоемкость и дискретность измеряемых показателей, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к методам текущего прогноза ГДЯ.

Перечисленные методы прогноза горных ударов, внезапных выбросов угля и газа являются нормативными и широко применяются в шахтах. Кроме них ряд методов находится в стадии разработки или применяются фрагментарно для научных целей [21]. В Карагандинском бассейне известна экспертная система прогноза зон, опасных по ГДЯ [22], которая состоит в следующем: создается полное признаковое пространство, т. е. указываются все параметры признаков ГДЯ с интервалами их изменения; по реализовавшимся ГДЯ создается пространство критических ситуаций, т. е. указываются все сочетания параметров и их значения, при которых ГДЯ произошло; ведется сопоставление текущих ситуаций в параметризованном виде с критическими; при совпадении ситуации с критической объявляется опасность зоны по ГДЯ.

Данная экспертная система создана в виде целостной компьютерной технологии, которая реализована в условиях пласта  $d_6$  на шахте им. Ленина в Караганде. Технология включает:

- компьютерную геологическую карту пласта и вмещающей толщи;
- алгоритм и технологию количественной оценки тектонического перераспределения горного давления;
- алгоритм оценки объемов газа, который может быть выделен из пласта;
- алгоритм и технологию выдвижения гипотез и их проверки с целью определения возможности проявления ГДЯ.

В Караганде на шахте им. Ленина применялся геолого-геофизический прогноз выбросоопасных пачек угольного пласта [23], который давал возможность определять мощность и распространение выбросоопасной угольной пачки по данным геофизических параметров геолого-разведочных скважин. Выбросоопасная пачка при этом характеризовалась пониженными значениями кажущегося электрического сопротивления, высокой проводимостью электрического тока, увеличением диаметра скважины.

В Донбассе (МакНИИ) известен акустический метод контроля выбросоопасности [24]. Метод опробован в условиях выбросоопасных пластов шахты им. Газеты «Социалистический Донбасс» и состоит в следующем. При поинтервальном бурении скважин акустический сигнал, возбуждаемый буровой коронкой, регистрируется с помощью сейсмоприемника и регистратора. Обработка сигнала заключается в получении амплитудного спектра путем быстрого преобразования Фурье и вычислении средних спектров в пределах выбранных интервалов скважины, вычислении низко- и высокочастотных составляющих амплитуд спектра, энергии, определении амплитуды резонансной частоты. По данным показателям делается заключение о выбросоопасности забоя и безопасной глубине выемки угля в лаве.

В 1993—1996 гг. на шахте «Несветаевская» АО «Ростовуголь» проводились испытания методики РВМ-Т (радиоволновой томографии) [25], направленной на



прогнозирование ожидаемых осложнений угольных пластов в лавах. Данный метод не вышел из стадии экспериментальных работ в условиях антрацитовых пластов Восточного Донбасса.

В УкрНИМИ (Донецк) была апробирована методика шахтной сейсморазведки для выделения опасных зон из горных выработок [26—29]. Использовался метод отраженных волн. Наблюдения проводились по схеме сейсмозондирования с установкой сейсмоприемников посередине пласта в забое штрека и возбуждением колебаний в забое штрека, с двух сторон выработки вблизи забоя и на удалении 5, 10 м и от 20 до 50 м от забоя с шагом 10 м. Сейсмоприемники в каждом пункте ориентировались в плоскости пласта вдоль оси выработки (ось абсцисс) и в перпендикулярном направлении (ось ординат). Возбуждения колебаний производились в кровле и почве пласта ударным способом с накоплением в каждом случае 30—40 ударов. Регистрация упругих волн осуществлялась при помощи 12-канальной сеймостанции ШСС-1 «Дружба». Обработка материалов наблюдений производилась с помощью пакета прикладных программ «Крот». Данный метод был опробован в качестве эксперимента.

В Польше известен метод оценки сейсмической опасности в шахтах, основанный главным образом на распределении по времени и величине энергии ряда сейсмических событий как предвестников сильных сотрясений [30]. Используются: коэффициент направления временного линейного тренда сейсмособытий, среднеквадратичное значение дисперсии событий и статистический коэффициент сейсмической диффузии.

ВНИМИ с 1972 г. ведет работы по созданию электрометрического метода и аппаратуры для оценки степени удароопасности участков горных выработок [31]. В основе метода лежит зависимость удельного электрического сопротивления от давления. В сложных горно-геологических условиях сначала получают базовый осредненный график зондирования, заносят его в память, а оценку и сравнение выполняют по отклонению таблицы зондирования на разных участках от базового графика.

Для оценки удароопасности участков угольных пластов применяется разработанный ВНИМИ [32] принцип регистрации событий сейсмоакустической эмиссии (САЭ) по превышению амплитуд сигналов заданного амплитудного порога регистратора в течение некоего интервала времени. При фиксации события вырабатывается стандартный сигнал, поступающий на счетчик импульсов САЭ. Полученное значение активности сравнивается с критическими уровнями, установленными экспериментально для конкретного месторождения.

Для анализа структуры импульсов САЭ по энергиям используют принцип оценки пиковой амплитуды и сравнения ее с несколькими порогами, превышающими заданный. При оценке принимается: чем больше активность САЭ на заданном пороге и больше доля высокоамплитудных импульсов, тем выше напряжения и интенсивнее реакция массива в виде трещинообразования, и, следовательно, тем выше степень удароопасности [33].

Для участков с низкой интенсивностью естественной САЭ разработана методика оценки степени удароопасности, основанная на регистрации САЭ при ударно-вращательном бурении скважин перфоратором. Методика основана на возникновении САЭ при внедрении бурового инструмента в предельно напряженные

породы. Регистрация САЭ ведется при постоянном пороге с накоплением данных по интервалам скважины. При этом выделяют интервал с максимальной активностью и расстояние от него до контура выработки, которое считают равным расстоянию до максимума зоны опорного давления  $X$ . В качестве показателей степени удароопасности используют относительную активность в максимуме  $N_{\max}/N_0$ , где  $N_0$  — активность в разгруженном массиве у контура, а также относительное расстояние до максимума  $X/h$ , где  $h$  — характерный поперечный размер выработки. Чем выше  $N_{\max}/N_0$  и меньше  $X/h$ , тем выше удароопасность.

Пространственно-временной прогноз выбросов угля и газа, разработку которого ведет ИГД им. А. А. Скочинского, осуществляется на основе двух основных подходов: а) по оценке статистических характеристик потока информации для определения момента нарушения стационарности сейсмического режима массива на возможно низком энергетическом уровне; б) по оценке спектрального состава импульсов САЭ либо виброакустического сигнала, возбуждаемого в массиве рабочим органом горной машины [32, 33].

Основной нерешенной проблемой прогноза ГДЯ с использованием геоакустических методов является в настоящее время установление временных региональных зависимостей информативных параметров акустической эмиссии на стадии подготовки к выбросоопасной ситуации и определения их критериальных значений.

Известно, что основными факторами, определяющими выбросоопасность пласта, являются: его физико-механические свойства, напряженное состояние призабойной зоны (фактор напряженного состояния), газоносность и газопроницаемость угля (газовый фактор) и скорость проведения выработки [34–36]. Из физико-механических свойств угля преимущественное значение для формирования выбросоопасной ситуации имеют крепость угля, его влажность, а также наличие нарушений и анизотропия свойств [34–47]. Установлено, что выбросы приурочены к зонам с наличием пачек перемятого угля, к дизъюнктивным или резким пликативным нарушениям типа флексурных складок и перегибов, изменениям мощности пласта. Параметры естественной трещиноватости: плотность трещин, их раскрытие и ориентация относительно поверхности забоя выработки, определяющие условия дренажа газа в выработку, также оказывают существенное влияние на выбросоопасность призабойного пространства [34]. Однако, при влажности угля выше 6 %, как свидетельствует статистика, внезапные выбросы не происходят при любой комбинации параметров и свойств угля [34]. Это происходит потому, что жидкость блокирует газ в угле и повышает пластичность угля [38, 39].

При корректной организации прогноза выбросоопасности все выбросоопределяющие параметры подлежат непрерывному контролю и анализу. Для этого имеются соответствующие способы и средства. Однако измерения во многих из них не поддаются автоматизации [40]. Так, прочность угля оценивается либо в лабораторных условиях, либо с помощью экспресс-метода по внедрению в угольный массив пуансона, приводимого в движение пружинным механизмом [18]. По результатам измерения величины внедрения пуансона можно на основании экспериментальных зависимостей, установленных для углей всех стадий метаморфизма, оценить пределы прочности на сжатие, сдвиг и разрыв, модуль упругости и коэффициент газоотдачи [41]. Зоны нарушений также могут быть установлены либо при разведочном бурении, либо геофизическими методами путем акустического,

электромагнитного или электрического «просвечивания» горного массива [36, 42—46].

Из методов текущего прогноза выбросоопасности первым был разработан и внедрен сейсмоакустический, претерпевший за несколько десятилетий своего развития существенные доработки как аппаратурного, так и методического характера [47—49]. Этот метод имеет ряд существенных недостатков. Основные из них:

он обладает слабой помехозащищенностью от шумов горного оборудования, что вынуждает контролировать акустическую эмиссию горного массива «на слух» иногда даже при применении аппаратуры автоматизированного прогноза типа ЗУА-6 (АСС-1);

отдельные пласты имеют низкий уровень акустической активности в полосе рабочих частот аппаратуры типа ЗУА, что усложняет прогноз выбросоопасности;

контролируемая активность акустической эмиссии характеризует не остаточный ресурс устойчивости массива, а интенсивность развития трещин, возрастающие значения которой могут свидетельствовать о начале разгрузки пласта [50], а временное снижение — быть предвестником катастрофического последующего разрушения [51—54];

контроль активности акустической эмиссии пласта не позволяет оценить второй важный фактор выбросоопасности — газовый.

Это снижает информативность и надежность данного метода.

Для устранения трех первых недостатков был предложен спектрально-акустический метод прогноза выбросоопасности, основанный на спектральном анализе шумов работающего горного оборудования. Известны две основные разновидности этой методики. Обе базируются на снижении затухания высокочастотной части спектра акустических шумов действующего оборудования вследствие закрытия трещин и микротрещин при росте горного давления. Отличие их состоит в том, что в первой прогноз дается по величине энергии между средними значениями амплитуд низкочастотной и высокочастотной частей спектра шумов [55], а во второй — по величине их отношения [56]. Вторая разновидность метода, благодаря высокой надежности контроля напряженного состояния призабойного пространства, привлекла внимание специалистов. В результате появились усовершенствования метода аппаратурно-методического характера [57—59].

Следующим является температурный метод прогноза выбросоопасности, основанный на снижении температуры забоя в выбросоопасных участках, которые интенсивно освобождают газ, находящийся под давлением в угле [60, 61]. Недостатком этого метода является косвенный контроль напряженного состояния пласта. Наличие в горных выработках, проводимых по выбросоопасным пластам, автоматизированного контроля концентрации метана с помощью аппаратуры контроля метана (АКМ) побудило независимо друг от друга ИГД им. А. А. Скопинского и Институт угля и углехимии СО РАН использовать этот канал непрерывного контроля газовой ситуации в выработках для прогноза выбросоопасности [62, 63].

Многообразие методов не решает в полной мере задач обеспечения безопасности ведения горных работ, что говорит о необходимости разработки принципиально новых подходов.

### 3.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ С УЧЕТОМ ЗОН АНОМАЛЬНОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время для описания сейсмоакустического волнового поля в массиве горных пород с учетом напряженного состояния используются методы, основанные на линеаризации уравнений упругости. Наиболее известно решение задачи на основе теории инкрементальных деформаций Био, изложенной в работах [64, 65]. Были получены исходные волновые уравнения, а также аналитические зависимости скоростей продольных и поперечных волн от существующих в горном массиве нормальных напряжений и деформаций. Анализ полученных зависимостей позволил нам сделать вывод о применимости полученных результатов для глубин не менее 5 км. Применение результатов исследований к разрабатываемой части углепородного массива невозможно, так как горные работы ведутся обычно на глубинах до 1500 м. Исходное поле литостатических напряжений в несколько раз ниже, чем на глубинах, соответствующих области применения теории Био. Горные породы обладают естественной пористостью и трещиноватостью. Искусственная нарушенность углепородного массива в связи с ведением горных работ приводит к увеличению трещиноватости. Геомеханические процессы вызывают в горных породах неупругие деформации, которые в упомянутой теории не учитываются. Неупругие деформации, как отмечается в [42, 66], сопровождаются закрытием пор и трещин, что приводит к увеличению поверхности контактов зерен в породах. В итоге, изменяются их структура и физико-механические свойства. Это оказывает влияние на модуль сдвига, модуль сжатия, коэффициент Пуассона, плотность и их производные.

При проведении исследований были использованы два подхода. Во-первых, было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать процесс распространения сейсмических колебаний в углепородном массиве. Оно базировалось на упругой модели Гука, в которой в значения коэффициентов Ламе были внесены поправки, учитывающие изменение этих величин в зонах повышенной трещиноватости, а также в зонах аномального горного давления. Был рассмотрен вопрос о возможности детектирования зон аномального горного давления методами наземной, а также шахтной пластовой сейсморазведки.

Во-вторых, в качестве альтернативы был использован программный комплекс «SPS-PC» (модуль «Synthetic»), рассчитывающий волновое поле в среде на основе решения уравнения эйконала. Рассмотрим результаты использования данных подходов подробнее.

Сейсмоакустическое волновое поле в вертикальной плоскости геологического разреза углепородного массива с учетом массовых сил, но без учета неупругих деформаций может быть описано системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + c \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - g \frac{\partial w}{\partial x}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = d \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + e \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + g \frac{\partial u}{\partial x}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Система (3.1) описывает волновое поле  $P_V$  и  $S_V$  волн в изначально напряженном массиве горных пород, а дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = e \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + f \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

описывает волновое поле  $S_H$  волн. Разделение решения на две независимо распространяющиеся системы волн обусловлено тем, что углепородный массив можно рассматривать как систему выдержанных по мощности пластов угля и пород с параллельными границами, в которых изменением свойств в направлении, перпендикулярном плоскости разреза, можно пренебречь [4, 11]. Коэффициенты правых частей приведенных уравнений представляют собой функции упругих констант, плотности, а также нормальных напряжений и деформаций и имеют вид [11]

$$\begin{aligned} a &= a(\lambda, \mu, \rho, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, x, z) = [(2\mu + \lambda)(1 + \varepsilon_{xx} - 2\varepsilon_{zz})]/\rho, \\ b &= b(\lambda, \mu, \rho, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, \sigma_{xx}, \Delta\sigma, x, z) = \\ &= \left[ \lambda(1 - \varepsilon_{zz}) - \sigma_{xx} + \mu + \frac{1}{2}(\mu + \lambda)(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) + \frac{1}{2}(\lambda - 2\mu)\varepsilon_{zz} - \frac{1}{2}\Delta\sigma \right] / \rho, \\ c &= c(\lambda, \mu, \rho, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, \sigma_{xx}, \Delta\sigma, x, z) = \\ &= \frac{1}{\rho} \left[ \mu + \frac{1}{2}(\mu + \lambda)(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) + \frac{1}{2}(\lambda - 2\mu)\varepsilon_{zz} - \frac{1}{2}\Delta\sigma \right], \\ d &= d(\lambda, \mu, \rho, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, \sigma_{xx}, \Delta\sigma, x, z) = \frac{1}{\rho} [(\lambda + 2\mu)(1 - \varepsilon_{xx})], \\ e &= e(\lambda, \mu, \rho, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}, \sigma_{xx}, \Delta\sigma, x, z) = \\ &= \frac{1}{\rho} \left[ \mu + \frac{1}{2}(\mu + \lambda)(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) + \frac{1}{2}(\lambda - 2\mu)\varepsilon_{zz} - \frac{1}{2}\Delta\sigma \right], \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $u, w, v$  — величины смещений колебательного процесса по  $X$ -,  $Z$ - и  $Y$ -координатам соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\lambda, \mu, \rho$  — модуль сжатия, модуль сдвига и плотность горной породы;  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{zz}$  — упругие нормальные деформации горного массива;  $\Delta\sigma = (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$  — разность нормальной вертикальной и горизонтальной составляющих напряжений.

Соотношения (3.3) не учитывают пористость и трещиноватость горных пород и, тем самым, не передают влияние неупругих деформаций на параметры колебательного процесса [4, 67]. Анализ соотношений показывает, что использование соответствующих условиям подземной разработки угольных месторождений величин упругих напряжений и деформаций приводит к такому же результату, как если бы исходные значения  $\mu$  и  $\lambda$  изменились на 1,5—2 %. Это не согласуется с данными экспериментов [11]. К тому же, в реальных условиях определить величины напряжений и деформаций априори не представляется возможным, поскольку не существует полного представления об их распределении в угле вмещающей толще. Поэтому при проведении исследований использовался подход, при котором среда описывается объемной плотностью  $\rho$  и двумя модулями упругости для объемных и сдвиговых деформаций (коэффициентами Ламе). Через них выражаются: плотность  $\rho$ , скорости распространения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. В значения модулей упругости вводятся поправки, учитывающие состояние горного массива по правилам, которые будут описаны ниже. Исходя из этого, уравнение движения упругой среды с учетом ее неоднородности можно записать в виде известной системы:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \ddot{u} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{\partial \lambda}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \rho \ddot{v} &= \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z}, \\ \rho \ddot{w} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \\ &+ \frac{\partial \lambda}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial \mu}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \end{aligned} \right. \quad (3.4)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  — компоненты смещений по  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\rho$  — модуль сжатия, модуль сдвига и плотность горной породы соответственно.

Моделируемая область представляется неравномерной решеткой из  $M \times N$  элементов (по осям  $x$ ,  $z$  соответственно) размерами  $\Delta x_{m,n} \times \Delta z_{m,n}$  каждый ( $m = 1, \dots, M$ ,  $n = 1, \dots, N$ ). Величины  $\Delta x_{m,n}$  и  $\Delta z_{m,n}$  представляют собой шаги дискретизации модельной решетки в пространстве,  $\Delta t$  — во времени (номера шагов  $p = 1, \dots, P$ ). Используя стандартный подход приведения дифференциальных уравнений в конечно-разностную форму (согласно [67, 68]), расчетные соотношения можно записать в виде

$$\begin{aligned} u_{m,n}^{p+1} &= a_{x m,n} u_{m,n}^{p-1} + b_{x m,n} u_{m,n}^p + c_{x m+0,5,n} u_{m+1,n}^p + c_{x m-0,5,n} u_{m-1,n}^p + c_{x m,n+0,5} u_{m,n+1}^p + \\ &+ c_{x m,n-0,5} u_{m,n-1}^p + d_{x m,n+1} w_{m,n+1}^p - d_{x m,n-1} w_{m,n-1}^p + d_{x m+1,n} w_{m+1,n}^p - \\ &- d_{x m-1,n} w_{m-1,n}^p + f_{m+0,5,n+0,5} w_{m+1,n+1}^p + f_{m-0,5,n-0,5} w_{m-1,n-1}^p + \\ &+ f_{m-0,5,n+0,5} w_{m-1,n+1}^p + f_{m+0,5,n-0,5} w_{m+1,n-1}^p; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} w_{m,n}^{p+1} &= a_{z m,n} w_{m,n}^{p-1} + b_{z m,n} w_{m,n}^p + c_{z m+0,5,n} w_{m+1,n}^p + c_{z m-0,5,n} w_{m-1,n}^p + c_{z m,n+0,5} w_{m,n+1}^p + \\ &+ c_{z m,n-0,5} w_{m,n-1}^p + d_{z m,n+1} u_{m,n+1}^p - d_{z m,n-1} u_{m,n-1}^p + d_{z m+1,n} u_{m+1,n}^p - d_{z m-1,n} u_{m-1,n}^p + \\ &+ f_{m+0,5,n+0,5} u_{m+1,n+1}^p + f_{m-0,5,n-0,5} u_{m-1,n-1}^p + f_{m-0,5,n+0,5} u_{m-1,n+1}^p + f_{m+0,5,n-0,5} u_{m+1,n-1}^p; \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} v_{m,n}^{p+1} &= a_{y m,n} v_{m,n}^{p-1} + b_{y m,n} v_{m,n}^p + c_{y m+0,5,n} v_{m+1,n}^p + c_{y m-0,5,n} v_{m-1,n}^p + \\ &+ c_{y m,n+0,5} v_{m,n+1}^p + c_{y m,n-0,5} v_{m,n-1}^p; \end{aligned} \quad (3.7)$$

где

$$\begin{aligned} a_{x m,n} &= a_{y m,n} = a_{z m,n} = -1, \quad b_{x m,n} = 2 - 2 \left( \frac{(\lambda_{m,n} + 2\mu_{m,n})}{\Delta x_{m,n}^2} + \frac{\mu_{m,n}}{\Delta z_{m,n}^2} \right) \rho'_{m,n}, \\ b_{y m,n} &= 2 - 2 \left( \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} + \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \right) \rho'_{m,n} \mu_{m,n}, \quad b_{z m,n} = 2 - 2 \left( \frac{(\lambda_{m,n} + 2\mu_{m,n})}{\Delta z_{m,n}^2} + \frac{\mu_{m,n}}{\Delta x_{m,n}^2} \right) \rho'_{m,n}, \\ c_{x m+0,5,n} &= \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}) + \frac{1}{2} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}) + 2\mu_{m+0,5,n} + \lambda_{m+0,5,n} \right), \end{aligned}$$

$$c_{x\ m-0,5,n} = -\rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}) + \frac{1}{2} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}) - 2\mu_{m-0,5,n} - \lambda_{m-0,5,n} \right),$$

$$c_{x\ m,n+0,5} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \mu'_{m,n+0,5}, \quad c_{x\ m,n-0,5} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \mu'_{m,n-0,5},$$

$$c_{y\ m+0,5,n} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \mu'_{m+0,5,n}, \quad c_{y\ m-0,5,n} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \mu'_{m-0,5,n},$$

$$c_{y\ m,n+0,5} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \mu'_{m,n+0,5}, \quad c_{y\ m,n-0,5} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \mu'_{m,n-0,5},$$

$$c_{z\ m+0,5,n} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \mu'_{m+0,5,n}, \quad c_{z\ m-0,5,n} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n}^2} \mu'_{m-0,5,n},$$

$$c_{z\ m,n+0,5} = \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}) + \frac{1}{2} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}) + 2\mu_{m,n+0,5} + \lambda_{m,n+0,5} \right),$$

$$c_{z\ m,n-0,5} = -\rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta z_{m,n}^2} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}) + \frac{1}{2} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}) - 2\mu_{m,n-0,5} - \lambda_{m,n-0,5} \right),$$

$$d_{x\ m+1,n} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}), \quad d_{x\ m-1,n} = -d_{x\ m+1,n},$$

$$d_{x\ m,n+1} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}), \quad d_{x\ m,n-1} = -d_{x\ m,n+1},$$

$$d_{z\ m+1,n} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}), \quad d_{z\ m-1,n} = -d_{z\ m+1,n},$$

$$d_{z\ m,n+1} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}), \quad d_{z\ m,n-1} = -d_{z\ m,n+1},$$

$$f'_{m+0,5,n+0,5} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m+0,5,n+0,5} + \mu_{m+0,5,n+0,5}),$$

$$f'_{m-0,5,n-0,5} = \frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m-0,5,n-0,5} + \mu_{m-0,5,n-0,5}),$$

$$f'_{m+0,5,n-0,5} = -\frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m+0,5,n-0,5} + \mu_{m+0,5,n-0,5}),$$

$$f'_{m-0,5,n+0,5} = -\frac{1}{4} \rho'_{m,n} \frac{1}{\Delta x_{m,n} \Delta z_{m,n}} (\lambda_{m-0,5,n+0,5} + \mu_{m-0,5,n+0,5}),$$

$$\mu'_{m+0,5,n} = \mu_{m+0,5,n} + \frac{1}{4} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}), \quad \mu'_{m-0,5,n} = \mu_{m-0,5,n} - \frac{1}{4} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}),$$

$$\mu'_{m,n+0,5} = \mu_{m,n+0,5} + \frac{1}{4} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}), \quad \mu'_{m,n-0,5} = \mu_{m,n-0,5} - \frac{1}{4} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}),$$

$$\rho'_{m,n} = \frac{\Delta t^2}{\rho_{m,n}}.$$

Условия устойчивости решения для двухмерной неоднородной модели для волн  $P_V$ ,  $S_V$  и Релея имеют вид [69]

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\Delta x_{m,n}}{\sqrt{(V_{P_{m,n}})^2 + (V_{S_{m,n}})^2}}, \frac{\Delta z_{m,n}}{\sqrt{(V_{P_{m,n}})^2 + (V_{S_{m,n}})^2}} \right\} \quad (m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N), \quad (3.8)$$

для волн  $S_H$  и Лява:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\Delta x_{m,n}}{V_{S_{m,n}} \sqrt{2}}, \frac{\Delta z_{m,n}}{V_{S_{m,n}} \sqrt{2}} \right\} \quad (m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N), \quad (3.9)$$

где  $V_{P_{m,n}}$  и  $V_{S_{m,n}}$  — скорости распространения волн сжатия и сдвига соответственно для узла модели с координатами  $(m, n)$ .

Выбор шагов пространственной дискретизации модели ( $\Delta x_{m,n}$ ,  $\Delta z_{m,n}$ ) определяется характерными расстояниями, на которых изменяются параметры угля и пород. Использование неравномерной решетки в общем случае является обоснованным, поскольку углевмещающая толща за исключением зон нарушений может быть представлена в виде слоисто-однородной среды. Скачкообразные либо градиентные изменения физических характеристик угля и пород в плоскостях, параллельных залеганию пласта, наблюдаются только в зонах нарушения. Характеристики толщи в плоскостях, перпендикулярных залеганию пласта, следует рассматривать в зависимости от частотной характеристики поля колебаний как скачкообразно (от породы к породе) либо градиентно изменяющиеся во всем объеме модели.

При разбиении модели на элементы возникают проблемы, связанные с точностью передачи геометрии и физико-механических характеристик геологических и техногенных объектов. На рис. 3.7, *a* показано разбиение среды, содержащей аномальную зону, на набор равных элементов. Заштрихованными областями схематически показано, как эти объекты отображены в модели. Чем больше величины  $\Delta x$  и

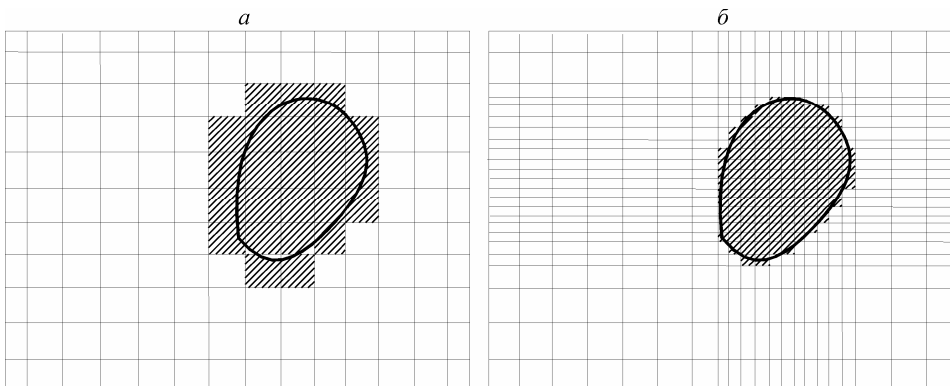


Рис. 3.7. Различные схемы разбиения модели углевмещающей толщи с аномальной зоной на элементарные сегменты.

*a, б* — см. в тексте.



$\Delta z$ , тем больше погрешность характеристик модели. Для повышения точности используется варьирование шагов дискретизации по методу, проиллюстрированному на рис. 3.7, б для случая той же среды. В рамках исследований был разработан алгоритм построения моделей с учетом разбиения среды на неоднородные ячейки по вышеприведенной схеме для использования соотношений (3.4)—(3.7).

Опыт использования соотношений (3.4)—(3.7) на моделях с различными объемами решетки показал, что при объеме  $M \times N \approx 500000$  (достаточном для большинства использованных в настоящих исследованиях моделей) времена расчетов сравнительно малы и шаг решетки можно положить не зависящим от направления и одинаковым по всей модели ( $\Delta h = \min\{\Delta x_{m,n}, \Delta y_{m,n}\}$ ). Тогда часть коэффициентов упрощается:

$$\begin{aligned}
 b_{x m,n} &= b_{z m,n} = 2 - 2 \frac{(\lambda_{m,n} + 3\mu_{m,n})}{\Delta h^2} \rho'_{m,n}, & b_{y m,n} &= 2 - 4 \frac{1}{\Delta h^2} \rho'_{m,n} \mu_{m,n}, \\
 c_{x m+0,5,n} &= k_{m,n} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}) + \frac{1}{2} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}) + 2\mu_{m+0,5,n} + \lambda_{m+0,5,n} \right), \\
 c_{x m-0,5,n} &= -k_{m,n} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}) + \frac{1}{2} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}) - 2\mu_{m-0,5,n} - \lambda_{m-0,5,n} \right), \\
 c_{x m,n+0,5} &= c_{y m,n+0,5} = k_{m,n} \mu'_{m,n+0,5}, & c_{x m,n-0,5} &= c_{y m,n-0,5} = k_{m,n} \mu'_{m,n-0,5}, \\
 c_{y m+0,5,n} &= c_{z m+0,5,n} = k_{m,n} \mu'_{m+0,5,n}, & c_{y m-0,5,n} &= c_{z m-0,5,n} = k_{m,n} \mu'_{m-0,5,n}, \\
 c_{z m,n+0,5} &= k_{m,n} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}) + \frac{1}{2} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}) + 2\mu_{m,n+0,5} + \lambda_{m,n+0,5} \right), \\
 c_{z m,n-0,5} &= -k_{m,n} \left( \frac{1}{4} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}) + \frac{1}{2} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}) - 2\mu_{m,n-0,5} - \lambda_{m,n-0,5} \right), \\
 d_{x m+1,n} &= \frac{1}{4} k_{m,n} (\mu_{m,n+1} - \mu_{m,n-1}), & d_{x m-1,n} &= -d_{x m+1,n}, \\
 d_{x m,n+1} &= \frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m+1,n} - \lambda_{m-1,n}), & d_{x m,n-1} &= -d_{x m,n+1}, \\
 d_{z m+1,n} &= \frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m,n+1} - \lambda_{m,n-1}), & d_{z m-1,n} &= -d_{z m+1,n}, \\
 d_{z m,n+1} &= \frac{1}{4} k_{m,n} (\mu_{m+1,n} - \mu_{m-1,n}), & d_{z m,n-1} &= -d_{z m,n+1}, \\
 f_{x m+0,5,n+0,5} &= f_{z m+0,5,n+0,5} = \frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m+0,5,n+0,5} + \mu_{m+0,5,n+0,5}), \\
 f_{x m-0,5,n-0,5} &= f_{z m-0,5,n-0,5} = \frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m-0,5,n-0,5} + \mu_{m-0,5,n-0,5}), \\
 f_{x m+0,5,n-0,5} &= f_{z m+0,5,n-0,5} = -\frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m+0,5,n-0,5} + \mu_{m+0,5,n-0,5}), \\
 f_{x m-0,5,n+0,5} &= f_{z m-0,5,n+0,5} = -\frac{1}{4} k_{m,n} (\lambda_{m-0,5,n+0,5} + \mu_{m-0,5,n+0,5}), & k_{m,n} &= \frac{1}{\Delta h^2} \rho'_{m,n}.
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Остальные коэффициенты будут иметь тот же вид. Данные соотношения позволяют рассчитать процесс распространения сейсмических колебаний. В качестве иллюстрации на рис. 3.8 приведены расчетные и реальные сейсмограммы, полученные при выполнении работ на шахте «Красноармейская-Западная». Анализ характеристик угля и пород позволил добиться неплохого соответствия модели реальным условиям залегания угольного пласта.

Для учета неупругих деформаций представим упругие константы в виде [11]

$$\mu = \mu_0 (1 + \Delta\mu), \quad \lambda = \lambda_0 (1 + \Delta\lambda), \quad (3.11)$$

где  $\mu_0, \lambda_0$  — упругие константы скелета горных пород в естественном состоянии;  $\Delta\mu, \Delta\lambda$  — корректирующие добавки, учитывающие влияние пористости и трещиноватости.

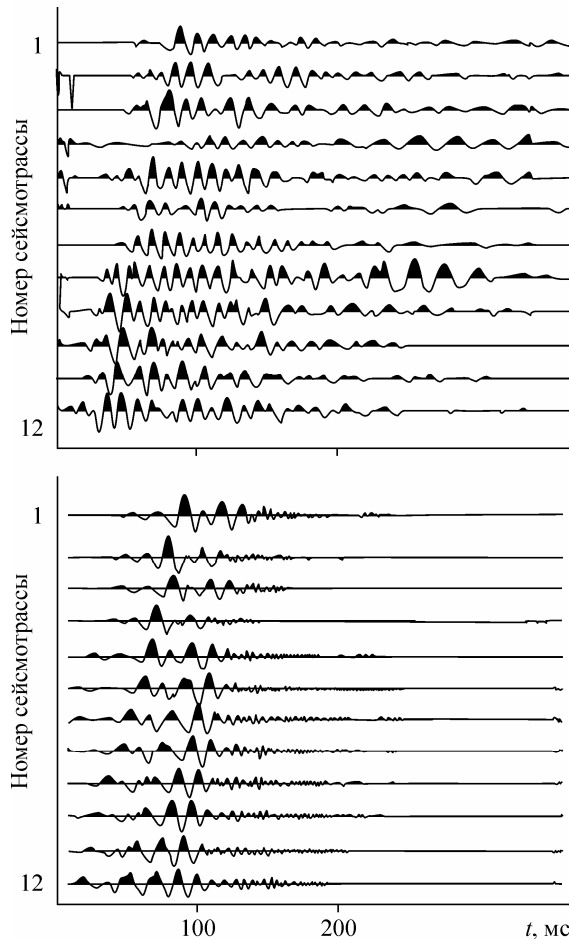


Рис. 3.8. Сейсмограммы, полученные на участке шахтного поля ш. «Красноармейская-Западная».

Вверху — реальные, внизу — полученные с помощью математического моделирования.

Как показывают приведенные в [60] исследования, корректирующие добавки  $\Delta\mu$  и  $\Delta\lambda$  могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\Delta\lambda = K_\lambda f(\Pi), \Delta\mu = K_\mu f(\Pi), \quad (3.12)$$

где  $K_\lambda$  и  $K_\mu$  — коэффициенты, учитывающие форму трещин и пор и предполагающие, что трещиноватость описывается системой хаотически расположенных пересекающихся эллипсоидальных микротрещин, параметры которых распределены по нормальному закону;  $f(\Pi)$  — функция, определяющая влияние концентрации трещин и пор на корректирующие добавки и учитывающая влияние горного давления на эффективные модули упругости.

Коэффициенты  $K_\lambda$  и  $K_\mu$  могут быть определены с учетом теории микронеоднородных трещиноватых сред из выражений

$$K_\lambda = \frac{16(1-\nu^2)}{3\pi(1-2\nu)}, K_\mu = \frac{32(1-\nu)(5-\nu)}{15\pi(2-\nu)}, \quad (3.13)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона горной породы.

Функция  $f(\Pi)$  может быть представлена в виде

$$f(\Pi) = e^{-\Pi} - e^{-\Pi_0}, \quad (3.14)$$

где  $\Pi$  — текущая трещинная пористость горной породы;  $\Pi_0$  — трещинная пористость горной породы при гидростатическом давлении в ненарушенном состоянии.

Таким образом, входящие в уравнение (3.4) упругие константы  $\mu$  и  $\lambda$  вычисляются исходя из моделируемых величин пористости и трещиноватости горных пород, а также величин напряжений, используемых в анализируемой модели.

Перейдем к результатам моделирования. Анализ прогнозируемости зон повышенного горного давления методами наземной сейсморазведки невозможен без анализа сейсмических свойств углепородного массива применительно к данному подходу. В качестве базового при проведении исследований выбран Донецкий угольный бассейн. Толщи бассейна представляют собой типичную слоисто-однородную структуру, включающую ритмичное чередование гранулометрически различных по разрезам и сравнительно однородных по наслоению литологических разностей терригенных пород с включением угольных пластов и известняков.

Основным генетическим фактором, оказывающим воздействие на формирование упругих свойств углевмещающих пород, является литолого-генетическая принадлежность породы. Наглядно зависимость значений упругих характеристик пород — скорости продольных ( $V_p$ ), поперечных ( $V_s$ ) волн и плотности ( $\rho$ ) — от их литологической принадлежности по данным акустического каротажа показана в табл. 3.4.

Физические свойства углевмещающих пород являются индикаторами степени метаморфизма углей. Преобразования углевмещающих пород в процессе эпигенеза заключаются в их уплотнении, изменении структуры, типов и составов цемента обломочных пород, возникновении минеральных новообразований и т. д. Вторичные постдиагенетические факторы оказали существенное влияние и на упругие характеристики пород, изменения которых (по данным измерений на образцах горных пород) отображены на рис. 3.9.

Несмотря на определенные различия в количественных значениях физических характеристик различных генетических типов пород, при одинаковых степенях

Таблица 3.4

Упругие характеристики пород угленосной формации Донбасса по данным акустического каротажа (угли марок Д—А).

Горные породы	$V_p$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\gamma (V_s/V_p)$	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
Аргиллиты	2,0—4,6	0,9—2,4	0,45—0,55	1,9—3,0
Алевролиты	2,2—5,5	0,95—3,3	0,45—0,65	2,0—3,1
Песчаники	2,5—5,6	1,6—3,3	0,52—0,65	1,85—2,9
Известняки	3,3—6,4	1,7—3,5	0,52—0,65	2,34—3,1
Угли	3,5	1,8	0,51	1,9

метаморфизма углей и эпигенеза пород наблюдаются одинаковые изменения физических свойств углей и вмещающих пород независимо от их геологического возраста. Следовательно, при моделировании скоростных разрезов угленосных толщ и проведении сейсморазведки необходимо руководствоваться не их принадлежностью к той или иной свите угленосных формаций, а приуроченностью к конкретному интервалу петрофизического разреза. Послойные сопоставления изменений физических свойств горных пород производят на их литотипах, однозначных по физико-генетической классификации.

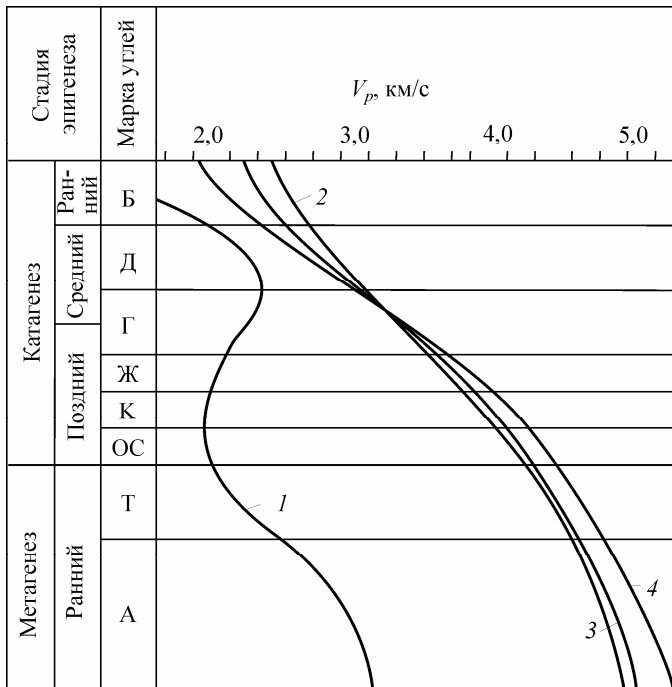


Рис. 3.9. Изменения скорости продольных волн ( $V_p$ ) в углях и вмещающих породах в зависимости от стадии метаморфизма и эпигенеза.

1 — уголь; 2 — аргиллит; 3 — алевролит; 4 — песчаник.

В различных структурно-тектонических зонах Донбасса изменения упругих характеристик углевмещающих пород происходят закономерно — однонаправленно по петрофизическому разрезу, но с различной степенью интенсивности и с различными значениями этих характеристик. Так, в Кальмиус-Торецкой котловине средние значения  $V_p$  русловых песчаников в зоне эпигенеза, включающих угли марки Г, составляют 2,8 км/с, а  $V_p$  для таких песчаников, находящихся на этой же стадии эпигенеза, для Северной зоны мелких складок — 2,38 км/с. В зоне эпигенеза с углями марки Ж эти цифры составляют для соответствующих структур 3,68 и 3,23 км/с, т. е. с разницей в 0,45 км/с. В зоне эпигенеза с углями марки Т — соответственно 3,80 км/с и порядка 4,05 км/с.

Скорость продольных волн в зависимости от глубины выражается соотношением

$$V_p(H) = \sqrt{1 + aH^{1/3}}, \quad (3.15)$$

где  $a$  — постоянная.

Переменный градиент  $V_p(H)$  характерен для глубин залегания до 2000 м. На основании существующей тесной корреляционной связи между  $V_p$  и  $V_s$  можно допустить, что зависимость (3.15) будет справедлива и для поперечных волн. Поскольку основное влияние на изменения  $V_p$  и  $V_s$  оказывает плотность породы, то наиболее сильное изменение  $V_s$  (как и  $V_p$ ) следует ожидать до глубины 2000 м, где уплотнение пород с глубиной происходит с высоким градиентом.

В целом, возрастание  $V_p$  и  $V_s$  по мере увеличения глубины залегания пород происходит вследствие уплотнения скелета и, соответственно, увеличения плотности и уменьшения пористости пород. Эти процессы, в свою очередь, обусловлены совместным воздействием давления и температуры, происходившим под влиянием эпигенеза. Происходят необратимые изменения физических свойств горных пород, абсолютные значения которых непосредственно зависят от максимальной глубины погружения в период прогрессивного эпигенеза. При последующих поднятиях пород в период регрессивного эпигенеза их первоначальные физические свойства не восстанавливаются, изменения необратимы. Поэтому при учете изменений физических свойств по вертикали более обоснованно привязываться к петрофизическому разрезу, чем к современной глубине залегания.

Следует учитывать различия между скоростями сейсмических волн в массиве пород по данным акустического каротажа (АК) и измеренными в лабораторных условиях на образцах, по данным которых строился петрофизический разрез. Измеренная на образцах песчаников скорость продольных волн на 20—27 % и поперечных — на 15—30 % ниже, чем по данным АК (зоны эпигенеза, включающие угли марок Г и Ж). Различия объясняются снятием нагрузки вышележащих пород при лабораторных исследованиях. Причем под нагрузкой и при ее снятии градиент скорости поперечных волн выше, чем градиент продольных. Рост уплотнения пород и упругого напряжения с глубиной больше влияет на  $V_s$ , чем на  $V_p$ . При измерениях  $V_s$  и  $V_p$  на образцах отношение  $V_s/V_p$  имеет обратную зависимость по сравнению с соотношением, полученным по данным АК.

Распределение  $V_p$  и  $V_s$  в верхней части разрезов, в зоне малых скоростей (ЗМС) имеет сложный характер и зависит от различных факторов (орогидрографических, глубины залегания обводненных пород, характера современного рельефа

фа, мощности зоны выветривания и т. д.). При разработке моделей влияние ЗМС не учитывалось.

Многообразие зон аномального горного давления в целом не позволяет унифицировать метод их моделирования. На рис. 3.10 приводится схема моделирования разрывных нарушений с учетом закономерностей, вызванных перераспределением напряжений в углепородном массиве. В схему заложены скоростные характеристики для толщи переслаиваемых основных литологических типов пород, находящихся в интервале петрофизического разреза, соответствующего началу позднего катагенеза (угли марок Г и Ж) в Кальмиус-Торецкой котловине. Интервал петрофизического разреза выбран как наиболее типичный для шахтных полей шахт «Красноармейская-Западная № 1», «Краснолиманская», им. А. Ф. Засядько. Рассматриваемые зоны эпигенеза имеют средние мощности (с углями марки Г — 800 м, с углями марки Ж — 600 м). Соответственно, моделируемая толща горных пород включает в верхней части разреза зону, отвечающую углям марки Г, в нижней части — углям марки Ж.

При построении моделей преследовалась цель показать аномалиеобразующий характер различных типов дизъюнктивов. Поэтому вся толща пород представлена в виде монотонно переслаивающихся аргиллитов, алевролитов и песчаников с равнозначным вкладом каждого из этих литотипов пород. Использовались усредненные скоростные характеристики пород, исходя из установленных для них средних значений  $V_p$ , км/с (табл. 3.5).

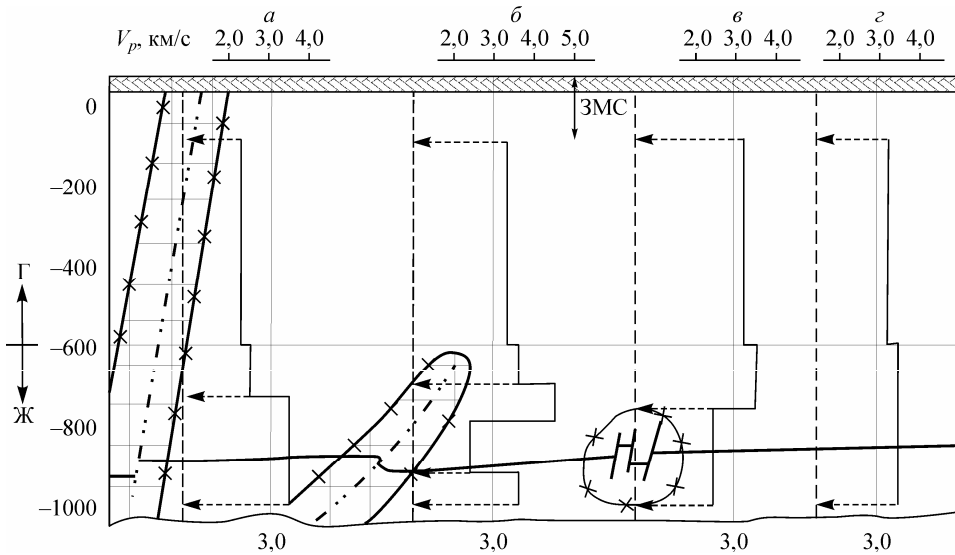


Рис. 3.10. Обобщающие сейсмогеологические модели разрывных нарушений с учетом закономерностей, вызванных перераспределением напряжений в углепородном массиве [41].

*а* — сброс, выходящий под покровные отложения; *б* — надвиг, затухающий в массиве горных пород; *в* — серия мелкоамплитудных дизъюнктивов; *г* — массив горных пород без нарушений. ЗМС — зона малых скоростей.

Таблица 3.5

Усредненные значения  $V_p$  (км/с) углевмещающих пород различных стадий эпигенеза

Марка углей	Литотип пород				
	Аргиллит	Алевролит	Песчаник	Переслаивание аргиллита и алевролита	Переслаивание аргиллита, алевролита и песчаника
Г	3,10	3,30	3,60	3,20	3,33
Ж	3,20	3,50	3,90	3,33	3,53

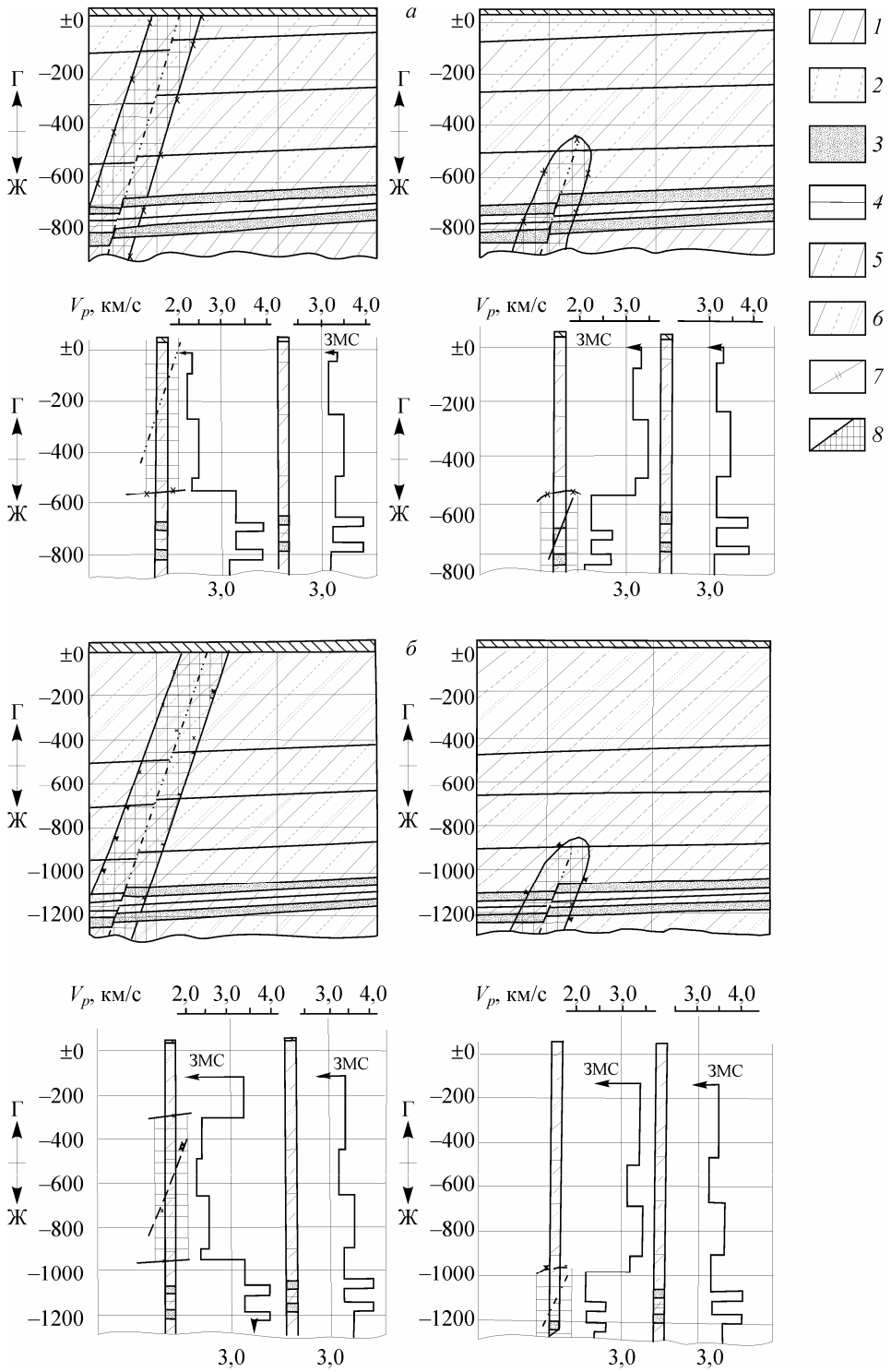
Учитывался тип дизъюнктива и, соответственно, характер аномальных изменений упругих характеристик в его крыльях в пределах зоны влияния, величина которых принимается по максимуму — до 30 % от фоновых. В реальных условиях максимальные аномальные значения отмечаются вблизи сместителя с плавными, постепенными изменениями по обе стороны от него до фоновых к перифериям зон влияния. Возрастание значений упругих характеристик пород с увеличением степени эпигенеза (отвечающее переходу от стадии с углями марки Г к стадии с углями марки Ж) происходит также постепенно, а не скачкообразно.

На рис. 3.11—3.13 показаны более сложные обобщающие сейсмогеологические модели, включающие различные типы аномалий, выходящих под покровные отложения и затухающие в массиве горных пород. В моделях приводится характерная для Донбасса послойная дифференциация угленосной толщи переслаивания аргиллитов, алевролитов и песчаников. При построении моделей учтены особенности распределения физических параметров пород в зависимости от типа тектонических нарушений и аномальных изменений упругих характеристик в зонах их влияния. Сближенные мелкоамплитудные дизъюнктивы рассматривались как единая зона влияния с аномальными значениями упругих характеристик.

Кроме аномалий, вызванных естественными причинами, рассматривались модели перераспределения давления, вызванного отработкой угольных пластов. В таких моделях предполагалось, что повышенное горное давление распределено на всем протяжении моделируемого участка угленосного массива, как по  $X$ -, так и по  $Z$ -координате. Такие ситуации обычно возникают впереди забоя лавы, под целиками протяженностью более длины лавы, а также в районах тектонических нарушений больших мощности и протяженности. Главным фактором, определяющим основные геомеханические процессы в горном массиве применительно к отработке угольных пластов, является поведение пород основной кровли [5, 70—72] в области очистных работ.

Рис. 3.11. Сейсмогеологические модели сбросовых структур с залеганием разведываемых угольных пластов на глубинах порядка 700 м (а) и 1100 м (б).

1 — аргиллит; 2 — алевролит; 3 — песчаник; 4 — угольный пласт; 5 — переслаивание аргиллита, алевролита; 6 — переслаивание аргиллита, алевролита и песчаника; 7 — тектонические нарушения; 8 — зоны влияния тектонических нарушений с аномальным снижением значений  $V_p$  (для дизъюнктивов — на 30 %, для пликативов — на 20 % от фоновых).





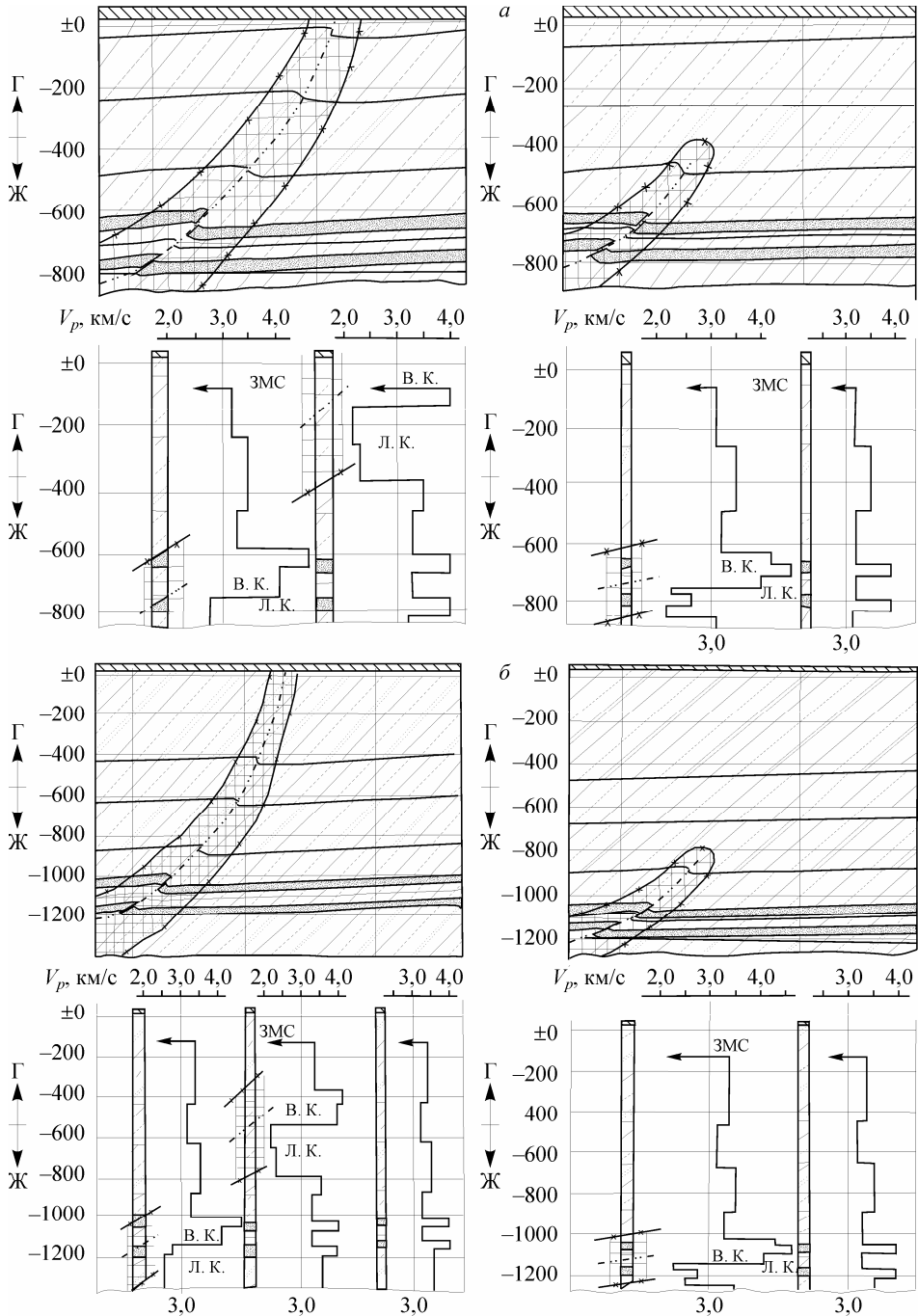


Рис. 3.12. Сейсмогеологические модели надвиговых структур с залеганием разведываемых угольных пластов на глубинах порядка 700 м (а) и 1100 м (б).

Усл. обозн. см. рис. 3.11.

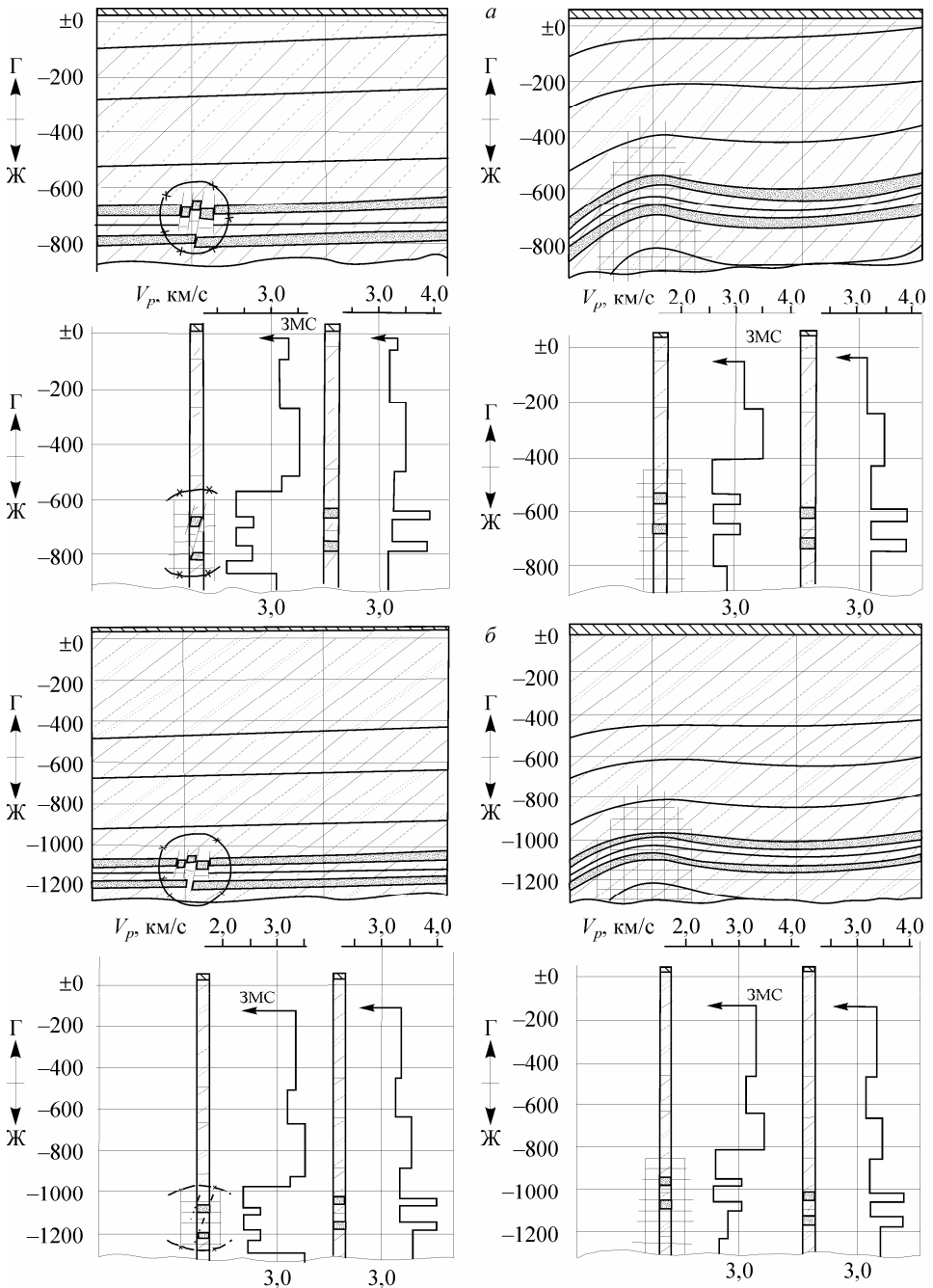


Рис. 3.13. Сейсмогеологические модели серии сближенных мелкоамплитудных дизъюнктивов и антиклинальных куполовидных структур с залеганием разведываемых угольных пластов на глубинах порядка 700 м (а) и 1100 м (б).

Усл. обозн. см. рис. 3.11.

При определенных условиях основная кровля совместно с вышележащими породами способна формировать напряжения в углевмещающем массиве, на порядок превосходящие естественные значения (без учета тектонических сил и температурного градиента). По мере продвижения очистного забоя и, соответственно, увеличения консольной части основной кровли возрастают напряжения в массиве над основной кровлей и растягивающие напряжения в самой основной кровле, в области ее защемления между непосредственной кровлей угольного пласта и вышележащими породами. В зависимости от прочностных характеристик пород основной кровли, ее мощности и протяженности консольной части, вызываемые напряжения способны существенно изменять физико-механические характеристики породных слоев [4, 27—29, 73—75]. Данная модель отличается сравнительной простотой, поэтому рассмотрение результатов моделирования начнем с нее.

Подробное распределение пород и их характеристик по глубине в базовой модели представлено в табл. 3.6. Скорости выбраны из соображений подобия описанным выше реальным геологическим разрезам при неглубоко залегающих породах карбона. Моделирование проводилось для неизменных значений скорости в слоях 1–6 и различных значений скорости в слое 3 (3600, 3500, 3300 и 3100 м/с). Предполагается, что это изменение происходит в результате подработки массива. Слои 2 и 4 представляют собой характерные для Донбасса пласты песчаника, залегающие на глубинах 400—1000 м и более и формирующие, как показывает опыт [27, 28, 71], информативную отраженную волну. Основной вопрос, на который предлагалось ответить при проведении расчетов, заключался в возможности выявления зон аномального горного давления путем анализа амплитудных характеристик отраженных волн.

На рис. 3.14 и 3.15 представлены последовательные картины распространения сейсмических волн, полученные для модели, в которой значение скорости продольных волн в слое 3 составляет 3100 м/с. При расчете использованы соотношения (3.5)—(3.7). Представленные картины отражают структуру волнового поля в моменты времени 250 и 500 мс. Показаны *Z*- и *Y*-компоненты волнового поля (ось *Z* направлена вертикально вниз, ось *Y* — перпендикулярно плоскости модели).

На рис. 3.16 представлены соответствующие наборы теоретических сейсмограмм, полученных для цепочки сейсмоприемников, расположенных на дневной поверхности вдоль линии исследовательского профиля с шагом 4 м.

Таблица 3.6  
Сейсмогеологическая модель

Номер слоя	Глубина до границы, м	Мощность слоя, м	Скорость в слое $V_p$ , м/с	Порода
1	130	130	2000	Переслаивание алевролита с аргиллитом
2	400	270	3500—4000	Песчаник
3	500	100	3600, 3500, 3300, 3100	Переслаивание алевролита с аргиллитом (подрабатываемый пласт)
4	750	250	4200	Песчаник
5	880	130	3600	Переслаивание алевролита с аргиллитом
6	—	—	4500	Песчаник

Последовательные картины волнового поля свидетельствуют о том, что в представленной среде основной вклад вносят две отражающие границы. Первая граница располагается между породами слоев 1 (переслаивание аргиллита и алевролита) и 2 (песчаник). Вторая граница — между породами слоев 3 (подработанная толща аргиллита и алевролита) и 4 (песчаник). Особенно четко этот факт проявляется на картинах распространения поперечных волн ( $Y$ -компонента колебаний). В верхних породах создается устойчивая во времени структура многократно отраженных волн. Эти волны вносят доминирующий вклад в формирование сейсмического

волнового поля и затрудняют процесс анализа волновых пакетов, отраженных от нижерасположенных акустических границ. Такие волны (отражение от границы карбона) всегда присутствуют на реальных сейсмограммах.

Для того чтобы более эффективно выделить отраженные от границ слоев 3 и 4 волновые поля, были проведены расчеты без учета верхнего слоя. На рис. 3.17 и 3.18 представлены последовательные картины распространения сейсмических волн. Они отражают структуру волнового поля в моменты времени 250 и 500 мс. Использование упрощенной модели позволило более качественно выделить информативные волны. В качестве иллюстрации на рис. 3.19 и рис. 3.20 представлены наборы теоретических сейсмограмм, полученных для той же цепочки сейсмоприемников. Четко проявляются волны, отраженные от границ раздела между слоями 2 и 3 (обозначено как 1), а также между средами 3 и 4 (обозначено как 2).

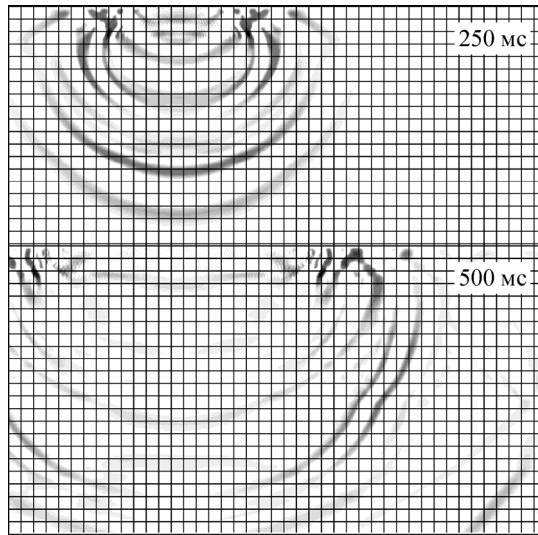


Рис. 3.14. Последовательные картины распространения сейсмических волн ( $Z$ -компонента волнового поля) в моменты времени 250 и 500 мс.

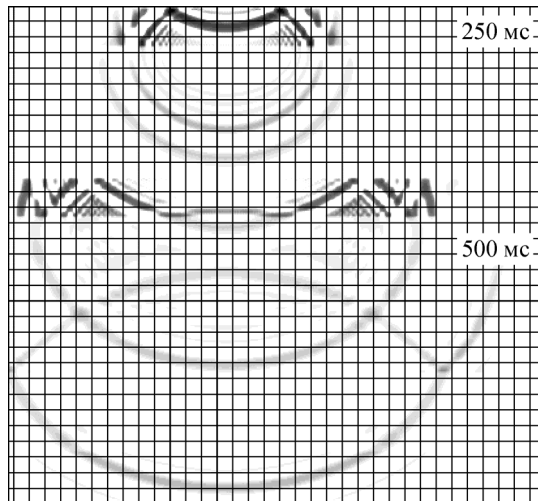


Рис. 3.15. Последовательные картины распространения сейсмических волн ( $Y$ -компонента волнового поля) в моменты времени 250 и 500 мс.

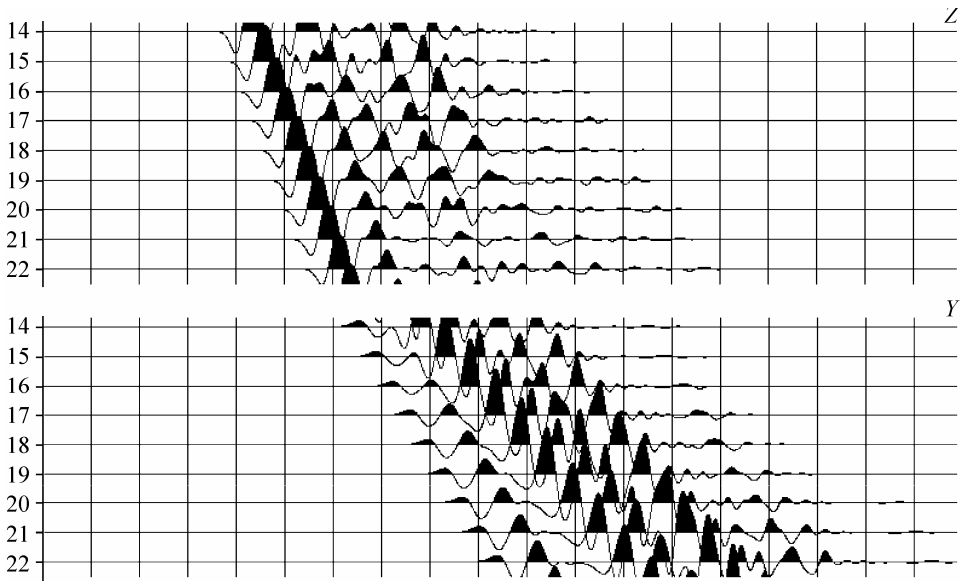


Рис. 3.16. Наборы теоретических сейсмограмм  $Z$ - и  $Y$ -компонент волнового поля, полученных для цепочки сейсмоприемников, расположенных на дневной поверхности вдоль линии исследовательского профиля с шагом 4 м.

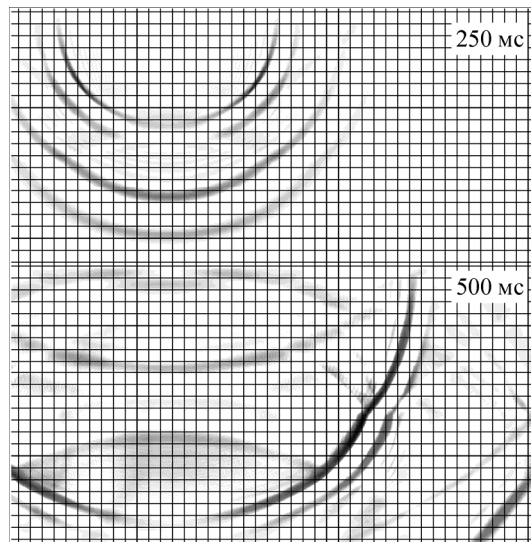


Рис. 3.17. Последовательные картины распространения сейсмических волн ( $Z$ -компонента волнового поля) в моменты времени 250 и 500 мс. Упрощенная модель.

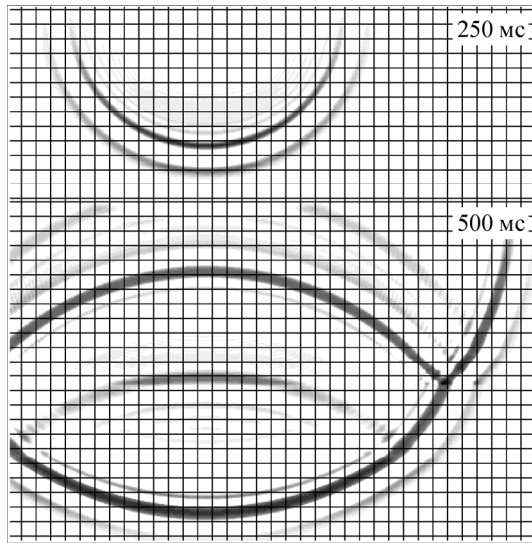


Рис. 3.18. Последовательные картины распространения сейсмических волн ( $Y$ -компонента волнового поля) в моменты времени 250 и 500 мс. Упрощенная модель.

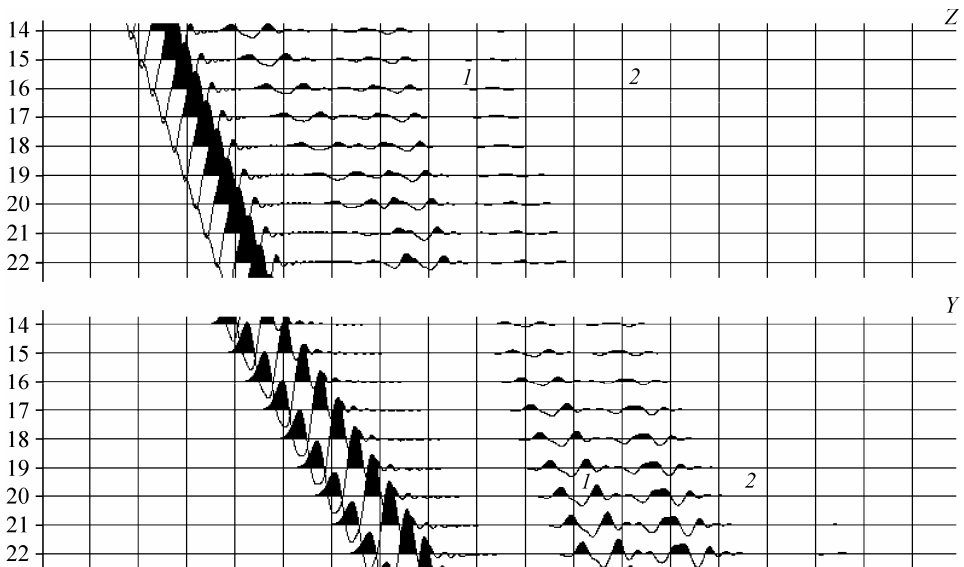


Рис. 3.19. Наборы теоретических сейсмограмм  $Z$ - и  $Y$ -компонент волнового поля, полученных для цепочки сейсмоприемников, расположенных на дневной поверхности вдоль линии исследовательского профиля с шагом 4 м. Упрощенная модель.

1, 2 см. в тексте.

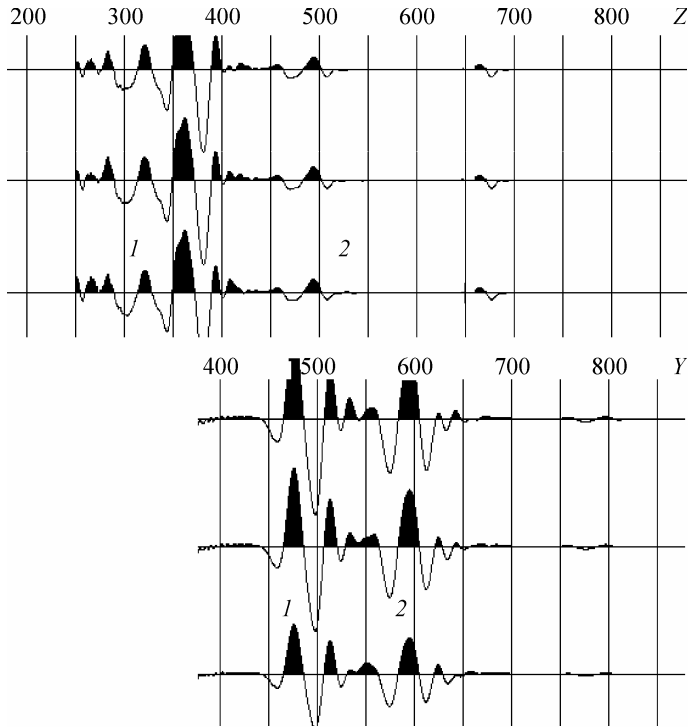


Рис. 3.20. Наборы теоретических сейсмических разрезов ОГТ, рассчитанных на основе использования Z- и Y-компонент волнового поля для упрощенной модели.

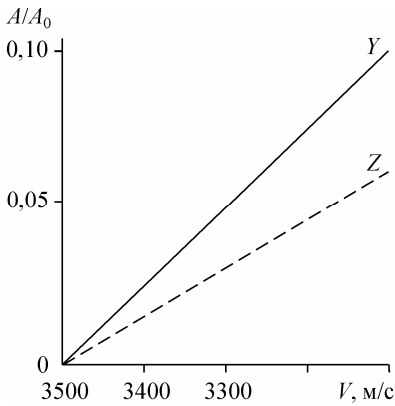


Рис. 3.21. Графики отношений амплитуд отраженных волн к амплитуде возбужденной волны для Z- и Y-компонент волнового поля.

Можно отметить более высокую информативность поперечных волн, формирующих четкие отражения. Расчеты были выполнены для различных вариантов слоя 3. Варьировалась скорость распространения волн сжатия в диапазоне от 3100 до 3500 м/с. Расчеты показали, что амплитуда отраженной от подработанного пласта волны пропорциональна резкости акустических границ. Это находится в соответствии с физикой процесса и с описанными далее результатами, полученными с помощью программы «Synthetic». Результаты расчетов этого параметра для волн различной поляризации приведены на рис. 3.21, где представлены графики отношений амплитуд отраженных волн к амплитуде возбужденной волны в зависимости от скорости продольных волн в подработанном пласте.

Таким образом, расчеты, проведенные на скоростной модели породной среды, подтверждают диагностическую информативность амплитуды отраженных волн в отношении состояния горного массива при изменении в нем физико-механических характеристик одного из структурных слоев. При этом выявляется вдвое большая информативность поперечных волн, возбужденных в направлении, перпендикулярном плоскости исследовательского профиля.

Для сравнения приведем результаты моделирования при использовании программы «Synthetic». На рис. 3.22 даны синтетические сейсмограммы отраженных волн, соответствующие параметрам табл. 3.6. Они иллюстрируют отражающую способность границ слоев среды при уменьшении скорости распространения упругих колебаний в слое 3 до ~12 % от исходного значения 3500 м/с. Такой диапазон представляется вполне возможным в реальных условиях применительно к физико-механическим изменениям в основной кровле угольного пласта при возрастании протяженности ее консольной части.

На рис. 3.23 представлены графики зависимости амплитуды отражений от различных слоев при изменении скорости в слое 3. Значения амплитуд отражений от определенных слоев нормированы к амплитудам этих же отражений при скорости в слое 3 равной 3500 м/с. Приведенные графики свидетельствуют о линейной зависимости возрастания амплитуды отражений при снижении скорости в слое 3 (что строго соответствует описанным выше результатам моделирования). Причем снижение скорости всего на ~3 % (на 100 м/с) вызывает возрастание амплитуды отраженного сигнала до 1,5 раз. Амплитуды сигналов, отраженных от границ с неизменными коэффициентами отражения, остаются практически одинаковыми.

На рис. 3.24 показаны зависимости изменения времени прихода отражений от слоев 4, 5 и 6, нормированные относительно времени прихода отражений при ско-

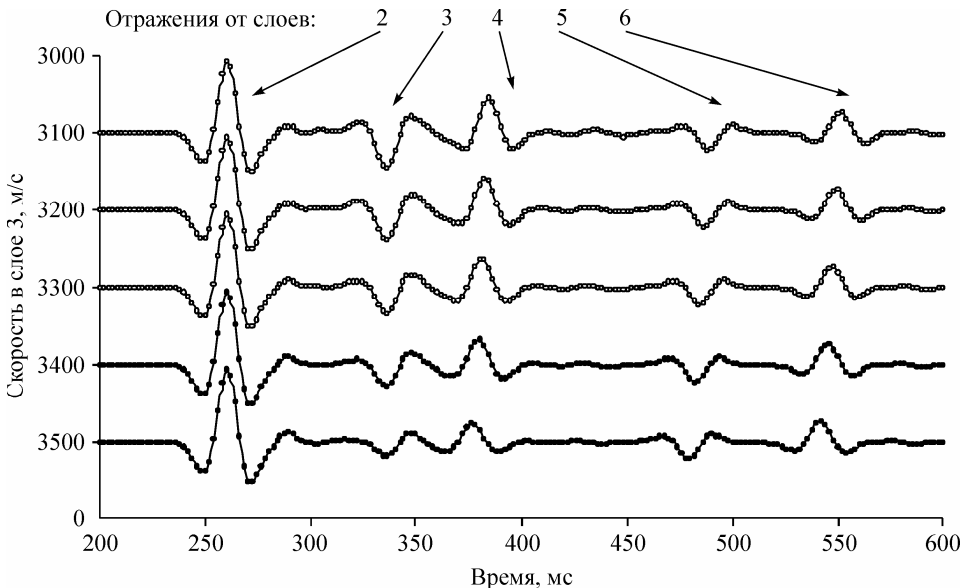


Рис. 3.22. Сейсмограммы отраженных волн в зависимости от скорости в слое 3.



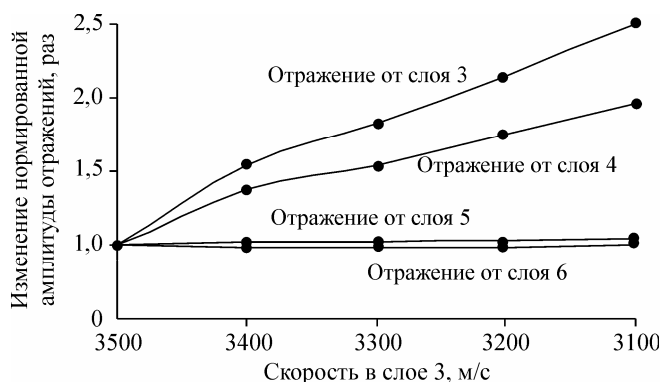


Рис. 3.23. Зависимость амплитуды отражений от изменения скорости в слое 3.

рости в слое 3, равной 3500 м/с. Изменение временных характеристик отражений — порядка 0,5 % при изменении скорости в слое 3 на 3 % свидетельствует о низкой информативности кинематических параметров. Однако эти сигналы проходят через слой, в котором варьирует скорость их распространения. Поэтому можно оценить изменение амплитудных характеристик, соответствующих временному диапазону при одной скорости в слое 3, относительно этих характеристик при изменившейся скорости и, соответственно, при определенном изменении времени прихода отражений. Это возможно путем представления сейсмических сигналов в виде функций абсолютных значений амплитуд и нахождения разностей этих функций. Далее будем называть их разностными сейсмограммами. Результаты сопоставления сейсмических записей (при различных значениях скорости в слое 3) показаны на рис. 3.25.

Особенностями этих разностных сейсмограмм является полное подавление отраженного сигнала от слоя 2 (временной диапазон 200—300 мс) и контрастный характер отражений от 5-го и 6-го слоев. Уменьшение скорости в слое 3 на 12 % вызывает двукратное возрастание разницы амплитуд сигналов во временном диапазоне отражений от 5-го и 6-го слоев (рис. 3.26).

Это также является информативным признаком физико-механических изменений в породной среде, дополняющим показатели изменения абсолютных значе-

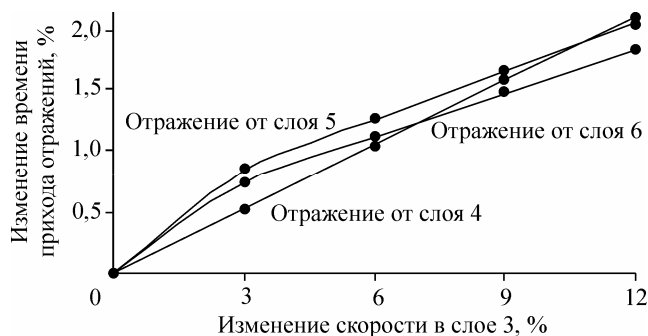


Рис. 3.24. Зависимость времени прихода отражений от скорости в слое 3.

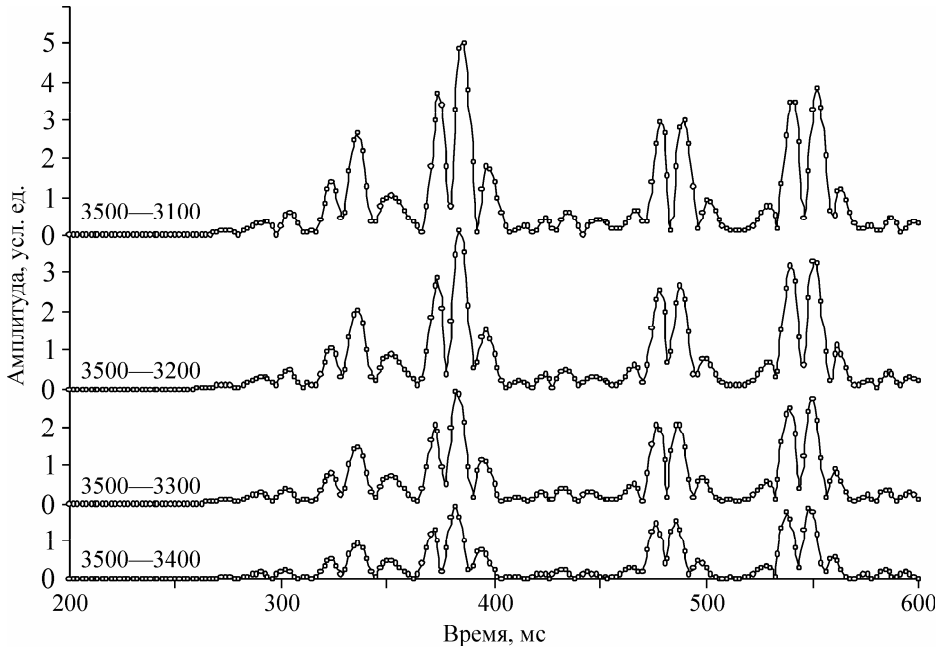


Рис. 3.25. Результаты вычитаний сейсмограмм в виде абсолютных значений амплитуд при изменении скорости в слое 3.

ний амплитуд отражений и позволяющим уточнить местоположение в массиве происходящих трансформаций и их характер. В этом отношении показательны зависимости, характеризующие изменение абсолютных значений амплитуд отражений от слоев при изменении скорости в слое 3 с приведением амплитуд отражений к среднему значению амплитуды сигнала по всей трассе (рис. 3.27).

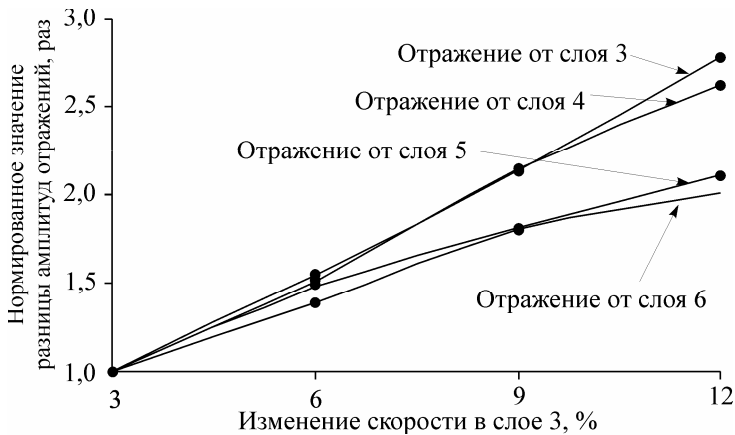


Рис. 3.26. Разница абсолютных значений отражений при изменении скорости в слое 3.

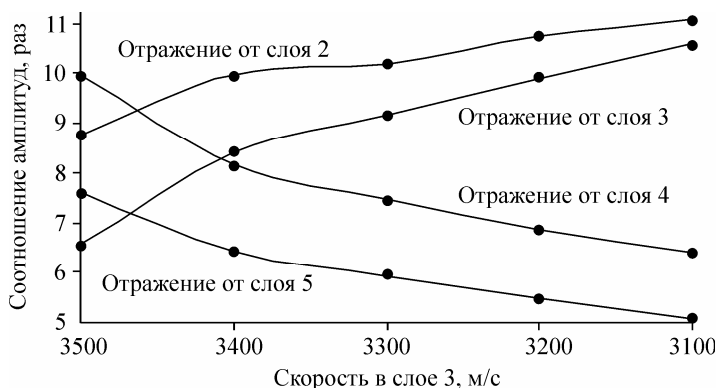


Рис. 3.27. Амплитуды отражений, приведенные к среднему значению амплитуды сигнала по трассе при изменении скорости в слое 3.

Эти зависимости характеризуют изменение амплитуды сигнала, отраженного от слоев, лежащих ниже слоя 3, относительно отражений от вышележащих слоев. С уменьшением скорости в слое 3 возрастают амплитуды сигналов, отраженных от вышележащих слоев. Амплитуда отражений от нижележащих слоев заметно снижается.

Таким образом, первая часть расчетов показала диагностическую информативность динамических и кинематических параметров в отношении состояния горного массива при изменении в нем физико-механических характеристик одного из структурных слоев. Представляют интерес высокая чувствительность динамических показателей сейсмических волн к локальным скоростным изменениям в породном массиве и возможность оценки изменения амплитудных параметров сейсмического сигнала с учетом их фазовых трансформаций во времени при развитии в массиве деформационных процессов. В реальных условиях обработки угольных пластов столь выраженная взаимосвязь динамических параметров отраженных сейсмических волн с характеристиками среды может служить основой получения карт сейсмодеформационных процессов в массиве при площадных схемах мониторинговых наблюдений.

Вернемся к случаю, когда зона аномалии локализована. Интересен вопрос о том, при каких условиях она может быть обнаружена. Проведен комплекс расчетов, в которых использовались модели реальных углевмещающих толщ Донбасса. В моделях варьировались следующие параметры:

- мощность слоя (слоев) песчаника, формирующего информативные волны;
- резкость  $\chi$  акустической границы с отражающим слоем ( $\chi = V_v / V_n$  изменялась от 0,75 до 0,95, где  $V_v$  и  $V_n$  — скорости сейсмических волн сжатия в верхней и нижней породах соответственно);
- глубина залегания слоя (слоев) песчаника (от 300 до 1000 м);
- количество пластов пород выше резкой акустической границы (от 1 до 10), их мощности и свойства;
- резкости акустических границ между пластами пород выше акустической границы, формирующей волну, несущую информацию об аномалии;
- расположение и характеристики неоднородностей.

Изображенная на рис. 3.28 базовая модель описывает толщу глинисто-песчаных пород до глубины 500 м под наносами мощностью 100 м. Однородно-слоистая среда представлена чередующимися слоями мощностью 3—5 длин волн с акустической резкостью границ 0,85—0,95. Отражающая граница с акустической резкостью 0,75—0,90 (плотные песчаники) залегает на глубине 450 м. Зона повышенного горного давления (ПГД) расположена в интервале глубин 250—400 м (участок 50—150 м в длину и 30—60 м в глубину). Физико-механические характеристики пород в зоне отличаются от характеристик вмещающих пород на 5—35 %.

Вертикально направленные источники сейсмических колебаний задавались последовательным набором значений смещений среды в точках расположения пунктов возбуждения. Функция источника представлена несколькими последовательными гармониками с результирующим спектром в диапазоне 0—100 Гц. Последовательно моделировалось возбуждение колебаний в восьми пунктах с шагом 150 м. Система наблюдений сейсмоприемников из 48 штук с шагом 20 м располагалась на расстоянии 75 м от первого пункта возбуждения.

Ряд расчетов был проведен с целью установления предельных значений резкости акустической границы, при которых возможен прогноз аномалий с помощью волн, отраженных от более глубокого горизонта. На рис. 3.29 и 3.30 приведены теоретические сейсмограммы для моделей с отражающей границей с резкостью 0,80 и 0,85. На сейсмограммах присутствуют головные продольные и поперечные волны, а также отраженные от песчаника продольные и обменные волны. Четко прослеживаются зоны влияния аномалии на отраженные волны. При этом на 5—7 % уменьшилась амплитуда соответствующих волновых пакетов, на 2—5 % увеличилась их частота (для оценки степени изменения характеристик волновых пакетов были рассчитаны «эталонные» наборы сейсмограмм для различных вариантов базовой модели).

Глинисто-песчаные породы рассматриваются как однородная среда. Отражающая граница имеет резкость 0,80.

При уменьшении резкости отражающей границы несущие информацию отраженные волны ослабляются относительно доминирующих на сейсмограммах волновых пакетов до величин, сравнимых с погрешностью измерений. Установлено, что отраженная волна имеет амплитуду не менее 10 % от амплитуд доминирующих пакетов при значении  $\chi$  меньше 0,92.

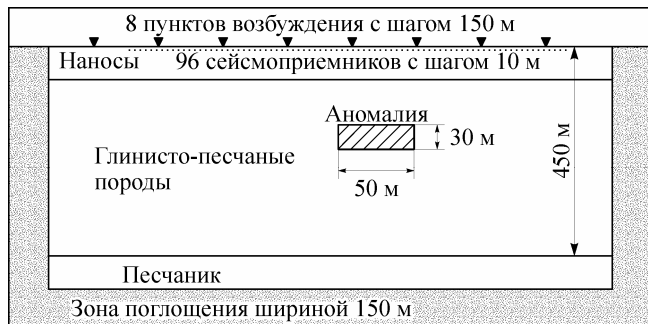


Рис. 3.28. Базовая модель.

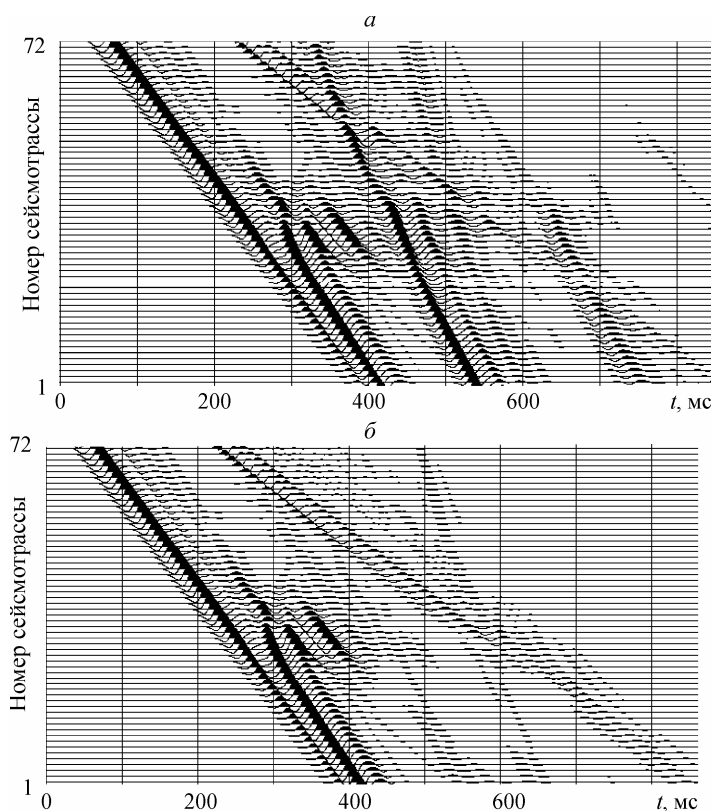


Рис. 3.29. Теоретические сейсмограммы для базовой модели. Глинисто-песчаные породы рассматриваются как однородная среда. Отражающая граница имеет резкость 0,80 (а) и 0,85 (б).

Далее расчеты проводились с целью выделить информативные параметры, свидетельствующие о наличии аномальной зоны и позволяющие описать ее характеристики. К примеру, на рис. 3.30 представлены теоретические сейсмограммы для модели, где однородная толща песчано-глинистых пород располагается сверху плотного песчаника ( $\chi = 0,75$ ) на глубине 450 м. Аномалия залегает на глубине 400 м (ее размеры 100 м×60 м, скорости распространения колебаний увеличены на 20 %). Результаты обобщены в табл. 3.7, где приведены расчеты для различных характеристик и глубин залегания неоднородности. Используемый в таблице параметр  $\Delta M \times l$  (где  $\Delta M$  — изменение скорости продольных волн в неоднородности,  $l$  — размер неоднородности по направлению пересечения ее сейсмическими лучами) характеризует степень влияния аномалии на сигнал. Анализ изменения амплитудных и частотных характеристик (см. табл. 3.7) дает основание сделать вывод о том, что глубина расположения неоднородности слабо влияет на возможность ее описания. Например, для всех рассчитанных моделей аномалия с параметром  $\Delta M \times l = 1200$  независимо от глубины расположения приводит к уменьшению амплитуды регистрируемых отраженных волновых пакетов на 4—8 %. Анализ частотной характеристики связан с выполнением ряда сложных процедур, его результаты неоднозначны.

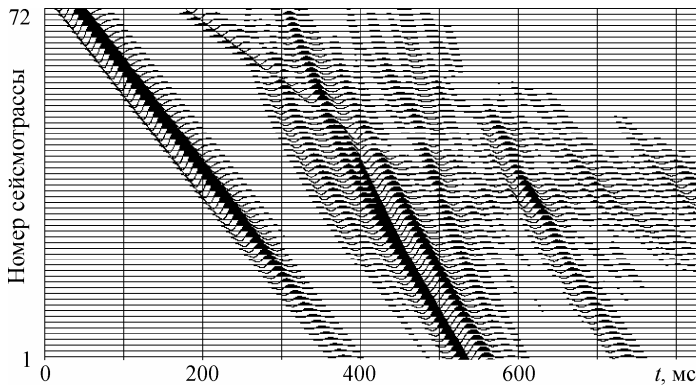


Рис. 3.30. Теоретическая сейсмограмма для базовой модели, где под однородной толщей песчано-глинистых пород на глубине 450 м залегает плотный песчаник.

Ост. поясн. см. в тексте.

На рис. 3.31 представлен набор теоретических сейсмограмм для модели, в которой песчано-глинистые породы представлены чередующимися пластами мощностью по 75 м (показатели акустической резкости границ лежат в пределах 0,92—0,96). Основная отражающая граница ( $\chi = 0,75$ ) располагается на глубине 450 м. Зона ПГД, как и в предыдущем случае, залегает на глубине 250 м и имеет те же характеристики. Приведенный пример показывает, что учет слоистости толщи песчано-глинистых пород над основной отражающей границей не приводит к

Таблица 3.7

Отклонения амплитудных и частотных характеристик отраженных волн для вариантов базовой модели для расположения отражающей границы на глубине 450 м

Глубина залегания аномалии, м	Количество расчетов	$\Delta M \times l, \text{ м}^2/\text{с}$	Уменьшение амплитуды, %
200	9	300	1—2
200	9	600	2—6
200	6	1200	5—8
200	7	1800	7—12
300	3	300	1—3
300	5	600	3—5
300	6	1200	4—8
300	6	1800	7—12
350	6	300	1—2
350	5	600	3—6
350	5	1200	5—8
350	5	1800	7—12
400	7	300	1—2
400	7	600	3—6
400	6	1200	4—7
400	7	1800	7—13

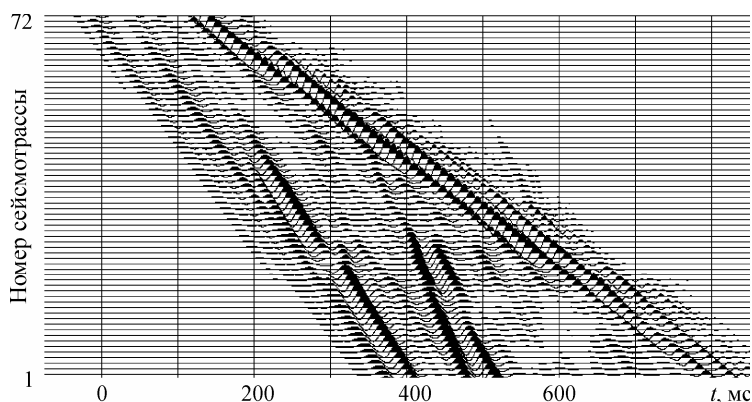


Рис. 3.31. Теоретическая сейсмограмма для базовой модели, в которой песчано-глинистые породы представлены чередующимися пластами мощностью по 75 м (показатели резкости границ лежат в пределах 0,92—0,96).

принципиальным изменениям в структуре волнового поля. На сейсмограммах представлен тот же набор волн, что и в случае, когда песчано-глинистые породы моделируются однородной средой. Это головные продольные и поперечные волны, а также отраженные от песчаника продольные, поперечные и обменные волны. Зона влияния аномалии также присутствует, хотя не так ярко выражена.

Всего при проведении исследований было рассчитано около 150 моделей, в том числе зависимости амплитуды отраженных продольных волн от глубины отражающего горизонта, количества промежуточных акустических границ, а также характеристик аномалии при акустической резкости отражающего горизонта  $\chi = 0,75$  (табл. 3.8) и  $\chi = 0,85$  (табл. 3.9). При проведении анализа использован обобщенный параметр

$$\Omega = \frac{\Delta M \times l}{L\chi},$$

где  $L$  — глубина расположения отражающей границы;  $\Delta M$  — изменение скорости продольных волн в неоднородности;  $l$  — размер неоднородности по направлению пересечения ее сейсмическими лучами;  $\chi$  — акустическая резкость основного отражающего горизонта.

Таблица 3.8

Зависимость амплитуды и частоты отраженных продольных волн от глубины залегания отражающего слоя и характеристик аномалии ( $\chi = 0,75$ )

Глубина расположения отражающего горизонта, м	Количество пород	$\Delta M \times l$ , м × %	$\Omega$ , %	Уменьшение амплитуды, %
1	2	3	4	5
450	3	600	1,78	1—7
450	3	1200	3,56	2—10
450	3	1800	5,33	5—12

1	2	3	4	5
450	3	2400	7,11	10—15
450	3	3600	10,67	12—20
450	6	600	1,78	1—7
450	6	1200	3,56	1—10
450	6	1800	5,33	2—10
450	6	2400	7,11	5—15
450	6	3600	10,67	10—20
750	3	600	1,07	—
750	3	1200	2,13	1—7
750	3	1800	3,20	1—8
750	3	2400	4,27	3—2
750	3	3600	6,40	4—15
750	6	600	1,07	—
750	6	1200	2,13	2—9
750	6	1800	3,20	1—8
750	6	2400	4,27	2—12
750	6	3600	6,40	3—12
1000	3	600	0,80	—
1000	3	1200	1,60	2—4
1000	3	1800	2,40	2—5
1000	3	2400	3,20	2—10
1000	3	3600	4,80	3—12
1000	6	600	0,80	—
1000	6	1200	1,60	—
1000	6	1800	2,40	1—
1000	6	2400	3,20	3—10
1000	6	3600	4,80	3—10

Таблица 3.9

Зависимость амплитуды и частоты отраженных продольных волн от глубины залегания отражающего слоя и характеристик аномалии ( $\chi = 0,85$ )

Глубина расположения отражающего горизонта, м	Количество пород	$\Delta M \times l$ , м $\times$ %	$\Omega$ , %	Уменьшение амплитуды, %
1	2	3	4	5
450	3	600	1,57	1—7
450	3	1200	3,14	2—10
450	3	1800	4,71	2—10
450	3	2400	6,27	10—12
450	3	3600	9,41	10—15
450	6	600	1,57	1—7
450	6	1200	3,14	1—10



1	2	3	4	5
450	6	1800	4,71	1—8
450	6	2400	6,27	—10
450	6	3600	9,41	5—11
750	3	600	0,94	—
750	3	1200	1,88	1—7
750	3	1800	2,82	1—7
750	3	2400	3,76	5—12
750	3	3600	5,65	5—12
750	6	600	0,94	—
750	6	1200	1,88	—
750	6	1800	2,82	1—9
750	6	2400	3,76	3—10
750	6	3600	5,65	4—13
1000	3	600	0,71	—
1000	3	1200	1,41	—
1000	3	1800	2,12	1—7
1000	3	2400	2,82	1—8
1000	3	3600	4,24	2—8
1000	6	600	0,71	—
1000	6	1200	1,41	—
1000	6	1800	2,12	—
1000	6	2400	2,82	2—9
1000	6	3600	4,24	2—9

Анализ представленных данных позволил предположить, что именно этот параметр определяет границы применимости сейсморазведки на отраженных волнах для прогноза аномальных зон. Если  $\Omega > 5$ , то изменение амплитуды отраженной волны достигает 10 % и аномалия теоретически может быть выявлена в результате обработки материалов прогноза.

### **3.5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА НАД ОЧИСТНЫМИ РАБОТАМИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Наиболее широко практикуемый сейсмоакустический метод прогноза зон возможных газодинамических явлений, основанный на статистической обработке сейсмоакустической эмиссии горного массива, за долгие годы его использования не показал достаточной эффективности, и в настоящее время нет убедительных оснований говорить о возможном его принципиальном совершенствовании.

Объективная оценка особенностей трансформации во времени физико-механического состояния породной толщи с учетом большого диапазона глубин отработки полезных ископаемых и необходимости контроля значительных территорий возможна на основе использования динамических и кинематических показателей

искусственных и естественных упругих волновых полей [4, 71, 72, 76—78], насыщенная параметризация которых позволяет не только контролировать изменение полей напряжений в горном массиве, но и устанавливать тенденции формирования условий возможных геодинамических проявлений.

### **3.5.1. Экспериментальные исследования по активному сейсмическому мониторингу горного массива над очистными работами**

Для изучения характера и степени проявления в параметрах отраженных сейсмических волн изменения во времени напряженного состояния горного массива над областью очистных работ были проведены мониторинговые сейсмические наблюдения над действующим очистным забоем шахты «Красноармейская-Западная № 1» (6-я южная лава блока 6, угольный пласт  $d_4$  мощностью ~2 м на глубине 600 м). Наблюдения проводились с сейсмическим зондированием массива в фиксированных пунктах на земной поверхности (с первоначальным положением проекции линии очистного забоя на земную поверхность примерно в 20 м до пункта зондирования) импульсным сейсмическим сигналом (механический ударный источник возбуждения упругих волн) с ориентацией на отраженные по нормали продольные волны (база между пунктами возбуждения и приема сейсмического сигнала составляла 3 м при их расположении в скважинах на глубине ~1,2 м) с цикличностью замеров 12—14 дней.

Для оценки энергетических показателей сейсмических волн, сопоставления показателей последующих наблюдений с показателями предыдущих наблюдений сейсмическая запись (сумма 60 последовательных возбуждений) нормировалась по максимальному значению амплитуды прямого сигнала. Такая процедура позволяет уравнивать сейсмические записи последующих и предыдущих циклов по энергии прямого сигнала и, тем самым, корректно сопоставлять энергетические показатели отраженных волн независимо от мощности источника возбуждения в разных циклах наблюдений. Пример общего вида сейсмических записей отраженных волн во временном диапазоне 100—500 мс для трех циклов наблюдений (в первом цикле проекция линии очистного забоя на земную поверхность находилась в 20 м до пункта зондирования, во втором цикле проекция примерно совпадает с пунктом зондирования, и в третьем цикле проекция находилась за пунктом зондирования примерно в 10—12 м) представлен на рис. 3.32 в виде абсолютных значений амплитуд.

Достаточно выраженная хаотичность трансформации по циклам наблюдений волновой структуры сейсмических записей (см. рис. 3.32) во временном диапазоне 200—350 мс (временной диапазон 200—350 мс сейсмического сигнала, в соответствии со скоростными значениями слагающих пород по данным ближайшей разведочной скважины, отражает область глубин ~300—600 м) свидетельствует об активности и сложности геомеханических процессов в породной толще.

На рис. 3.33 показан характер изменения энергетических показателей волн во временных диапазонах (200—250, 250—300 и 300—350 мс) сейсмических записей по циклам наблюдений. Оценка этих показателей, начиная с 200 мс, обусловлена возможным проявлением во временном диапазоне до 200 мс кратных волн, которые применительно к оцениваемым отражениям являются помехами.

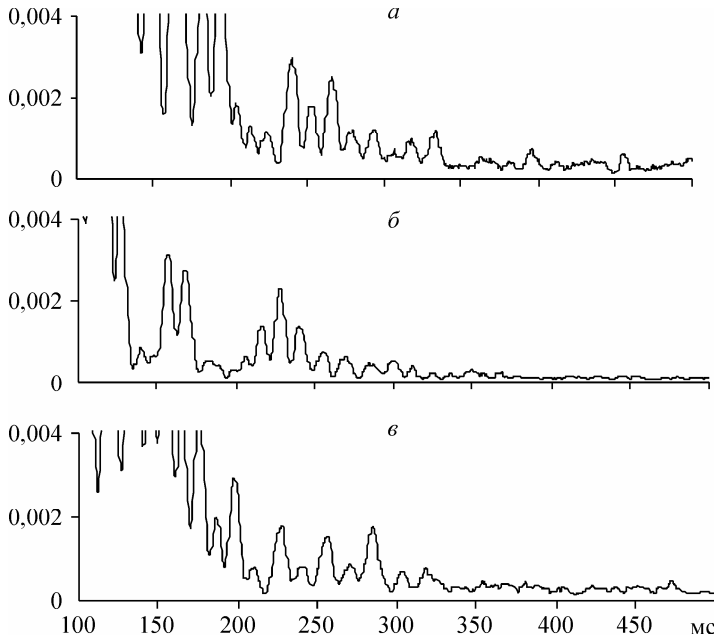


Рис. 3.32. Нормированные сейсмограммы отраженных волн (в абсолютных значениях амплитуд) по трем циклам (а, б, в соответственно) сейсмического мониторинга над 6-й южной лавой блока 6 шахты «Красноармейская-Западная № 1».

Существенное понижение энергетических показателей (до 2,5 раз) во временных диапазонах отражений 250—300 мс и 300—350 мс ко второму циклу наблюдений свидетельствует о достаточно масштабных структурных изменениях в массиве со снижением напряжений вследствие разгрузочных процессов в основной кровле (обрушение ее консольной части).

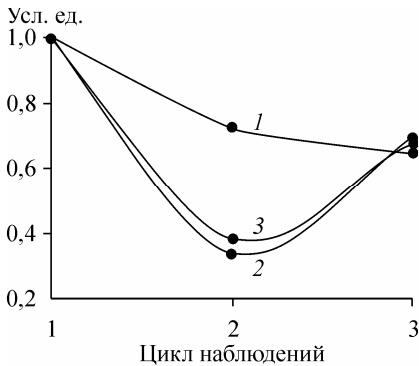


Рис. 3.33. Изменения энергетических показателей отраженных волн во временных диапазонах (200—250 (1), 250—300 (2) и 300—350 мс (3)) по циклам режимных наблюдений.

Повышение энергетического уровня отражений в третьем цикле наблюдений в рассматриваемых временных диапазонах может быть связано с возрастанием напряжений в породной толще в следующем цикле увеличения протяженности консольной части основной кровли.

Менее выраженное (в 1,3 раза) понижение энергетического уровня отраженных волн во временном диапазоне 200—250 мс обусловлено тем, что этот временной диапазон соответствует в основном отражениям от границы коренных пород, и изменения энергетического показателя в рассматриваемом диапазоне связаны с рас-

тягивающими напряжениями в покровной толще (мощность покровных отложений на исследуемом участке ~90 м).

Значительность диапазона изменения энергетических показателей отраженных волн свидетельствует о высокой информативности этого показателя в отношении происходящих в подрабатываемом массиве изменений напряжений (с понижением их после разгрузки породной толщи до 2,5 раз и последующим повышением до 2 раз).

Подверженность изменению в зависимости от состояния геосреды испытывают также спектральные параметры отраженных волн. Среднее значение частоты области максимальной энергии спектра (частотный диапазон, охватывающий амплитудные составляющие до уровня 0,6 максимальной составляющей спектра), определяемой обобщенными физико-механическими характеристиками всей подрабатываемой породной толщи, включая покровные отложения, понижается к третьему циклу наблюдений примерно на 8 % (рис. 3.34, *а*). Более показательно происходит снижение энергетических показателей спектра отражений. Значение энергетического показателя области основной энергии спектра (рис. 3.34, *б*) снижается от первого до третьего цикла наблюдений в 1,33 раза, а снижение энергетического показателя высокочастотной (35—45 Гц) области спектра (рис. 3.34, *в*) достигает 2,5 раз. Столь значительный градиент этого показателя определяет его высокую чувствительность в отношении происходящих в исследуемой среде физико-механических изменений. Характер изменения спектральных показателей отраженных волн сходен с характером изменения энергетического показателя отраженных волн во временном диапазоне до 250 мс (см. рис. 3.33), и это обстоятельство дает основание предположить, что изменения спектральных характеристик отражений в большей степени обусловлены преобразованиями в покровной толще, которые, в свою очередь, вызваны проявлением в ней постепенно развивающихся растягивающих напряжений при вертикальных деформациях подрабатываемого массива.

Для изучения особенностей проявления в параметрах сейсмических сигналов происходящих в результате подработки изменений напряженного состояния покровных отложений в 2008 г. были проведены режимные экспериментальные наблюдения над 1-й северной лавой блока 3 (угольный пласт  $d_4$  мощностью ~1,5 м на

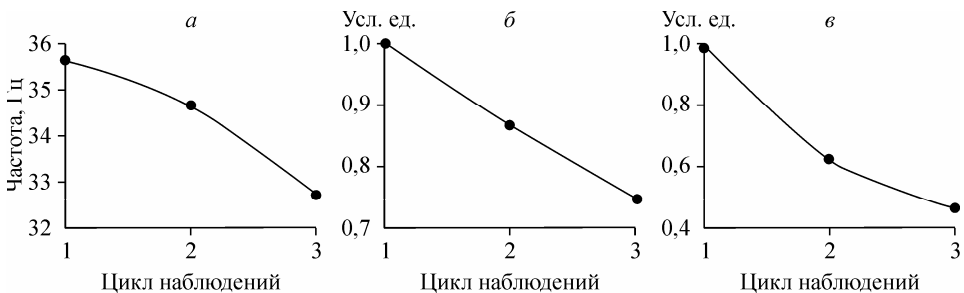


Рис. 3.34. Графики изменения параметров области основной энергии спектра отраженных волн: среднего значения частоты (*а*), энергетического показателя (*б*), энергетического показателя высокочастотной части (*в*).

глубине ~570 м при пологом залегании) шахты «Красноармейская-Западная № 1». Наблюдения выполнялись на прямолинейном профиле, разбитом на четыре интервала зондирования протяженностью по 50 м (рис. 3.35). Такая база была выбрана с учетом необходимости временного разделения различных групп волн (головных, отраженных от границы коренных пород, рефрагированных и других) с тем, чтобы обеспечилась возможность изучения кинематических параметров и энергетических показателей этих волн.

Упругие колебания возбуждались и принимались в забоях скважин на глубине около 1,2 м с сохранением неизменности условий зондирования для всех циклов наблюдений (четыре цикла, выполненных 02.10.08, 14.10.08, 17.10.08 и 23.10.08). Для каждого пункта возбуждения, помимо основного пункта приема (на базе 50 м), был задействован дополнительный пункт на базе 3 м, прямой сигнал кото-

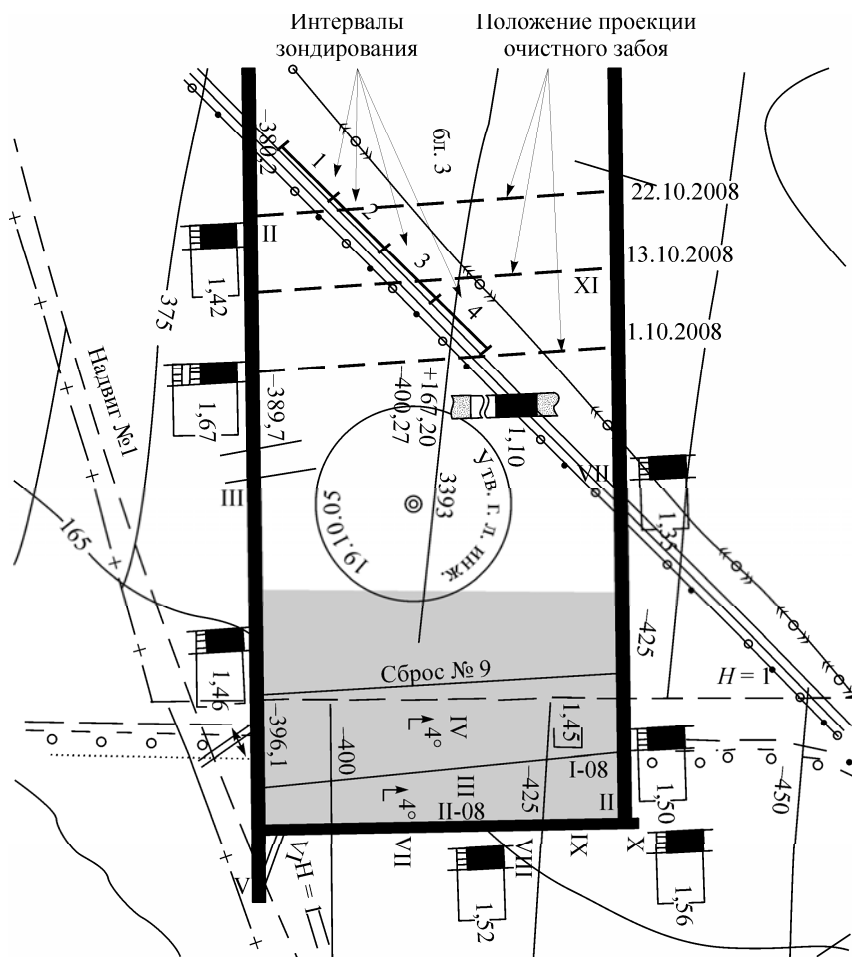


Рис. 3.35. Схема объекта экспериментальных исследований (с совмещением плана поверхности с планом горных работ) над 1-й северной лавой блока 3 шахты «Красноармейская-Западная № 1» (масштаб 1 : 5000).

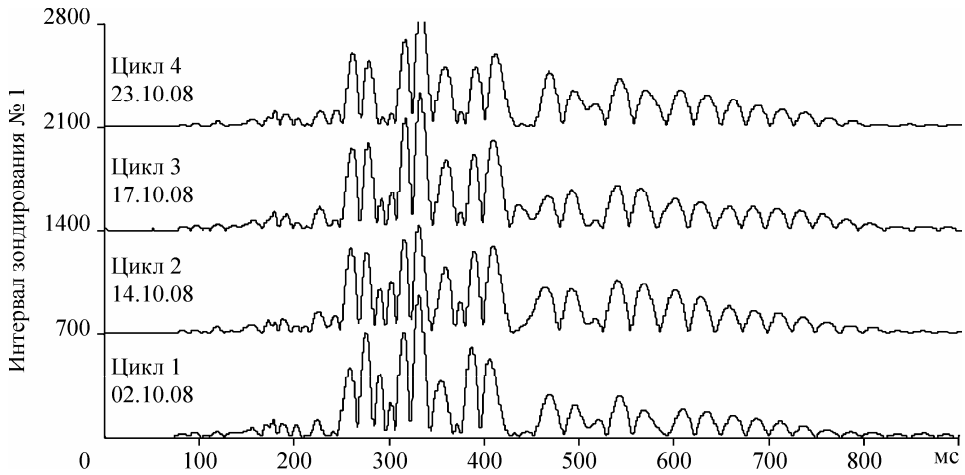


Рис. 3.36. Пример сейсмических записей (в виде абсолютных значений амплитуд) режимных наблюдений на интервале зондирования № 1.

рого использовался для последующего нормирования сигналов основного пункта приема по мощности колебаний в источнике.

Сейсмическая информация регистрировалась в цифровом виде (сейсмостанцией REZ-2Т) с многократным (до 60 раз) суммированием сигналов.

На рис. 3.36 в качестве примера приведены сейсмограммы (в виде абсолютных значений амплитуд), полученные по четырем циклам наблюдений на первом интервале зондирования (см. рис. 3.35). Сейсмические записи представлены различными группами волн (головные, отраженные от границы коренных пород и суперпозиция рефрагированных, поверхностных, обменных и кратных волн) и характерны визуальной коррелируемостью (по фазовым и амплитудным показателям) волновых структур сигналов всех циклов наблюдений. Вместе с тем, детальный анализ показывает, что в процессе режимных наблюдений по мере продвижения линии очистного забоя (см. рис. 3.35) в сейсмических сигналах происходили опре-

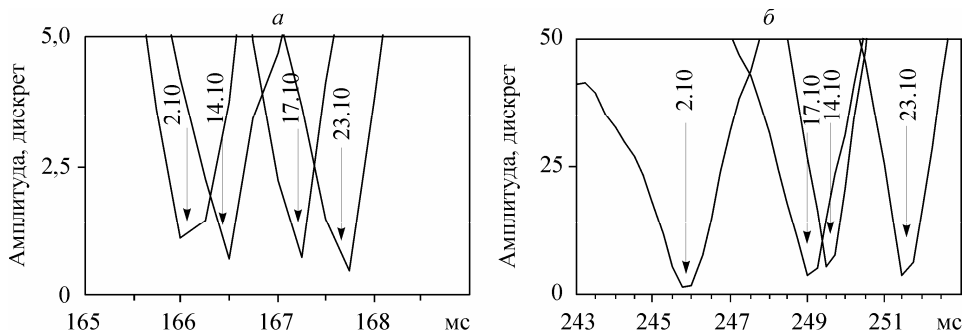


Рис. 3.37. Фрагменты сейсмических записей на интервале зондирования № 1 (с совмещением по циклам наблюдений) во временном диапазоне вступления отражений от границы коренных пород (а) и во временном диапазоне вступления рефрагированных волн (б).

деленные фазовые изменения, обусловленные изменением скорости распространения в покровной толще различных волн. В меньшей степени эти изменения проявляются для волн, отраженных от границы коренных пород, диапазон фазового смещения для которых составляет порядка 1 % (рис. 3.37, *a*). Для вступлений рефрагированных волн (рис. 3.37, *б*) этот показатель примерно вдвое больше.

На рис. 3.38 показаны графики изменения времени вступления рефрагированных волн в процессе режимных наблюдений по всем четырем интервалам зондирования (графики 2 и 4 рис. 3.38 соответствуют правой оси ординат). Определенные различия времени вступления рефрагированных волн в первом цикле наблюдений (см. рис. 3.38), помимо различий в базах зондирования (до 2 м), могут быть обусловлены неоднородностью напряженного состояния горного массива вблизи крупного тектонического нарушения (Удачинский надвиг № 1 на рис. 3.35), а также различием геомеханических проявлений подработки в покровной толще на момент наблюдений.

Происходящее на двух первых интервалах зондирования (см. рис. 3.38, графики 1 и 2) возрастание ко второму циклу наблюдений (14.10.08) времени прихода рефрагированных волн указывает на развитие растягивающих напряжений на этих участках, находящихся впереди проекции линии очистного забоя на земную поверхность. Возрастание скорости на интервале № 1 между вторым и третьим циклами наблюдений отражает резкое изменение геомеханической ситуации в массиве с его разгрузкой до земной поверхности и на десятки метров по ходу очистного забоя. Такого рода разгрузка может быть вызвана только масштабным обрушением консольной части пород, которая до обрушения предопределяет не только повышенные напряжения в породном массиве вплоть до покровных отложений, но и переход стадии упругих деформаций в покровных отложениях (растягивающих напряжений) к образованию в них трещиноватости. Об этом свидетельствуют и последующие, после второго цикла наблюдений, высокие значения времени распространения рефрагированных волн на первом интервале зондирования и их дальнейший рост после третьего цикла наблюдений.

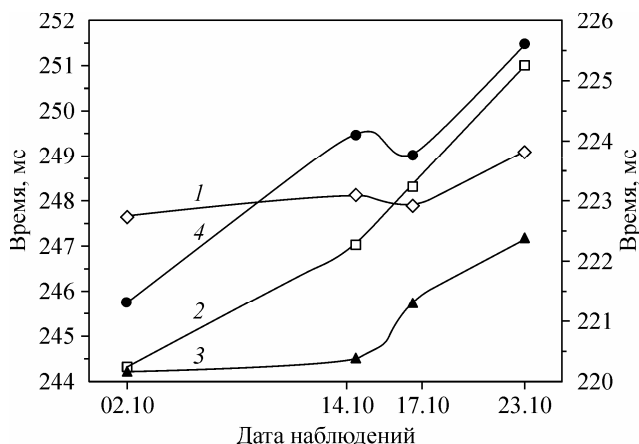


Рис. 3.38. Характер изменения времени вступления рефрагированных волн по четырем интервалам зондирования (графики 1—4 соответственно) в процессе режимных наблюдений.

Растягивающие напряжения в разной степени проявляются также и на интервалах зондирования № 2 и № 3 с активизацией процессов трещинообразования после второго цикла наблюдений.

На четвертом интервале зондирования, при незначительности (0,5 %) изменения времени распространения рефрагированных волн (см. рис. 3.38, график 4), тем не менее, после второго цикла наблюдений происходит понижение (на 0,1 %) временного показателя рефрагированных волн с последующим (после третьего цикла наблюдений) его повышением. Возможно, это связано с определенными горизонтальными смещениями верхней части массива и частичным закрытием трещин в покровной части среды на этом участке.

Возрастание напряжений в покровных отложениях на всех интервалах зондирования ко второму циклу наблюдений подтверждается и характером изменения видимых частот вступлений (первой фазы) рефрагированных волн (рис. 3.39). Этот показатель идентично возрастает на первых трех интервалах зондирования с увеличением значения частоты в пределах 10—15 %. Примерно так же идентично происходит после второго цикла наблюдений и резкое понижение (в пределах 6—10 %) частотного показателя по рассматриваемым интервалам. Эта стадия резкого снижения частот представляется достаточно показательной в отношении произошедших в массиве значительных геодинамических преобразований с разгрузкой всей породной толщи, включая покровные отложения, в которых и распространяются рефрагированные волны. Примечательно, что значение частотного показателя на первом интервале зондирования (наиболее удаленном от проекции линии очистного забоя на земную поверхность) после разгрузки немногим (на 1,2 %) отличается от его значения в первом цикле наблюдений — что, возможно, свидетельствует об упругом характере деформаций на этом интервале.

Изменения частотного показателя рефрагированных волн на четвертом интервале зондирования (см. рис. 3.39, график 4) менее выражены и характер этих изменений иной, чем на первых трех интервалах, — что, возможно, связано с постепенным затуханием деформационных процессов над отработанным участком угольного пласта.

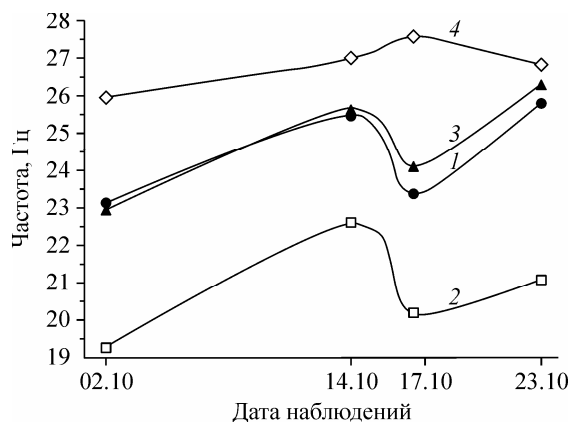


Рис. 3.39. Характер изменения видимых частот вступлений рефрагированных волн по интервалам зондирования (графики 1—4 соответственно) в процессе режимных наблюдений.



Последующее после разгрузки массива (после третьего цикла наблюдений) повышение частоты рефрагированных волн на первых трех интервалах зондирования может быть вызвано продолжением действия растягивающих напряжений в покровных отложениях (вследствие постепенной просадки массива) с сохранением в них определенной упругости и при отсутствии существенных геомеханических изменений над очистной выработкой. Это отсутствие достаточно убедительно проявляется в характере изменения энергетических показателей головных, отраженных от границы коренных пород, рефрагированных совместно с поверхностными и кратными волнами (рис. 3.40).

Наиболее ярко проявляются изменения напряжений в покровной толще в энергетических показателях низкоскоростных (около 100 м/с) кратных волн (см. рис. 3.40, 4), распространяющихся между земной поверхностью и границей коренных пород вследствие многократных отражений от этих границ. Возрастание энергетических показателей этих волн на втором интервале зондирования (см. рис. 3.40, б) ко второму циклу наблюдений составляет 3,3 раза с последующим спадом в 3 раза, а на третьем интервале зондирования (см. рис. 3.40, в) возрастание превышает 6 раз с последующим спадом до 10 раз. При этом на первом интервале зондирования (см. рис. 3.40, а) возрастание энергии кратных волн не превышает 1,7 раза, и последующий характер изменения этого параметра совершенно иной, чем на втором и третьем интервалах, равно как и характер изменения на первом интервале энергетических показателей головных (см. рис. 3.40, 1), отраженных от границы коренных пород (см. рис. 3.40, 2) и рефрагированных совместно с поверхностными (см. рис. 3.40, 3) волнами. Эти различия указывают на приуроченность геомеханической активности в горном массиве именно к области очистной выработки, непосредственно над которой в энергетических показателях сейсмических сигналов наиболее ярко проявляются накопление в консольной части пород основной кровли значительного энергетического потенциала и последующая динамическая (с обрушением породной консоли) разгрузка массива.

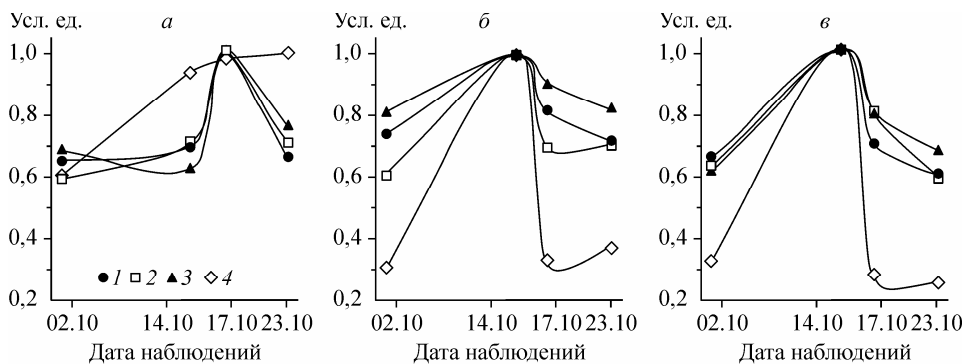


Рис. 3.40. Характер изменения энергетических показателей сейсмических волн в процессе режимных наблюдений на интервалах зондирования 1, 2 и 3 (а—в соответственно).

Временные диапазоны расчета энергетических показателей. Интервал зондирования № 1: 1 — 0—166 мс, 2 — 166—250 мс, 3 — 250—430 мс, 4 — 430—800 мс; интервал зондирования № 2: 1 — 0—153 мс, 2 — 153—220 мс, 3 — 220—500 мс, 4 — 500—800 мс; интервал зондирования № 3: 1 — 0—160 мс, 2 — 160—245 мс, 3 — 245—500 мс, 4 — 500—800 мс.

Значительность диапазона изменения энергетических параметров сейсмических волн на стадии роста напряжений в массиве определяет высокую информативность этих показателей в отношении возможного формирования геодинамической опасности над очистной выработкой. Идентичность изменения этих показателей в процессе режимных наблюдений для различных типов сейсмических волн подтверждает их (показателей) однозначность в отношении протекающих в горном массиве геомеханических процессов и, соответственно, объективность диагностической оценки состояния подрабатываемой среды.

### **3.5.2. Экспериментальное исследование пассивных сейсмических полей над очистными работами**

Определяющая роль консольной части пород основной кровли угольного пласта в геомеханических процессах над очистной выработкой обуславливает необходимость оценки состояния консоли в процессе ведения очистных работ. Эта консоль, являясь упругой механической системой, очевидно, обладает собственными изгибными колебаниями, параметры которых (частота, энергия и затухание) определяются физико-механическими характеристиками консоли. Механизмом инициирования этих колебаний может служить импульсный характер утраты несущей способности краевой частью пласта при достижении ею критической нагрузки со стороны непосредственной кровли. Происходящее при этом разрушение пласта (на небольшую глубину порядка 0,1—0,2 м) проявляется в локальной по протяженности очистного забоя просадке непосредственной кровли с передачей от нее импульсного воздействия основной кровле.

Определенные тенденции изменения частоты и энергии изгибных колебаний основной кровли во времени могут являться диагностическими показателями формирования опасной геодинамической ситуации в отношении возможного локального обрыва консоли основной кровли с динамическим воздействием на пласт. Следует отметить, что каждое единичное проявление мощного колебательного воздействия породной консоли на краевую область пласта может служить причиной деструкции локальной области пласта с высвобождением порового метана и образованием частично разрушенного угля при высоком давлении метана. С учетом потенциальной опасности этих областей в отношении выбросов угля и газа, контроль состояния консольной части породного массива представляется достаточно важным и необходимым элементом системы мониторинга геомеханических процессов в области очистных работ.

Наличие низкочастотных сейсмических проявлений в горном массиве над очистными работами было установлено в 2007 г. при проведении целенаправленных режимных исследований над 6-й южной лавой шахты «Красноармейская-Западная № 1». Для приема сейсмических сигналов использовались пьезоэлектрические преобразователи акселерометрического типа А1612 (ЗАО «Геоакустика», Россия) с частотным диапазоном 0,2—400 Гц. Регистрация сейсмической информации производилась цифровой сейсмостанцией REZ-2Т (УкрНИМИ).

На рис. 3.41 представлены фрагменты сейсмических записей (в абсолютных значениях амплитуд) зарегистрированных низкочастотных сейсмических явлений. Амплитудные показатели низкочастотных колебаний значительно превосходят

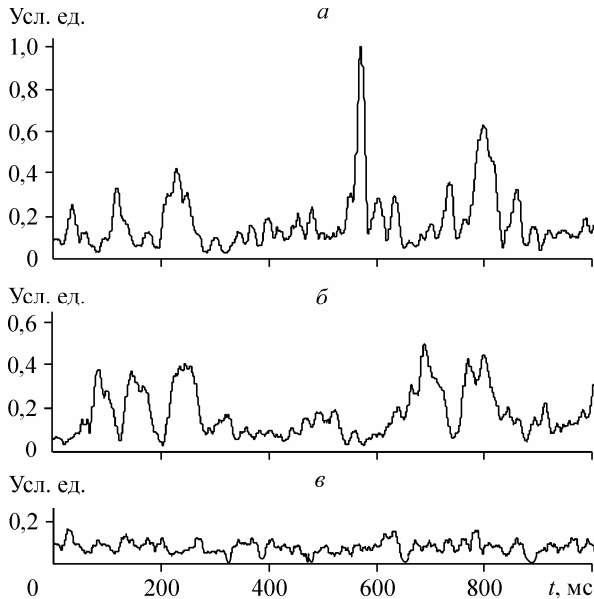


Рис. 3.41. Фрагменты сейсмических записей (в абсолютных значениях амплитуд) низкочастотных сейсмических колебаний (*а* и *б*) и микросейсм (*в*) над 6-й южной лавой шахты «Красноармейская-Западная № 1».

уровень микросейсм (см. рис. 3.41, *в*), а импульсный характер их проявления свидетельствует о динамической природе их возникновения. Достаточно высокая энергия низкочастотных сейсмических явлений позволяет уверенно идентифицировать их на фоне микросейсм и анализировать их энергетические и спектральные параметры. Спектр этих колебаний, обобщенный по множеству их записей (рис. 3.42), характерен концентрацией основной энергии сигналов в частотном диапазоне от нескольких до 10—12 Гц. С учетом спада амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сейсмостанции REZ-2Т в области низких частот (начиная с 10 Гц, спад АЧХ составляет 6 дБ на октаву) реальный уровень низкочастотных сейсмических явлений

превышает уровень микросейсм более чем на порядок и отражает масштабность геомеханических процессов над очистными работами.

Низкочастотность сейсмических явлений свидетельствует о массивности колебательной системы, каковой является консольная часть породной толщи. Ее мощное и продолжительное воздействие на пласт и без динамических проявлений служит причиной возникновения деструктивных зон, потенциально опасных в отношении газодинамических явлений.

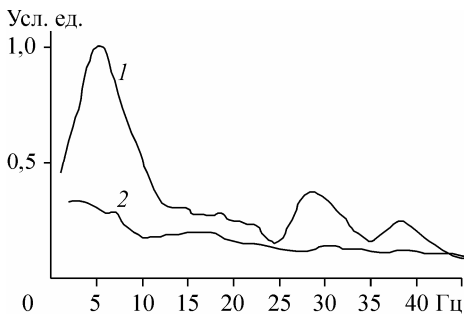


Рис. 3.42. Обобщенные спектры низкочастотных сейсмических колебаний (*1*) и микросейсм (*2*) над областью очистных работ.

Локальный экстремум на спектре в области 30 Гц, соответствующий по частотному диапазону отраженным волнам в данных условиях с глубин 400—600 м, может являться проявлением сигнала от добычного оборудования (угольный комбайн, скребковый конвейер и др.), и это обстоятельство свидетельствует о том, что возникновение низкочастотных колебаний в консольной части пород основной кровли происходит в процессе выемки угля. Подтверждением этому служит отсутствие в этом диапазоне сейсмических проявлений в спектре микросейсм (см. рис. 3.42) при отсутствии добычных работ.

Установленное наличие низкочастотных сейсмических явлений в подрабатываемом массиве подтверждает правоту и обоснованность предложенной концепции развития геомеханических процессов над очистными работами с определяющей ролью в этих процессах консольной части породной толщи над обрабатываемым пластом.

### **3.5.3. Экспериментально-методические основы диагностического сейсмического мониторинга горного массива над очистными работами**

В методическом плане диагностический сейсмический мониторинг подразумевает комплексные режимные наблюдения над очистной выработкой, основанные на использовании активных и пассивных сейсмических полей для контроля состояния подрабатываемого массива с прогнозной оценкой возможного формирования геомеханической ситуации, опасной в отношении геодинамического проявления разгрузочных процессов в породной толще.

Методическое обеспечение, ориентированное на использование активных сейсмических полей, предусматривает определенную во времени последовательность реализации методических решений по зондированию контролируемого массива отраженными волнами и зондирование верхней части массива (покровной толщи) проходящими (рефрагированными и кратными) волнами с накоплением необходимого комплекса параметрических показателей сейсмических волн, обеспечивающих однозначность, достоверность и своевременность прогностической оценки тенденций, происходящих в массиве геомеханических преобразований.

Исходя из геомеханической модели с определяющей ролью формирования геодинамической ситуации в горном массиве консольной частью пород основной кровли, сеть расположения пунктов зондирования должна перекрывать область проекции очистных работ на земную поверхность и развиваться в направлении движения очистного забоя с опережением его проекции на земную поверхность на несколько десятков метров. Ввиду возможного зависания консольной части пород позади линии очистного забоя необходимо предусматривать пункты зондирования до 30—50 м позади проекции забоя.

Для снижения степени проявления поверхностных волн-помех во временном диапазоне сейсмического сигнала, минимизации длительности прямого сигнала и предпочтительности ориентации на отражения по нормали от слагающих толщу породных слоев, необходимо проводить зондирование на базе 2—3 м (расстояние между источником и приемником сейсмического сигнала). Пункты зондирования следует размещать с учетом угла падения пород с тем, чтобы точки отражений

приходились на область горного массива, подверженного активному влиянию области очистных работ.

По ширине проекции области очистных работ следует равномерно размещать несколько пунктов зондирования на смежных расстояниях в несколько десятков метров с учетом возможности одновременного зондирования и на базе в несколько десятков метров применительно на ориентацию регистрации отраженных, кратных, рефрагированных и головных волн.

Общая сеть зондирования должна включать не менее трех пар пунктов зондирования, из которых одна пара располагается позади линии проекции очистного забоя, а две пары — впереди проекции. По мере продвижения очистного забоя и с учетом скорости его продвижения впереди проекции забоя должны размещаться новые пункты зондирования.

Для повышения эффективности возбуждения упругих колебаний по энергии и спектру необходимо точку возбуждения располагать под областью рыхлых грунтов на глубине до 1,5 м. Приемники упругих колебаний также необходимо располагать в скважинах, как для исключения влияния ветровой помехи, так и для устранения влияния рыхлой приповерхностной области на спектральные и энергетические параметры отраженных волн. Во всех пунктах зондирования необходимо сохранять идентичность условий возбуждения и приема упругих колебаний в продолжение технологического цикла использования пунктов.

Режимные наблюдения следует проводить с периодичностью не более 3—5 сут. с корректировкой периодичности при диагностировании возможного формирования геодинамической опасности.

Для соблюдения достаточного уровня качества сейсмической информации (с превышением полезного сигнала уровня микросейсм не менее чем в несколько раз) необходимо производить зондирование с многократным накоплением регистрируемого сейсмического сигнала.

При обработке сейсмической информации следует использовать операцию нормирования энергетических показателей отраженных сейсмических волн к энергетическим показателям прямого сигнала для того, чтобы минимизировать энергетическое различие возбуждаемых колебаний в различных циклах наблюдений.

При оценке изменений во времени напряжений контролируемой области геосреды следует использовать комплекс оценок тенденций изменения:

энергетических показателей для одних временных диапазонов сейсмических записей во времени;

среднего значения частоты отраженных волн в области максимума энергии спектра в процессе режимных наблюдений;

энергетических показателей спектра отраженных волн в области его максимальных значений в процессе мониторинга;

во времени энергетических показателей высокочастотной части спектра отраженных волн;

скоростных показателей рефрагированных волн (при зондировании на больших базах);

частотных показателей вступления рефрагированных волн;

энергетических показателей головных, отраженных от границы коренных пород, рефрагированных и кратных волн.

Перечисленные показатели характеризуют относительные изменения напряжений в подрабатываемом массиве и при комплексном их использовании позволяют объективно диагностировать состояние контролируемой породной толщи с прогностическими оценками возможного формирования геодинамической опасности.

Итак, в результате проведенных в УкрНИМИ НАН Украины исследований разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать сейсмические поля в углепородном массиве, подверженном техногенному воздействию. Установлена диагностическая информативность динамических и кинематических показателей упругих волн в отношении изменения напряженного состояния горного массива. При этом максимальная приближенность параметров исследуемых моделей к реальным горно-геологическим условиям углевлещающей толщи определяет практическую значимость результатов теоретических исследований.

Экспериментальное режимное изучение параметров активных сейсмических полей при зондировании горного массива с земной поверхности над областью очистных работ подтвердило выводы аналитических исследований и позволило установить показатели отраженных волн, реагирующие на развитие геомеханических процессов в массиве.

Предложенные и апробированные методические решения активного сейсмического мониторинга, алгоритм определения диагностических показателей отраженных волн и анализа энергетических и спектральных характеристик сейсмических сигналов могут служить основой мониторинговой системы контроля состояния подрабатываемого массива.

Результаты исследований пассивных сейсмических полей согласуются с предложенной геомеханической концепцией формирования условий опасной геодинамической ситуации в области очистных работ. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят более полно и комплексно исследовать геомеханические процессы при отработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. *Kendzera A., Omelchenko V.* Seismicity and seismic hazard of the territory of Ukraine // Proc. of the Second International Conference «Science and Technology for Safe Development of Lifeline Systems». — Bratislava, Slovak Republic, 2005.
2. *Старостенко В. И., Кендзера А. В.* Проблемы сейсмической защиты населения и важных объектов в Украине с использованием экологии и окружающей среды. Т. 5. — Днепропетровск: IАРЕ, 2003.
3. *Кендзера А. В.* Состояние и перспективы развития сейсмологической службы в Украине // Сообщения КНУ. Геология. — 2001. — Т. 19.
4. *Анциферов А. В.* Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк: ООО «Алан», 2002.
5. *Анциферов В. А., Тиркель М. Г., Компанец А. И.* Разработка методов и создание систем сейсмодинамического мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов // Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий: Междунар. геотехнический симп. — Южно-Сахалинск, 2007.
6. *Пат. 26957 Украина.* Скважинный источник сейсмических волн / А. С. Трифионов, А. В. Анциферов, В. В. Туманов // Оpubл. 2007. Бюл. № 16.

7. Янукович В. Ф., Азаров М. Я., Алексеев А. Д. и др. Вирішення геоекологічних і соціальних проблем під час експлуатації та закриття вугільних шахт. — Донецьк: ТОВ «Алан», 2002.
8. Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Анциферов В. А. Сейсмическая разведка угленосных массивов. — Донецк: Вебер, 2008.
9. Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Хохлов М. Т. и др. Газоносность угольных месторождений Донбасса. — Киев: Наук. думка, 2004.
10. Захаров В. Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — М.: ФГУП ННЦ ГП-ИГД им. А. А. Скочинского, 2002.
11. Захаров В. Н. Разработка методологии и обоснование критериев прогнозирования состояния горного массива сейсмоакустическими методами при подземной угледобыче: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Люберцы, 2003.
12. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. — М.: Госгортехиздат, 1961.
13. Петухов И. М., Линьков А. М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа / Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. — М.: Недра, 1978.
14. Петросян А. Э., Иванов Б. М. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа // Там же.
15. Николин В. И. Представление (гипотеза) о природе и механизме выбросов угля, породы и газа // Там же.
16. Мирер С. В. Об акустическом контроле напряженности краевой части выбросоопасного пласта // Тр. ВНИМИ. — Л.: 1976. — № 102.
17. Смирнов В. А. Исследование напряженного состояния угольных пластов, опасных по горным ударам, сейсмоакустическим методом // Геофизическое приборостроение. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — Вып. 14.
18. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. — М., 1989.
19. Мирер С. В., Дяконюс В. А. Зависимость акустических характеристик породы от сжимающих нагрузок // Уголь Украины. — 1984. — № 7.
20. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, склонных к горным ударам. — Л., 1988. — 39 с.
21. Хейфец А. Г., Ходжаев Р. Р. Разработка автоматизированного способа прогноза выбросоопасных зон и контроля эффективности способов предотвращения выбросов в подготовительных выработках шахт Карагандинского бассейна // Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — М., 1992.
22. Баймухаметов С. К., Халманов Х. Ж., Бабалиев А. М., Тонких В. И. Методика заблаговременного прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям, по геолого-геофизическим данным пласта и вмещающей толщи // Горная геофизика. — СПб., 1998.
23. Еспалова Р. С., Малыгина Т. М., Винникова И. А. Геолого-геофизический прогноз выбросоопасных пачек угольных пластов // Там же.
24. Бобров А. И., Агафонов А. В., Колчин Г. И., Сапунов М. Л. Комплексные исследования призабойной части угольного пласта // Там же.
25. Журбицкий Б. М., Фоменко Н. Е. Разноволновая томография на шахтах Восточного Донбасса // Там же.
26. Компанец А. И. Выявление опасных зон методом сейсмической локации из забоя одиночной горной выработки // Там же.
27. Тиркель М. Г., Глухов А. А. Томография на отраженных волнах при сейсмическом прогнозе строения горного массива // Проблемы гірського тиску. — Донецьк: ДонНТУ, 2004. — № 12.

28. *Тиркель М. Г.* О границах применения наземной сейсморазведки для прогноза аномалий залегания угольных пластов на основе анализа волн, отраженных от нижезалегających горизонтов / Там же. — № 13.
29. *Пат. 13648 Україна.* Спосіб сейсмічної розвідки на відбитих хвилях / А. В. Андиферов, М. Г. Тіркель, О. І. Компанець // Опубл. 2006. Бюл. № 4.
30. *Laskownika A.* Anomalous behaviour selected parameters of epicentre distribution prior to strong tremors in mines // Горная геофизика. — СПб., 1998.
31. *Скакун А. П., Максимов А. С.* Методика экспресс-оценки удароопасности участков угольных пластов на основе электрометрии с аппаратурой СЭР-1 // Горная геофизика. — СПб., 1988.
32. *Рубан А. Д., Яковлев Д. В.* Подземная геоакустика / Проблемы геоакустики: методы и средства: Тр. V сессии российского акустического общества. — М., 1996.
33. *Рубан А. Д., Круглов Н. Т., Карпинская Ю. А.* Компьютеризированная многоканальная система сейсмоакустического контроля состояния массива // Тр. X Междунар. конф. по механике горных пород. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1993.
34. *Чернов О. И., Пузырев В. Н.* Прогноз внезапных выбросов угля и газа. — М.: Недра, 1979.
35. *Зыков В. С., Лебедев А. В., Сурков А. В.* Предупреждение газодинамических явлений при проведении выработок по угольным пластам. — Кемерово, 1997.
36. *Кузнецов С. В.* Распространение волны разгрузки в призабойной зоне угольного пласта и ее связь с выбросами угля и газа // ФТПРПИ. — 1970. — № 4.
37. *Кнуренко В. А., Рудаков В. А., Егоров П. В. и др.* Региональный прогноз выбросоопасности угольных пластов Кузбасса. — Кемерово, 1997.
38. *Кузнецов С. В., Трофимов В. А.* Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах // ФТПРПИ. — 1999. — № 5.
39. *Временное руководство* по применению профилактической обработки угольных пластов жидкостью для ведения одновременной борьбы с внезапными выбросами угля и газа, горными ударами, газовойделением и угольной пылью. — Кемерово: ВостНИИ, 1966.
40. *А. с. 1384789 СССР.* Способ определения выбросоопасности угольных пластов / М. И. Большинский и др. // Опубл. БИ. — 1988. — № 12.
41. *Фейт Г. Н., Хмара О. И., Хейфец А. Г.* Современный уровень и перспективы развития методов прогноза, контроля и управления состоянием массива горных пород // Проблемы разработки угольных месторождений. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1997. — Вып. 306. — С. 203—211.
42. *Глушко В. Т., Ямицков В. С., Яланская А. А.* Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. — М.: Недра, 1987.
43. *Тарасов Б. Г., Дырдин В. В., Иванов В. В.* Физический контроль массивов горных пород. — М.: Недра, 1994.
44. *Методические указания* по шахтной электроразведке малоамплитудных нарушений угольных пластов / ВНИМИ. — Л., 1986.
45. *Задедиголова М. М., Демин А. М.* Применение радиоволнового метода при изучении деформации горных выработок (Обзор) / ЦНИЭИуголь. — М., 1972.
46. *Уткин А. С.* Прогнозирование нарушенности горных пород (Обзор) / ЦНИЭИуголь. — М., 1973.
47. *Бойко Г. К., Липчанский А. Ф.* Прогнозирование выбросоопасности в проходческих комбайновых забоях // Уголь Украины. — 1986. — № 4.
48. *А. с. 1245715 СССР.* Устройство для прогноза выбросоопасности пластов / Л. Ю. Вьюшков и др. // Опубл. БИ. — 1986. — № 27.
49. *Шульгин Е. И.* Выбор словаря признаков системы распознавания ситуаций при прогнозе выбросоопасности сейсмоакустическим методом // Изв. вузов. Горный журнал. — 1996. — № 1.



50. *Watanabe Y., Nakajima J.* The application of AE techniques as a forecasting method to the rock and gas outburst in coal mine // XIX International, Conference of Research Institutes in Safety in Mines. — Katowice, Poland, 1981.
51. *Brady B. T.* Theory of earthquakes. I. A scale independent theory of rock failure // Pure and Appl. Geophys. — 1974. — V. 112.
52. *Brady B. T.* Prediction of failures in mines — an overview. U.S. Dept. of the Interior / Bu Mines RI 8285. — 1978.
53. *Brady B. T.* Tilt precursors in rock before failure: a laboratory investigation / Bu Mines RI 8101. — 1975.
54. *Шадрин А. В., Зыков В. С.* Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. Обзорная информация / ЦНИЭИуголь. — М., 1991.
55. *Hanson D. R.* Rock stability analysis by acoustic spectroscopy // Mining Engineering. — 1985. — V. 37, N 1.
56. *А. с. 1222853 СССР.* Способ акустического прогноза выбросоопасности угольных пластов и устройство для его осуществления / С. В. Мирер и др. // Оpubл. БИ. — 1986. — № 13.
57. *Зорин А. Н., Ковтун Е. Д., Качан И. И.* Акустический способ контроля выбросоопасности пород при комбайновой проходке // Уголь Украины. — 1987. — № 2.
58. *А. с. 1696729 СССР.* Способ прогноза выбросоопасности в очистном или подготовительном забое / Г. И. Колчин и др. // Оpubл. БИ. — 1991. — № 45.
59. *Бобров И. А.* Совершенствование способа прогноза выбросоопасности по амплитудно-частотным характеристикам акустического сигнала для подготовительных выработок, проводимых буровзрывным способом: Автореф. дисс... канд. техн. наук. — М., 1994.
60. *Методика по прогнозу выбросоопасных угольных пластов по изменению температуры их в призабойной части / Ин-т технической теплофизики АН УССР.* — Киев, 1988.
61. *А. с. 1559205 СССР.* Устройство автоматического контроля выбросоопасности пласта при его выемке / А. М. Александров и др. // Оpubл. БИ. — 1990. — № 15.
62. *Иванов Б. М., Хейфец А. Г., Аюров В. Д.* Автоматизированный способ прогноза выбросоопасных зон угольных пластов на шахтах Донбасса // Прогноз и предотвращение внезапных выбросов при проведении подготовительных выработок на выбросоопасных пластах. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1986. — № 252.
63. *Методика прогноза газодинамических явлений с использованием аппаратуры контроля метана при проведении подготовительных выработок.* — Кемерово: Ин-т угля СО РАН, 1994.
64. *Biot M. A.* Mechanics of Incremental Deformation. — New York: John Wiley, 1965.
65. *Biot M. A.* Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Part I. Low frequency range // J. Mech. Phys. Solids. — 1963.
66. *Гречухин В. В.* Изучение угленосных формаций геофизическими методами. — М.: Недра, 1980.
67. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
68. *Калиткин Н. Н.* Численные методы. — М.: Наука, 1978.
69. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 2. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983.
70. *Пат. 20460 Украина.* Способ сейсмической диагностики горного массива / А. С. Трифонов, М. Г. Тиркель, В. В. Туманов и др. // Оpubл. Бюл. — 2007. — № 1.
71. *Тиркель М. Г., Трифонов А. С., Туманов В. В. и др.* Диагностический сейсмический мониторинг геодинамического состояния горного массива при отработке угольных пластов // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2007.

72. Пат. 26538 Украина. Способ сейсмической диагностики геодинамического состояния горного массива / А. С. Трифонов, А. В. Анциферов, В. В. Туманов, М. Г. Тиркель и др. // Оpubл. Бюл. — 2007. — № 15.
73. Анциферов А. В. Механизмы формирования волнового поля сейсмических колебаний угленосной толщей / Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. — Днепропетровск: НГА Украины. — 2002. — Т.1, № 13.
74. Анциферов А. В., Глухов А. А., Компанец А. И., Педченко М. А. Определение зон повышенного горного давления методом сейсмического просвечивания // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2007.
75. Глухов А. А., Компанец А. А., Педченко М. А. Использование шахтной сейсморазведки для прогноза зон повышенного горного давления на обрабатываемых угольных пластах Донбасса // Наукові праці УкрНДМІ НАН України — Донецьк: УкрНИМИ, 2007. — № 1.
76. Тиркель М. Г. О границах применения наземной сейсморазведки для прогноза аномалий залегания угольных пластов на основе анализа волн, отраженных от нижезалегающих горизонтов / Проблемы горного давления. — Донецк: ДонНТУ, 2005. — № 13.
77. Пат. 20460 Украина. Способ сейсмической диагностики горного массива / А. С. Трифонов, М. Г. Тиркель, В. В. Туманов и др. // Оpubл. Бюл. — 2007. — № 1.
78. Пат. 25374 Украина. Способ сейсмоакустической диагностики геодинамического состояния угольного пласта в очистной выработке / А. С. Трифонов, В. В. Туманов, А. И. Архипенко, М. Ю. Богак // Оpubл. Бюл. — 2007. — № 12.

## Глава 4

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Основой для прогнозирования и предупреждения катастрофических событий, связанных с геомеханико-геодинамическими процессами различных классов, является создание для потенциально опасных регионов, в которых интенсивно проводятся горные работы, такой информационной модели (ИМ), которая отображала бы динамику всех наиболее существенных факторов, определяющих развитие катастрофических процессов в массивах горных пород. Ее состав обусловлен характером исследуемого объекта, который является естественной, неоднородной, разномасштабной, нередко труднодоступной для измерений, трудно управляемой геосредой. Одной из основных задач построения ИМ является отображение (моделирование) физико-механических свойств геомеханического пространства.

Решение проблемы эффективной и безопасной разработки и эксплуатации месторождений представляется возможным посредством создания систем, построенных на основе комбинированного использования современных результатов в области геомеханики, геодинамики и геоинформационных технологий и реализующих комплекс задач по контролю напряженно-деформированного состояния массива без прерывания основного технологического цикла на контролируемом объекте. Передовой отечественный и зарубежный опыт отработки месторождений в условиях сложной геомеханической обстановки показывает, что необходимость применения соответствующих систем геомониторинга не имеет альтернативы [1].

В настоящей главе, посвященной исследованиям и разработкам, выполненным в ИГД и ИУУ СО РАН, касающимся методологического и предметно-ориентированного наполнения перспективных систем геомеханико-геодинамического мониторинга ответственных народно-хозяйственных объектов горно-добывающей промышленности, основное внимание уделяется также количественному описанию блочно-иерархического строения массивов горных пород и методам прогнозирования их физико-механических свойств в условиях «априорной» неопределенности.

Последнее обстоятельство трудно переоценить по его значимости, поскольку прямые измерения физико-механических свойств горных пород в большом количестве, во-первых, весьма дорогостоящее занятие, а, во-вторых, не всегда возможное по существу.

#### 4.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ГЕОМОНИТОРИНГА

Объект исследований следует обозначить как сложную, разнородную, неформализованную, изменяющуюся во времени, труднодоступную для измерений, пло-

хо управляемую, подвергающуюся разного рода техногенным воздействиям геосреду, физические процессы в которой протекают в широком диапазоне скоростей.

Соответственно, при создании модели, наиболее полно отвечающей оригиналу, необходимо учитывать следующие факторы:

- 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.

Информационная модель (ИМ) обеспечит сбор и анализ геодинамической информации, позволит исследовать и разработать эффективные методы прогнозирования катастрофических проявлений горного давления. Интеграция в ИМ геомеханических измерений, математических моделей и информационных ресурсов сделает возможным адекватное описание поведения сложных техногенных геосистем [2—4].

Современное геоинформационное обеспечение для систем мониторинга в горно-добывающей промышленности, как правило, разрабатывается в виде открытой программно-технической системы, в составе которой в общем виде можно выделить ряд блоков (подсистем):

- картографо-геодезический блок формирования и ведения банков базовых цифровых, электронных и аэрокосмических карт рельефа;

- блок геолого-геофизической информации, включающий в себя банки данных о минеральных ресурсах, геологии, геохимии и физике недр;

- аналитический блок для математического и геодинамического моделирования и системного анализа вариантов стратегии развития;

- подсистема отображения интегрированной информации;

- экспертная система информационного обеспечения принятия решений и выработки мероприятий по управлению горным давлением.

Основным содержанием аналитического блока является базовое методологическое наполнение, которое должно строиться на комбинированном использовании методов моделирования и прогнозирования геомеханических процессов, вероятностно-статистических методов анализа данных, экспертного оценивания геомеханической обстановки.

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

В настоящее время используют комплексные математические и информационные модели, позволяющие учитывать сложный характер исследуемых процес-

сов и явлений. Они являются необходимым средством обработки и отображения многопараметрической динамической геоинформации, представляя виртуальную часть мониторинга и обеспечивая не только оценку текущего состояния объектов геосреды, но и его прогнозные варианты, что очень важно для оптимизации режимов разработки и эксплуатации месторождений и своевременного выявления критических ситуаций [7].

#### 4.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГЕОСРЕДЫ

Информационная модель, обладающая большой размерностью и построенная по иерархическому принципу (рис. 4.1), обеспечит решение следующих важнейших задач геомеханики и геодинамики:

выделение блочной структуры массива горных пород (МГП) для изучения энергообменных процессов между блоками разных иерархических уровней;

определение напряженного состояния МГП на основе выделенной системы блоков;

поиск и изучение энергоактивных образований, характеризующихся аномальной динамикой различных физических, геофизических и других полей;

математическое моделирование эволюции геомеханического состояния МГП при различных природных и техногенных воздействиях.

Существенными преимуществами обладают системы, функциональные компоненты которых интегрированы в единой информационной среде, поскольку тем самым обеспечиваются получение оперативных оценок текущего геомеханического состояния контролируемого массива и достоверный прогноз его поведения при планируемом развитии горных работ [8].

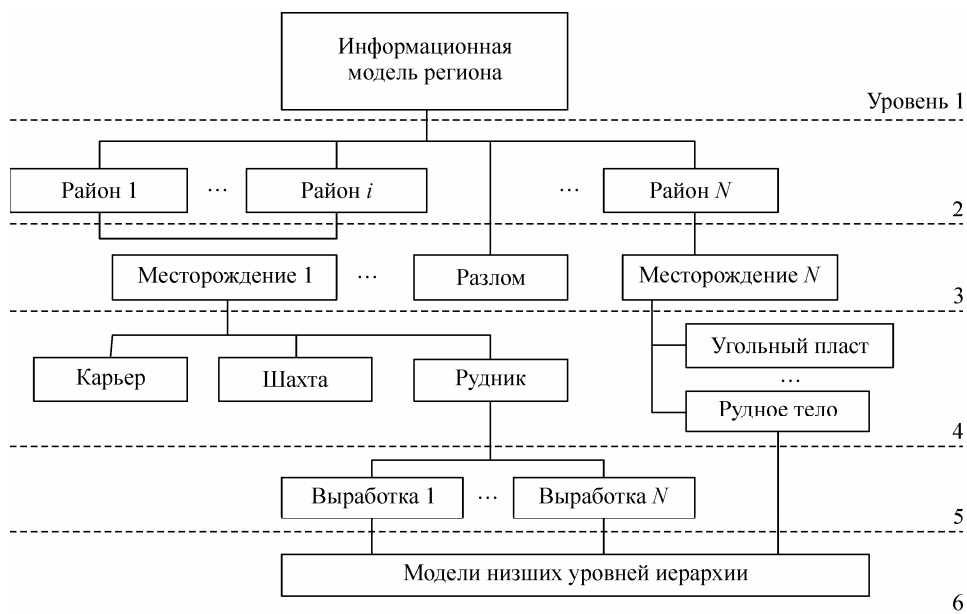


Рис. 4.1. Общая структура информационной модели.

ИМ исследуемой геосреды в первую очередь предназначается для описания ее блочной структуры, физико-механических свойств, а также их динамики, вызванной естественными и техногенными геодинамическими процессами, имевшими место в течение наблюдаемого периода времени. Таким образом, ИМ создается как совокупность изменяющихся во времени полей физико-механических свойств геомеханического пространства.

Для описания этих полей в модели определяются динамические объекты и события различных типов (классов), которые отображаются на ось времени. Каждому объекту приписываются его геометрические, пространственные и физико-механические свойства. Как сама информационная модель, так и любой ее объект могут иметь сложную иерархическую структуру, т. е. быть образованы некоторыми структурами подобъектов. При этом каждый из этих подобъектов может быть как элементарным, так и структурированным.

Элементарный объект определяется как компакт, все точки которого имеют одинаковые физико-механические свойства. Совокупность всех компактов отображает структуру и свойства геомеханического пространства в целом.

При разработке информационной модели геомеханического пространства использовалась объектно-ориентированная технология, позволяющая разрабатывать хорошо структурированные, надежные в эксплуатации, достаточно просто модифицируемые программные системы. Базовым понятием здесь является класс объектов информационной модели, под которым понимается множество объектов модели, описывающих однотипные (похожие) элементы моделируемого геомеханического пространства.

Элементарные геометрические объекты делятся на ряд классов:

1. **«Опорная точка»**. Объект класса задает некоторую граничную точку компакта, определяемую пространственными координатами в привязке к заданной системе координат.

2. **«Прямая линия»**. Объект класса задает прямую, проходящую через заданную опорную точку в заданном направлении.

3. **«Отрезок»**. Объектом данного класса задается ограниченное парой опорных точек подмножество точек некоторой прямой.

4. **«Кривая»**. Объект класса представляет некоторую последовательность отрезков, задающую контуры объектов геомеханического пространства на его сечении.

5. **«Плоскость»**. Объект данного класса определяет сечение пространства, заданное линейным уравнением относительно координат.

6. **«Треугольник»**. Объект класса задает множество точек некоторой плоскости, ограниченное тремя отрезками с вершинами в опорных точках, принадлежащих данной плоскости.

7. **«Поверхность»**. Объект задает кусочно-линейную поверхность некоторой совокупности прилегающих друг к другу треугольников; отображает границы объектов пространства.

8. **«Треугольная пирамида»**. Объект класса задает элементарный объем, ограниченный треугольниками с вершинами в опорных точках; определяет пространственные свойства некоторого компакта.

9. **«Объем»**. Объект класса представляется как множество треугольных пирамид, определяющих свойства некоторого объекта пространства.

Подробно структура классов объектов информационной модели описана в [3].

Между геометрическими объектами определен ряд соотношений и операций, к числу которых относятся построение пересечений и объединений и вычисление расстояний между объектами. Таким образом, геометрические свойства любого объекта моделируемой геосреды отображаются соответствующей структурой вышеперечисленных элементарных геометрических объектов.

### **4.3. ТРИАНГУЛЯЦИЯ КАК ОСНОВНОЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Важным этапом информационного моделирования объектов, в том числе горно-геологических, является синтез триангуляционной сетки. В настоящее время известно множество алгоритмов генерации сеток. Ряд их приведен в обзорах [9—11]. При этом различают регулярные и нерегулярные сетки. В регулярных все узлы равномерно распределены по моделируемому пространству, и в качестве элементарного объема в них используется некоторый правильный многогранник. Построение нерегулярных сеток алгоритмически сложнее, но они обеспечивают более высокую точность аппроксимации геометрических свойств объектов.

По принципу построения все методы триангуляции делятся на прямые и итерационные [12, 13]. Прямые методы, как правило, отличаются высокой скоростью работы, надежностью и минимальными затратами вычислительных ресурсов. Топология сетки при этом известна изначально, ей свойственны структурированность и однородность. Основным недостатком методов — жесткое ограничение на геометрическую конфигурацию отображаемых областей. Особенно это касается группы так называемых методов на основе шаблонов, когда моделируемое пространство или объект конструируется из областей заданного вида (шара, параллелепипеда, цилиндра и т. п.). К прямым методам относится и широко известный метод по критерию Делоне, получивший распространение именно благодаря способности быстро и эффективно конструировать сетки с высоким с точки зрения однородности ячеек-компактов качеством триангуляции. Однако для сложных (аналитически не описываемых) областей могут возникать проблемы с точностью воспроизведения их реальной формы.

Итерационные методы, напротив, достаточно универсальны и могут использоваться для областей произвольного вида. Однако недостатками здесь являются высокая ресурсоемкость и существенно более низкое быстродействие в сравнении с прямыми методами. Кроме того, полученные сетки, как правило, неоднородны и неструктурированы, поскольку их топология формируется в процессе построения, шаг за шагом.

Проведено исследование различных методов и алгоритмов объемной триангуляции. На демонстрационном примере рассмотрены следующие алгоритмы триангуляции геомеханического пространства с учетом ее блочной структуры:

1. Регулярная триангуляция шахтного поля, в каждом узле сетки которой размещаются либо тетраэдр, либо куб. При этом параметры сетки (ее шаг, смещение и поворот относительно начала координат) выбираются исходя из обеспечения требуемой точности. Точность при этом оценивается как максимальное расстояние от опорной точки до ближайшего узла сетки.

2. Триангуляция геомеханического пространства по опорным точкам. Число опорных точек и их координаты должны быть выбраны таким образом, чтобы при кусочно-линейной аппроксимации граничных поверхностей объектов геомеханического пространства достигалась необходимая точность.

3. Иерархическая триангуляция геомеханического пространства по опорным точкам посредством последовательной детализации ее блочной структуры.

4. Иерархическая триангуляция геомеханического пространства по опорным точкам посредством последовательного укрупнения ее блочной структуры.

Из вышеперечисленных предпочтительнее последний метод, так как при проведении одного этапа триангуляции используется только соответствующее этапу подмножество опорных точек. В результате сокращаются размерность задачи и объем вычислений, облегчаются формирование множества опорных точек и проверка результатов триангуляции, уменьшается количество ошибок.

Определены границы применения для моделирования объектов геомеханического пространства триангуляции Делоне, которая широко используется при численном решении уравнений математической физики. Основным недостатком метода является добавление дополнительных внутренних опорных точек при триангуляции объекта геомеханического пространства. Это приводит к значительному увеличению размерности информационной модели. С другой стороны, метод Делоне обеспечивает построение сетки с заданными свойствами, что особенно важно для решения задач геодинамики, использующих метод конечных элементов, и его применение целесообразно при формировании исходных данных для задачи геодинамики, которое заключается в преобразовании нерегулярной сетки, образованной опорными точками пространства, к сетке с заданными свойствами.

#### 4.3.1. Алгоритмы иерархической триангуляции

Разработан метод объемного моделирования произвольного объекта геомеханического пространства на основе планов горизонтов горно-добывающего предприятия и триангуляции по опорным точкам. Разработанный метод учитывает топологию сечения геомеханического объекта, которое соответствует некоторому плану горизонтов, — выпуклую или невыпуклую форму, связность точек сечения, наличие «дыр» и разнородностей. Он основан на представлении сечений моделируемого объекта в виде множества замкнутых направленных контуров.

Контур задается как замкнутая последовательность опорных точек геомеханического пространства, а направление его обхода определяет принадлежность моделируемому объекту точек по разные стороны границ контура.

Метод объемного моделирования (**алгоритм А1**) заключается в последовательном выполнении для каждой пары соседних планов горизонтов следующих шагов (рис. 4.2, а (см. вклейку) — исходный контур):

1) построение множества треугольных пирамид, образующих выпуклую оболочку, «натянутую» на множество опорных точек геомеханического пространства, принадлежащих контурам моделируемого объекта на данных горизонтах (триангуляция Делоне) (рис. 4.2, б, см. вклейку);

2) исключение из триангуляции всех пирамид, три вершины которых принадлежат рассматриваемому контуру, а множество точек в плоскости основания дан-



ных пирамид на соответствующем сечении (горизонте) моделируемому объекту не принадлежит (рис. 4.2, в, см. вклейку). Идентификация удаляемой пирамиды осуществляется по знаку синуса между векторами  $\overline{P_1P_2}$  и  $\overline{P_1P_3}$ , определяемыми вершинами пирамиды и точками соответствующего контура (рис. 4.2, з, см. вклейку):  $\alpha_1 = \sin(\overline{P_iP_{i+1}}, \overline{P_iP_{i+2}}) > 0$  и  $\alpha_2 = \sin(\overline{P_{i+2}P_{i+1}}, \overline{P_{i+2}P_i}) < 0$ . При этом вершина  $P_i$  пирамиды предшествует вершине  $P_{i+1}$  в контуре;

3) исключение из триангуляции всех пирамид таких, что пара их вершин принадлежит контуру одного горизонта, а другая — контуру соседнего горизонта, при этом на шаге 2 было осуществлено удаление пирамид, которые имели общие грани с данными. Кроме того, обе пары вершин пирамиды не должны быть образованы последовательными точками в соответствующих контурах (рис. 4.2, д, см. вклейку).

Построение выпуклой оболочки на шаге 1 можно производить разными способами. В частности, комбинаторным, заключающимся в построении всех возможных кортежей из четырех различных опорных точек, таких что их пересечения имеют нулевой объем. Либо генерировать объемное решение на основании результатов плоской триангуляции сечений рудного тела, полученных для соответствующей пары горизонтов.

Точного воспроизведения топологии сечений объектов геомеханического пространства позволяют достичь два рекурсивных алгоритма построения плоской триангуляции [14]. Критериями включения комбинаций опорных точек в триангуляцию в них являются: 1) максимальный периметр треугольника, определяемого точками комбинации (**алгоритм А2**); 2) максимальная площадь треугольника, определяемого точками комбинации (**алгоритм А3**).

Общими начальными этапами для **алгоритмов А2** и **А3** являются: 1) вычисление расстояний между всеми опорными точками моделируемого контура сечения; 2) исключение недопустимых ребер путем проверки на возможные пересечения их с границей контура, а также исходя из условия значений синусов углов аналогично приведенному в [3]. При этом идентификация удаляемого ребра ( $P_i, P_j$ ) осуществляется по знаку синуса угла между векторами  $\overline{P_iP_{i+1}}$  и  $\overline{P_iP_j}$ , определяемыми опорными точками соответствующего контура. Если  $\alpha_1 = \sin(\overline{P_iP_{i+1}}, \overline{P_iP_j}) > 0$  и  $\alpha_2 = \sin(\overline{P_jP_{j-1}}, \overline{P_jP_i}) < 0$ , ребро исключается из рассмотрения; при этом вершина  $P_i$  предшествует вершине  $P_{i+1}$  в контуре. В результате проверок остается множество допустимых ребер.

Далее, согласно **алгоритму А2** осуществляется выбор ребра максимальной длины из множества имеющихся, так что на следующем шаге получаем разбиение исходного контура на два подконтура. В дальнейшем производится рекурсивное разбиение образующихся подконтуров до ситуации, когда подлежащий триангуляции контур является треугольником.

**Алгоритм А3.** Основные процедуры, реализующие данный метод триангуляции по опорным точкам, также организованы в виде рекурсии. На каждом очередном шаге выбирается треугольник максимальной площади, который включается в сетку триангуляций, а исходный контур разбивается на один, два или три подконтура. Алгоритм рекурсивно обрабатывает образовавшиеся подконтуров до тех пор, пока каждый из них не вырождается в треугольник.

Данные алгоритмы можно обобщить и для случая объемной триангуляции. При этом на каждом шаге триангуляции осуществляется поиск пересечения пира-

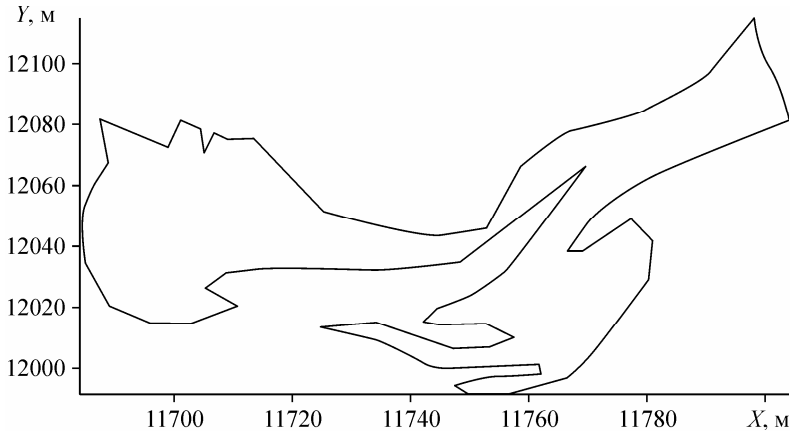


Рис. 4.3. Контур сечения фрагмента рудного тела (исходный).

миды-кандидата с гранями, образующими граничную поверхность объекта геометрического пространства. Выбор пирамиды-кандидата определяется наличием общих граней с пирамидами, включенными в триангуляцию на предшествующих шагах.

Результаты триангуляций сечений фрагмента рудного тела, исходный контур сечения которого приводится на рис. 4.3, представлены на рис. 4.4 (см. вклейку). Проведено сравнение разработанных алгоритмов со стандартным алгоритмом триангуляции Делоне (**алгоритм А1**).

#### 4.3.2. Оценка качества триангуляции

Для оценки качества триангуляции  $T = \{c_i\}$  — множества ее компактов — использовались среднее  $\bar{\mu}(T)$  и дисперсия  $\sigma_{\mu(T)}^2$  мер отклонения элементов триангуляции от правильных тетраэдров:

$$\bar{\mu}(T) = \frac{\sum_{c \in T} \mu(c)}{\|T\|}; \quad \sigma_{\mu(T)}^2 = \frac{\sum_{c \in T} (\mu(c) - \bar{\mu}(T))^2}{\|T\|}.$$

Здесь мера  $\mu(c)$  отклонения компакта  $c$  от эталона определяется следующим образом:

$$\mu(c) = \frac{V(c)}{z(c)},$$

где  $V(c)$  — объем компакта,  $z(c)$  — наибольшее из произведений длин тройки ребер, выходящих из одной вершины компакта  $c$ .

Возможные значения  $\mu(c)$  и  $\bar{\mu}(T)$  лежат в диапазоне от 0 до 1 и в случае «идеальной» триангуляции равны 1 при стремящейся к нулю дисперсии  $\sigma_{\mu(T)}^2$ . В реальности для геометрически сложных областей хорошим результатом считается значение  $\bar{\mu}(T) \approx 0,5$  [12].

Результаты сравнения алгоритмов представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Алгоритмы триангуляции		A1	A2	A3
Быстродействие		15 с*	33 с	2 мин. 47 с
Число компактов в триангуляции		71	69	69
Оценка качества объемной триангуляции	$\bar{\mu}(T)$	0,0364	0,0881	0,1059
	$\sigma_{\mu(T)}^2$	0,0013	0,0170	0,0256
Оценка качества триангуляции сечений	$\bar{\mu}(T)$	0,6483	0,1822	0,3063
	$\sigma_{\mu(T)}^2$	0,0469	0,0284	0,0734
Искажение геометрии моделируемого объекта		Есть	Нет	Нет

\* Метод реализован с использованием встроенных функций MatLab.

Сравнительный анализ полученных триангуляций показывает, что **алгоритм A2**, несмотря на более низкое быстродействие, обеспечивает наилучшую триангуляцию и наиболее естественное визуальное представление геометрии моделируемого геомеханического объекта (см. рис. 4.4, в). При необходимости можно добиваться локального сгущения сетки для отображения, например, аномальных областей геосреды, а также применять процедуры оптимизации для улучшения качества триангуляции с позиции однородности составляющих ее компактов.

#### 4.4. БАЗА ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Промышленным стандартом для построения любого типа информационных систем в настоящее время является сетевая модель клиент—сервер. Базы данных при этом размещаются на ЭВМ-сервере, а все функциональные приложения — на ЭВМ-клиентах, что обеспечивает разделение процессов обработки информации между серверной частью и клиентами, а также минимизацию информационных потоков.

В качестве серверных частей распределенных баз данных может быть использована любая СУБД, предусматривающая обработку SQL запросов (MySQL, Ingress, Cashe, Microsoft SQL Server, Oracle и др.). Наиболее подходящей для использования в качестве сервера ИМ представляется СУБД Oracle Enterprise [15], что обусловлено следующими ее свойствами:

- широким набором встроенных типов данных, включая графические, мультимедийные и картографические, возможностью конструирования дополнительных структур данных;

- возможностью распределения прав доступа и полномочий к информационной модели пользователей различных уровней;

- возможностью использования объектно-ориентированных технологий;

- наличием компоненты SPATIAL для обработки пространственных данных с поддержкой географической системы координат Земли по результатам космической и аэрофотосъемок, GPS и топографических измерений;

наличием web-, http- и Java-интерфейсов, обеспечивающих доступ к модели через Internet;

возможностью организации распределенного масштабируемого и самоуправляемого кластера серверов баз данных с автоматической синхронизацией данных в них;

поддержкой технологии сетевых вычислений, обеспечивающих возможность совместного решения одной сложной прикладной задачи серверами кластера.

Клиентские приложения могут быть реализованы на любом языке программирования высокого уровня (C++, Delphi, Visual Basic и т. д.), с помощью настольных СУБД (Microsoft Access, Oracle Lite и др.) либо с использованием web-интерфейсов (http-, Java-, flash-технологии). Выбор средства реализации клиентского приложения определяется его типом и сложностью.

#### 4.4.1. Структура базы данных информационной модели

Предложена структура базы данных ИМ (рис. 4.5, 4.6, см. вклейку). В базе данных выделено два подмножества таблиц, одно из которых (см. рис. 4.5) описывает первичную информацию, используемую при построении ИМ, второе подмножество (см. рис. 4.6) отражает структуру данных ИМ. Поля таблиц описывают свойства объектов геомеханического пространства и наблюдаемых явлений (процессов). Связи между таблицами задаются посредством ключевых полей и идентифицируются выражением Table.Field. Число Table определяет номер таблицы, на которую ссылается соответствующее поле, Field — номер поля таблицы Table, по которому осуществляется идентификация объектов. Связи между таблицами определены исходя из структуры моделируемых объектов ИМ, а также разработанных и представленных в разделе 4 методов триангуляции.

##### Таблицы первичной информации:

1. Исходные документы. Содержит перечень документов, которые используются для построения ИМ, с указанием источников их получения и даты создания (например, планы горизонтов, каталоги сейсмических событий, геологические карты, планы выработок и планы горных работ по горизонтам и т. п.).

2. Производные документы. Содержит перечень электронных документов (файлов различных типов) с указанием их назначения и документов, на основе которых они составлены (например, результаты оцифровки планов горизонтов).

3. Программные компоненты ИМ. Содержит перечень программных модулей, реализующих ИМ (например, процедуры считывания/записи данных и их преобразования, процедуры триангуляции, построения пересечения и объединения объектов, процедуры визуализации результатов и пр.).

4. Перечень свойств компактов. Содержит описание множества физико-механических свойств, которые могут быть определены для каждой точки геомеханического пространства (например, электропроводность, электромагнитная и акустическая эмиссия, перемещения).

5. Перечень типов геодинамических событий. Содержит описания типов событий, которые отображаются в ИМ (технологические взрывы, техногенные землетрясения, горные удары и т. д.).

6. Перечень параметров событий. Содержит описание параметров, которые могут быть использованы для идентификации событий в ИМ (интенсивность элек-

ромагнитной эмиссии, магнитуа сейсмических сигналов и сигналов акустической эмиссии, энергия сигналов, электрическое сопротивление участков массива, скорости сдвигения и деформаций).

#### **Таблицы структуры данных ИМ:**

7. Опорные точки. Содержит множество координат всех опорных точек геомеханического пространства, которые используются для его триангуляции.

8. Контурь. Содержит описание контуров сечений геомеханических объектов на горизонтах и разрезах геомеханического пространства.

9. Границы контуров. Определяет множество опорных точек контуров по результатам оцифровки исходных документов.

10. Состав контуров. Задает последовательность опорных точек, образующих контур.

11. Горизонты. Содержит описание всех горизонтов геомеханического пространства.

12. Элементарные компакты. Содержит результат объемной триангуляции геомеханического пространства.

13. Грани элементарных компактов. Содержит результат плоской триангуляции геомеханического пространства.

14. Свойства компактов. Содержит перечень свойств и их значения, присвоенные компактам.

15. Разрезы. Содержит описание всех вертикальных сечений геомеханического пространства.

16. Состав объектов. Отображает блочно-иерархическую структуру геомеханического пространства.

17. Геомеханические объекты. Содержит перечень выделенных в ИМ геомеханических объектов.

18. Зарегистрированные события. Содержит перечень геодинамических событий, отображаемых ИМ.

19. Параметры зарегистрированных событий. Содержит значения параметров событий ИМ.

Вышеприведенный перечень таблиц является открытым и развивающимся. По мере пополнения базы данных измерительной информацией, экспертными и фактографическими данными, включая результаты геомеханического моделирования, ИМ будет становиться все более адекватной всей сложности объекта исследований и в перспективе позволит отобразить эволюцию в пространстве и во времени структуры и различных свойств породного массива.

#### **4.4.2. Технология обработки первичной информации и ввода ее в базу данных информационной модели**

Подготовка исходных картографических материалов заключается в выборе из всех картографических данных, накопленных в результате различных наблюдений, тех, которые несут необходимую информацию для построения ИМ. Основные требования к картам — их качество и максимальная информативность, карта должна содержать результаты последних исследований. Стандартно маркшейдерская графическая документация ведется на планах горных работ масштабов 1 : 500,

1 : 1000 и 1 : 2000. На первом этапе в качестве графической основы для построения информационной модели были выбраны планы горных работ в масштабе 1 : 2000.

На этапе, предвещающем оцифровку, были решены следующие задачи:

восстановлена информация, частично утраченная или искаженная из-за износа бумажного носителя, «обрезана» лишняя зарамочная информация, растр очищен от мелких дефектов;

выбрана величина разрешения при сканировании для достижения необходимой графической точности;

растровое изображение разделено на тематические слои (горные выработки, рудные тела, тектонические нарушения и т. д.);

введена атрибутивная информация для графических объектов;

оценена точность положения координатной сетки на картах и планах (растр должен быть пространственно привязан в системе координат и проекции, в которой он был построен);

создана база данных информационной геодинамической модели.

Геологические карты перегружены информацией, поэтому оцифровка контуров моделируемых объектов с фиксированием координат опорных точек выполнялась оператором вручную с помощью функции *Didger* в пакете трехмерного моделирования поверхностей *Surfer*.

*Surfer* дает результаты оцифровки либо в координатах экрана, либо в декартовых координатах. В этом случае для трансформации результатов оцифровки из экранных координат в географические необходимы пространственная привязка оцифровываемых объектов или специальные программы пересчета. Пакет поддерживает 22 географических проекций и координатных систем и включает различные способы преобразования пространственных данных при переходе от локальных к географическим координатам и наоборот. В данном случае пространственная привязка объектов осуществлялась путем присвоения истинных прямоугольных координат перекрестиям линий координатной сетки оцифровываемых планов горизонтов.

В процессе работы была произведена оценка среднеквадратичной ошибки для выбранного проекта. На последнем этапе оцифровки производился контроль и редактирование данных. Это один из ответственных этапов, определяющих качество созданных цифровых планов, где проверяется соответствие полученного цифрового изображения его твердому оригиналу, совпадение фактических и аналитических координат на отдельных фрагментах цифрового плана. Графическое отображение элементов плана должно быть максимально приближенно к фактическим планам горных работ и поверхности, а также соответствовать требованиям горно-графической документации и принятым условным обозначениям. В случае обнаружения отклонений выполнялась корректировка данных.

Сканирование карт и планов было выполнено на планшетных сканерах форматов A1 и A0 с разрешением не ниже 300 dpi. В случае наклона отсканированного изображения электронные варианты карт экспортировались в графический пакет *CorelDraw*, в котором вдоль линий координатной сетки карт проводились вспомогательные направляющие и с помощью соответствующей опции с заданием угла и направления поворота осуществлялось вращение изображения до полного слияния направляющих с координатной сеткой.

Таким образом, в результате оцифровки были получены и занесены в таблицы базы данных ИМ файлы двух типов: текстовые — содержащие координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  опорных точек оцифрованных контуров геомеханических объектов, и графические — содержащие информацию об объектах геомеханического пространства.

Все файлы могут экспортироваться в различные пакеты для дальнейшей обработки (Surfer — BLN, Atlas — BNA, AutoCAD — DXF, Windows BMP, JPG, TIF) либо в базы данных для хранения и представления в требуемом виде.

#### **4.5. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ ТАШТАГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Для практической реализации информационной модели получены электронные копии планов горизонтов и сечений шахтного поля Таштагольского рудника. В настоящее время в структуре таблиц базы данных информационной модели, содержащих первичную информацию, представлено около 50 электронных планов горизонтов и сечений. Произведена оцифровка рудного тела на четырех из 13 горизонтов, по которым в базе данных имеется информация. Построено около 250 контуров, которые в совокупности содержат более 6000 опорных точек.

Разработанная методика получения опорных точек геомеханического пространства обеспечивает привязку их к выделенным контурам и геодезическим координатам, в которых составлены планы горизонтов. Данная методика учитывает возможные искажения, вносимые в электронные копии при сканировании планов горизонтов, представленных на бумажных носителях. Результаты оцифровки хранятся в файлах в текстовом формате и могут легко экспортироваться в различные пакеты для дальнейшей обработки либо в базы данных для хранения и представления в требуемом виде.

Произведена оценка точности оцифровки карт по разработанной методике. Абсолютная ошибка в координатах опорной точки составляет не более 0,7—1,5 м на 12 км; относительная ошибка в расстояниях между опорными точками, принадлежащими одному контуру, — не более 0,25 м. При этом предполагается, что систематическая ошибка, обусловленная неточностью изготовления планов горизонтов и сечений, равна нулю: для ее оценки требуется проведение дополнительных геофизических измерений.

Метод объемного моделирования апробирован при моделировании рудного тела Таштагольского горно-рудного предприятия на горизонтах  $-280$  м и  $-350$  м. Результаты моделирования представлены на рис. 4.7, 4.8 (см. вклейку). По оценке производительности данного метода, построение информационной модели геомеханического объекта, образованного контурами более чем из 3000 опорных точек и содержащего порядка 5000 элементарных компактов, занимает менее 1 мин. на ЭВМ Celeron — 434 МГц, 256 Мб.

Итогом проведенных исследований в части разработки информационной геодинамической модели стали следующие результаты:

1. Обоснована методология моделирования динамики геомеханического пространства, ориентированная на широкое использование информационных технологий и распределенных баз данных; предложена общая структура информационной геодинамической модели породного массива.

2. Отработана технология обработки первичных документов, содержащих геомеханическую, геологическую, геофизическую, геотехнологическую и др. информацию о моделируемом геомеханическом пространстве.

3. Разработаны методы плоской и объемной триангуляции по опорным точкам, полученным на основе планов горизонтов, с учетом топологии сечения моделируемого геомеханического объекта.

4. Создана структура базы данных информационной геодинамической модели.

5. На примере Таштагольского месторождения проведено опытное моделирование рудного тела, результаты которого позволяют говорить о возможностях реализации разработанных принципов и методов в практике горно-рудных предприятий для оценки геомеханического состояния массива горных пород, а в перспективе — для анализа наблюдаемых геодинамических явлений и прогнозных расчетов.

#### **4.6. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРА**

В работе [16] на примере Кузбасса представлены рекомендации по использованию геоинформационной системы [17—19] для графоаналитического представления и системного анализа экспериментальной геомеханической информации и проведен анализ структурно-иерархического строения геологических разломов Анжерского геолого-экономического района с использованием новой канонической шкалы структурно-иерархических представлений с основанием  $\sqrt{2}$ . Ниже в продолжение начатых в [16, 20] работ представлен анализ структурного строения разломов борта карьера на Шипуновском месторождении известняков. Изложенная информация позволяет расширить представления о состоянии геологической среды с количественных позиций геомеханического структурирования для оценки строения крупных объектов геосреды и включения их в геоинформационный анализ. Представленные в [16, 20] методические подходы оценки параметров блочности геологических структур применены для анализа разломов и построения геоинформационной модели месторождения.

**Общие сведения о геоструктурном положении, стратиграфии и геологическом строении карьера [21].** Шипуновское месторождение известняков расположено в пределах Искитимского административного района Новосибирской области в 6 км юго-восточнее г. Искитим и разрабатывается с 1939 г. С запада к нему примыкает 2-е Шипуновское месторождение известняков.

По строению рельефа район представляет собой всхолмленную равнину с отметками от 65 до 150 м, глубоко изрезанную современной гидросетью. Основные водные артерии — р. Бердь и ее левый приток р. Шипуниха.

Месторождение разведано до горизонта +30 м и располагается на площади 355,7 тыс. м<sup>2</sup>. В северной части находится действующий карьер ОАО «Искитим-мраморгранит». Вскрышные горизонты расположены на отметках 125, 130 м, добычные — на отметках 125, 110, 95, 80 и 65 м. Полезная толща сложена однородными по физико-механическим свойствам известняками с крутым моноклинальным падением, имеющим различную степень закарстованности: до глубины 6 м — 14,8 %, ниже — 5 %.



Кровля полезной толщи имеет крайне неровную поверхность с карстовыми воронками и западинами. На верхних горизонтах известняки в основном относятся к среднетрещиноватым, среднекрупноблочным. На нижних горизонтах известняки малотрещиноватые, весьма крупноблочные.

В геологическом строении района участвуют отложения пачинской свиты верхнего девона, перекрытые рыхлыми образованиями неогеновой и четвертичной систем. Полезную толщу месторождения представляют известняки пачинской свиты.

Известняки по внешнему виду массивные, крепкие, с неровным изломом, мелкозернистые, окраска изменчива от темно-серой до светло-серой, почти белой, в северо-западной части имеют распространение мраморизованные известняки. В восточной части месторождения известняки темно-серые, почти черные, тонкокристаллические, участками мелкокристаллической текстуры, массивные, нарезка чешуйчатая из-за сложного расщепления. На участках скрытокристаллического строения наблюдаются редкие прожилки белого крупнокристаллического кальцита.

Для розовых разновидностей известняков характерно наличие тонкорассеянной примеси гидроксидов железа, распределение которых по породе неравномерное, что и привело к различной густоте окраски последней от розовой до красно-коричневой.

В гидрологическом отношении карьер до отметки +108 м находится в благоприятных условиях. Подтверждением является отсутствие значительного скопления каких-либо вод при отработке уступа. Основное развитие на участке работ имеет безнапорный горизонт трещинно-жильных вод. Горизонт +65 м (отметка подошвы нижнего разрабатываемого горизонта) полностью обводнен. Откачка воды осуществляется из зумпфа, где уровень воды находится на абсолютной отметке 65 м, водоприток составляет 175 м<sup>3</sup>/ч. Максимально возможный приток, с учетом ливневых вод и атмосферных осадков, может составить 1780 м<sup>3</sup>/ч. Водотлив карьера осуществляется с горизонта +65 м.

**Качественная характеристика известняков.** По результатам геологической разведки свойства известняков характеризуются следующими показателями:

объемный вес	2,64—2,74 г/см <sup>3</sup> ;
удельный вес	2,67—2,85 г/см <sup>3</sup> ;
водопоглощение	0,24 %;
предел прочности при сжатии:	
а) в воздушно-сухом состоянии	(5,80—1,14)·10 <sup>3</sup> Н/см <sup>2</sup> ;
б) в водонасыщенном состоянии	(6,08—12,21)·10 <sup>3</sup> Н/см <sup>2</sup> .

Детали тектонической структуры известняковых толщ еще недостаточно выяснены. Разрывные нарушения в известняках распространены достаточно широко и разнообразны по форме и амплитуде. Стратиграфическая амплитуда этих нарушений изменяется от 100 до 400 м. Обычно им соответствуют широкие (в десятки метров) зоны дробления и малоамплитудных дислокаций. Средне- и малоамплитудные разрывы в известняковой толще представлены различными морфологическими типами: преимущественно взбросами и надвигами, реже — подбросами, сбросами и послойными перемещениями, проявляющимися главным образом в мраморизованных прослоях.

#### 4.6.1. Методика применения наземного лазерного сканирования для получения метрических характеристик блочных массивов горных пород

Региональным центром лазерного сканирования СГГА совместно с лабораторией горной геофизики Института горного дела СО РАН в рамках проекта проведена исследовательская работа по трехмерной съемке горной выработки с целью получения линейных промеров блочных геоструктур размерами 20 см и крупнее с точностью 1 см для создания объемной цифровой модели и разработки на ее основе методики формирования информационной геомеханической модели строения горного массива. Для этого произведена лазерная съемка части вертикального борта Искитимского карьера (рис. 4.9, см. вклейку) по добыче известняков и построена его фотореалистичная цифровая трехмерная модель.

В основу метода трехмерного лазерного сканирования положен принцип безотражательного (без использования специальных отражающих приспособлений) измерения расстояний при помощи лазера, работающего в импульсном или фазовом режиме. Посланный в определенном направлении импульс отражается от цели и попадает на приемник. Затем по известной скорости распространения и времени прохождения луча вычисляется расстояние до измеряемой точки, как половина их произведения. Фазовый метод основан на определении разности фаз посылаемых и принимаемых модулированных сигналов.

Наземный трехмерный лазерный сканер состоит из трех основных блоков: дальномера, адаптированного для высокой частоты измерений, сканирующего модуля, обеспечивающего высокоточное измерение горизонтальных и вертикальных углов приемопередающего тракта дальномера, и управляющего компьютера (рис. 4.10).

**Оптико-механический блок развертки лазера (блок развертки).** Основными функциями блока развертки являются смещение приемопередающего тракта дальномера и фиксирование углов направленности луча лазера. Блок развертки состоит из оптико-механической системы, включающей зеркальные призмы и сервоприводы, отклоняющие луч лазера в вертикальном и горизонтальном направлениях.

**Дальномерный блок (приемопередатчик).** Выполняет функцию измерения расстояний до сканируемого объекта. В качестве источника излучения использует-

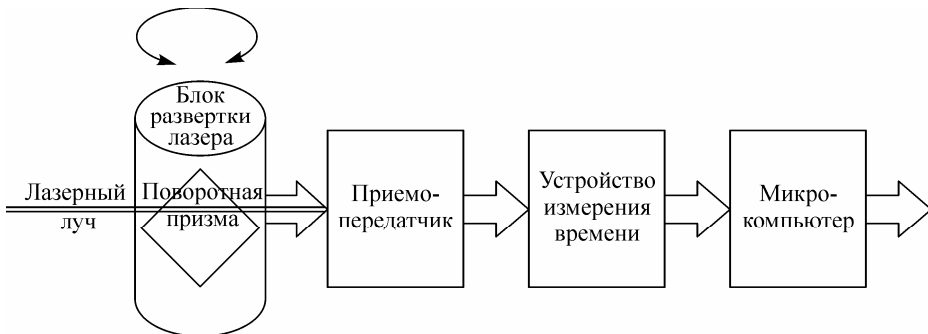


Рис. 4.10. Функциональная схема трехмерного лазерного сканера.

ся полупроводниковый лазер. Расстояние в зависимости от модели используемого лазерного сканера может определяться как по времени прохождения (импульсный метод) сигнала, так и по сдвигу фаз (фазовый метод) сигналов — посланного и отраженного от препятствия.

**Канал передачи данных на управляющий компьютер.** Управление работой лазерного сканера (определение области и частоты сканирования) и передача данных, обработанных при помощи встроенного в лазерный сканер микропроцессора для преобразования в цифровую информацию, происходит при помощи компьютера и специализированных программных продуктов. Для передачи данных различные модели сканеров можно использовать параллельный COM-порт, USB-порт, сетевой протокол TCP/IP либо беспроводную передачу данных (WI-FI).

Результатом наземного лазерного сканирования (НЛС) является трехмерный массив точек с пространственными координатами в системе, направление осей которой определяется конструкцией прибора и его ориентировкой в пространстве (рис. 4.11).

Скорость получения данных у разных моделей лазерных сканеров варьируется в диапазоне  $(5—625) \cdot 10^3$  точек в секунду [22]. Это позволяет за короткое время получить массив точек «Point Cloud», описывающий поверхность объекта исследований. В процессе работ обычно необходимо выполнить несколько сканирований с разных станций установки прибора для того, чтобы полностью охватить объект и исключить теневые зоны, возникающие из-за препятствий на пути прохождения лазерного луча.

Выделяют следующие технологические процессы при наземном лазерном сканировании:

1. Составление рабочего проекта на наземное лазерное сканирование.
2. Составление абрисов, реконструкция.
3. Составление проекта планово-высотного обоснования наземного лазерного сканирования.
4. Создание основного планово-высотного обоснования. Данный процесс выполняется для определения координат опорных точек, с которых будет производиться съемка. Может развиваться прокладыванием теодолитных ходов с использованием электронных тахеометров либо с применением GPS-приемников (спутниковое позиционирование в ста-

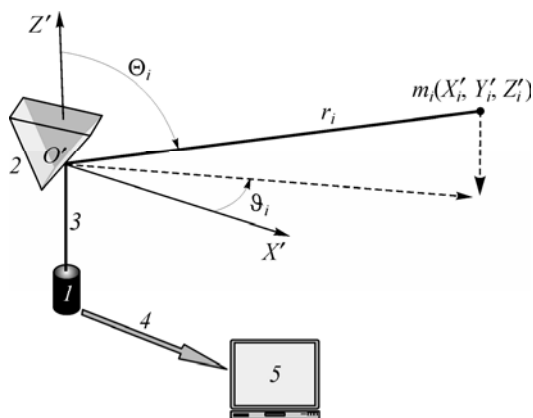


Рис. 4.11. Направление осей системы координат сканера Riegl.

1 — дальномерный блок; 2 — оптико-механический блок развертки лазера; 3 — приемопередающий тракт дальномера; 4 — канал передачи данных на управляющий компьютер; 5 — управляющий компьютер с установленным специализированным программным обеспечением;  $m_i$  — точка отражения лазерного импульса;  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$  — оси системы координат НЛС;  $\vartheta_i$  — измеренный горизонтальный угол на точку отражения  $m_i$ ;  $\Theta_i$  — измеренный вертикальный угол на точку отражения  $m_i$ ;  $r_i$  — измеренное расстояние до точки отражения  $m_i$ .

тическом режиме) при построении цифровой модели объекта (ЦМО) в единой внешней системе координат.

5. Создание рабочего дополнительного съемочного обоснования. Сущностью данного процесса является определение координат центров специальных марок при помощи электронного тахеометра в безотражательном режиме с точек основного съемочного обоснования. Одновременно с подготовкой рабочего съемочного обоснования выполняется наземное лазерное сканирование объектов.

Полевые работы по сканированию части борта горного массива Искитимского карьера выполнялись 3 августа 2006 г. Время, затраченное на проведение работ, составило 2 ч 20 мин. В производстве работ использовалось следующее оборудование.

1. Трехмерный наземный лазерный сканер Riegl LMS-Z420i:
  - максимальная дальность действия (при коэффициенте отражения 80 %) до 1000 м;
  - погрешность измерения расстояний 5 мм;
  - область сканирования: вертикальная 0—80°, горизонтальная 0—360°;
  - минимальный шаг сканирования 0,004°;
  - точность отсчета угла: вертикального 7,2'', горизонтального 9'';
  - скорость сканирования: средняя 8000 точек/с, максимальная 12 000 точек/с;
  - расходимость лазерного луча 0,25 мрад;
  - диапазон рабочих температур (без использования терморегулятора) 0 ÷ ÷ -40 °С;
  - класс безопасности лазера I;
  - вес 14,5 кг [23].
2. Электронный тахеометр Leica 405 с функцией безотражательного измерения расстояний:
  - точность измерения углов 5'';
  - дальность: без отражателя 80 м;
  - точность измерения расстояний 2 мм + 2 мм/км.
3. Переносной укрепленный ноутбук Getac:
  - процессор 1600 МГц;
  - ОЗУ 1 Гбайт;
  - HDD 120 Гбайт;
  - операционная система Windows XP 2002.
4. Светоотражающие марки на подставках с коэффициентом отражения 90 %.
5. Аккумулятор автомобильный: напряжение 12 В, емкость 62 А·ч.

Для того чтобы избежать теневых зон, обусловленных выступающими элементами поверхности объекта, сканирование производилось с двух станций (рис. 4.12, см. вклейку).

Для выявления наиболее оптимального по плотности и времени режима работы прибора на каждой станции выполнено по три экспериментальных сканирования. Всего получено шесть сканов с различным разрешением сканирования: 0,034°, 0,057°, 0,12°. Разрешением сканирования называют угол, на который отклоняется лазерный луч между двумя последовательными измерениями по горизонтали и по вертикали (соответственно различают разрешение сканирования по горизонтали и по вертикали). Анализ полученных данных показал, что оптималь-

ный шаг сканирования для получения метрических данных блочных сред горных выработок при расстоянии до объекта от 25 до 30 м, площади поверхности объекта примерно  $500 \text{ м}^2$  составляет  $0,034^\circ$ , так как плотность получаемого массива точек обеспечивает наиболее детальное отображение характера и формы поверхности геоструктур. Время, требуемое на выполнение сканирования на одной станции с указанным шагом при данных условиях, составило 22 мин.

При объединении данных измерений, полученных с двух и более станций, увеличивается плотность массива точек за счет перекрытия сканов с разных станций. Увеличение плотности измерений позволяет после фильтрации и разрежения данных в процессе обработки получить массив точек, наиболее точно и полно описывающий поверхность исследуемого объекта. В данной работе не требовалось ориентировать модель объекта во внешнюю систему координат, было необходимо лишь обеспечить совпадение оси  $Z$  системы координат модели с отвесной линией. Поскольку лазерный сканер фирмы Riegl не имеет устройства горизонтирования, приведение модели к горизонту положения осуществлялось по координатам центров специальных марок, определенных при помощи электронного тахеометра в условной системе координат.

После окончания полевых работ по сканированию объекта приступают к обработке данных наземного лазерного сканирования.

С разных точек стояния сканера получают по одному и более скану — массиву точек с трехмерными координатами в системе координат сканера. Все сканы, таким образом, получаются в разных системах координат, и каждый описывает только часть поверхности снимаемого объекта. Необходимо сориентировать все сканы в единую внешнюю систему координат, чтобы иметь представление об объекте в целом и обрабатывать данные со всех станций совместно.

Обычно ориентирование сканов производится автоматически в специальном программном продукте, предназначенном для предварительной обработки данных лазерного сканирования.

Ориентирование сканов может производиться двумя способами.

**1. По общим характерным точкам на разных сканах.** За исходный принимается какой-либо скан, к которому последовательно привязывают все остальные посредством общих для предыдущих и каждого последующего скана точек. В качестве таких точек используют специальные светоотражающие марки с коэффициентом отражения 90 %, которые расставляют с условием видимости их с разных станций установки прибора. Координаты центров марок определяются с высокой точностью (порядка 1 мм) лазерным сканером. Если это не представляется возможным, используют комбинированную схему определения координат марок. Единая модель при этом получается в системе координат исходного скана.

**2. По координатам специальных опорных марок.** Опорные марки определяют из планово-высотного обоснования сканерной съемки. Этот способ применяют, если невозможно обеспечить видимость марок с разных станций сканирования. Формула перехода к внешней системе координат выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \mathbf{A} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix},$$

где  $X', Y', Z'$  — координаты точки модели в системе координат сканера;  $X, Y, Z$  — координаты точки модели в системе координат, принятой за внешнюю;  $X_0, Y_0, Z_0$  — начало системы координат сканера во внешней системе координат;  $\mathbf{A}$  — ортогональная матрица размером  $3 \times 3$ , описывающая начало и разворот системы координат сканера относительно внешней системы [24].

Оценка точности внешнего ориентирования сканов выполняется по средней квадратической ошибке определения положения марок относительно внешней системы координат, которая сравнивается с допуском, предусмотренным проектной точностью. Средняя квадратическая ошибка единицы веса (standart deviation) вычисляется по формуле [25]

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{вн}})^2 + (Y_i - Y_{\text{вн}})^2 + (Z_i - Z_{\text{вн}})^2}{3n - 6}},$$

где  $X_i$  — координаты марок во внешней системе координат, вычисленные по результатам наземного лазерного сканирования;  $X_{\text{вн}}$  — координаты марок во внешней системе координат, полученные геодезическим методом;  $n$  — количество марок.

Обычно значение  $\mu$  вычисляется автоматически в программном обеспечении, в котором производилось внешнее ориентирование сканов. После ориентирования сканов получают единый массив точек лазерных отражений от объекта с пятью характеристиками, а именно, пространственными координатами ( $X, Y, Z$ ), интенсивностью и реальным цветом.

После того как все сканы приведены в одну систему координат, данные лазерного сканирования переводятся в формат программы, в которой будет производиться обработка и создаваться векторная модель объекта.

На первом этапе обработки данных производится фильтрация массива точек в соответствующем программном продукте. Фильтрация и разрежение делается для того, чтобы удалить шумы (измерения, не относящиеся к объекту, — отражения лазерного луча от людей, транспорта, растительности и других посторонних объектов), возникающие в процессе съемки; устранить части основного объекта, которые не будут использованы в дальнейшей работе, а также чтобы «облегчить» модель, так как из-за большого количества данных с ней трудно работать. Фильтрация может производиться двумя способами: «вручную» и автоматически. В первом способе исполнитель с помощью специальных инструментов, предлагаемых программой, самостоятельно указывает точки, которые нужно удалить или оставить.

Во втором способе программа при помощи пространственных фильтров по заданным исполнителем критериям производит разрежение облака точек. Обычно в программных продуктах для обработки данных наземного лазерного сканирования реализовано несколько принципиальных способов фильтрации точек. Например, можно удалить часть точек модели в случайном порядке, оставив долю от их исходного количества; либо упорядочить расположение точек, обусловив их расположение минимальным расстоянием между ними.

Данные, полученные со сканера, в большинстве случаев неоднородны по плотности расположения точек. Даже после процесса фильтрации точки модели будут расположены нерегулярно, т. е. хаотично. Для более точного отображения

поверхности и лучшей ее визуализации необходимо создать регулярную сеть точек. Эта функция также поддерживается программными продуктами для обработки данных наземного лазерного сканирования.

На основе опытных данных выявлено, что для отображения элементов поверхности размерами от 20 см и крупнее необходимо, чтобы расстояние между точками составляло примерно 5 см. При этом сканирование должно производиться примерно в 3 раза плотнее, чтобы после фильтрации и регуляризации плотность расположения точек составила необходимую величину [26]. Так, при расстоянии от сканера до объекта около 15 м шаг сканирования должен быть не более  $0,057^\circ$ , чтобы расстояние между точками составило 1,5 см.

После процесса фильтрации и регуляризации облака точек выполняют построение цифровой модели объекта в виде триангуляционной (Mesh) или полиномиальной (NURBS — Non-uniform Rational B-Spline) поверхности. В процессе выполнения данного этапа обработки точечная (растровая) модель преобразуется в векторную модель, описывающую особенности поверхности данного объекта.

Разные виды поверхностей определены разными математическими методами их построения. При построении NURBS-поверхности участок моделирования предварительно разбивается на фрагменты, а фрагмент — на элементарные участки прямоугольной формы, в каждом из которых поверхность аппроксимируется полиномом вида

$$P(X, Y) = \sum \sum a_{ij} T_i(X)T_j(Y).$$

Коэффициенты полинома  $a_{ij}$  находятся по методу наименьших квадратов при условии непрерывности на границах элементарных участков.

В триангуляционной поверхности каждая точка — вершина треугольника описывается пространственными координатами  $(X, Y, Z)$ . Разновидностью триангуляционной поверхности является

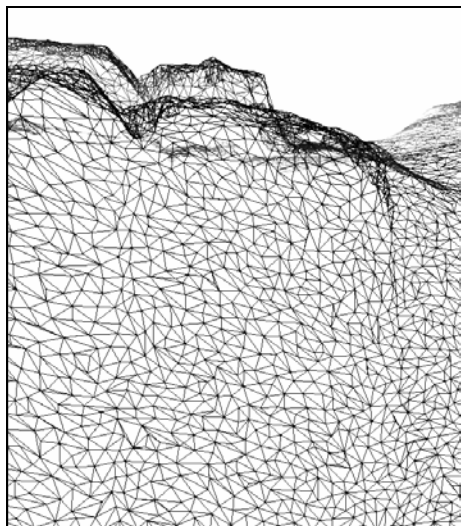


Рис. 4.13. TIN (Triangulated Irregular Network) — нерегулярная триангуляционная сеть.

триангуляционной поверхности является TIN (Triangulated Irregular Network) — нерегулярная триангуляционная сеть, описание поверхности треугольными гранями, при котором каждой точке данных в пространстве соответствует треугольник опорной сетки (рис. 4.13). Существует множество аналитических методов формирования цифровых моделей поверхности, но наиболее востребованными из них являются методы: Кригинга, радиометрическая интерполяция, поверхностей минимальной кривизны (сплайнов), полиномиальная регрессия, Шепарда, триангуляция с линейной интерполяцией.

Triangulation with Linear Interpolation — метод триангуляции с линейной интерполяцией является быстрым при работе со всеми наборами данных.

Метод заключается в построении треугольных ячеек на узлах исходной модели. Он эффективен для умеренного количества отметок точек, но его производительность быстро падает с увеличением объема исходной модели. Основное достоинство такого метода состоит в том, что при достаточно подробных исходных данных он точно передает крутые обрывы и даже вертикальные участки рельефа. В ряде случаев, например, при исходной модели в виде профилей рельефа, триангуляция становится неэффективной из-за неоднозначности формирования треугольников.

Обычно триангуляционная поверхность не имеет идеальную структуру, точно описывающую поверхность объекта, а имеет некоторые недостатки в виде «всплесков» (резко выделяющихся на общем фоне остроконечных вершин, в которых сходятся несколько треугольников), пересекающихся граней треугольников сетки, «висячих» треугольников (не имеющих общих точек с основной поверхностью), дыр, а также треугольников с неверным направлением нормали. Недостатки такого рода возникают из-за сравнительной неоднородности расположения узловых точек TIN даже после разрежения и регуляризации. В программных продуктах, работающих с TIN, обычно реализовано несколько инструментов автоматического или полуавтоматического устранения недостатков подобного рода.

Иногда при отсутствии указанных недостатков модель поверхности выглядит чересчур шероховатой, особенно при достаточно большой плотности узловых точек. Для того чтобы сделать поверхность более ровной и спокойной, применяют методы сглаживания, это позволяет генерализировать сеть треугольников. Этот процесс, по сути, аналогичен разрежению облака точек с тем преимуществом, что на данном этапе наглядно видна триангуляционная поверхность, и интенсивность ее сглаживания определяется пользователем в интерактивном режиме. В зависимости от задач, решаемых в будущем по цифровой модели, возможно применение обратного метода — сгущения триангуляционной сети путем деления имеющихся треугольников на более мелкие. Это обеспечивает более корректное моделирование незначительных по размерам элементов объекта.

Заключительным этапом обработки данных является текстурирование модели. Текстурирование заключается в назначении поверхности ее цифрового фотоизображения для лучшей ее визуализации. Для получения качественной фотореалистичной модели необходимо соблюсти некоторые основные требования к фотографиям. При фотографировании нужно стремиться к тому, чтобы плоскость снимка была параллельна поверхности объекта. Необходимо избегать перпендикулярного расположения граней объекта к плоскости фотографирования, это приводит к «растягиванию» изображения на поверхности модели. Также стремятся к максимальному охвату одним снимком наибольшей части поверхности объекта. При невозможности выполнения этого требования объект фотографируют с нескольких сторон с перекрытием, а затем используют разные фотоснимки для текстурирования отдельных частей модели.

Лазерные сканеры некоторых моделей оборудованы встроенной цифровой видеокамерой либо имеют возможность использования внешней подключаемой камеры (например, сканер фирмы Riegl LMS-Z420i). Однако разрешение встроенной камеры не всегда обеспечивает необходимое качество снимков, тогда можно использовать обычную цифровую фотокамеру. Чем более детально необходимо отобразить объект, чем дальше он находится от точки фотографирования, тем



больше следует выбирать разрешение камеры (4 мегапиксела и более). Для получения фотографий при проведении данной работы использовалась цифровая фотокамера Nikon COOLPIX с разрешением 3,2 мегапиксела.

Наложение цифрового снимка на триангуляционную поверхность осуществляется по характерным точкам на модели и на снимке. Всего необходимо минимум четыре таких контрольных точки, чтобы однозначно определить местоположение снимка на модели и его масштаб. При отсутствии характерных точек можно использовать специальные марки, которые размещаются на объекте во время сканирования и фотографирования, а затем выступают в качестве опорных точек при текстурировании.

При выполнении данной работы использовалось следующее программное обеспечение:

Riegl RiSCAN PRO (управление сканером и внешнее ориентирование сканов);

Trimble RealWorks Survey (фильтрация массива точек, построение триангуляционной поверхности, текстурирование модели, выполнение линейных промеров).

Полученная фотореалистичная цифровая модель объекта, характеризующаяся высокой степенью детальности и наглядности, показана на рис. 4.14 (см. вклейку).

Готовая цифровая модель объекта позволяет выполнить линейные промеры геоблоков горного массива с необходимым уровнем точности без проведения работ в полевых условиях. Представленную объемную цифровую модель вертикального борта карьера можно также использовать для получения метрических характеристик (линейных и угловых) элементов объекта [27, 28], построения планов, сечений и профилей, определения площадей и объемов и их изменения. Преимущества данного метода (дистанционность измерения, высокая скорость, точность и полнота получения данных) позволяют считать эту технологию полноценной альтернативой традиционным методам теодолитной съемки, а также расширить круг задач, решаемых по цифровой модели.

#### **4.6.2. Структурирование геоблоков по разломам, выделяемым в поверхностных слоях, и результаты выделения блочности**

В зоне Шипуновского месторождения известняков присутствуют пликативные (складчатые), дизъюнктивные (разрывные) и инъективные (кластические внедрения) нарушения геоструктуры, представленные в объемной цифровой трехмерной модели борта карьера линейными объектами различной протяженности (рис. 4.15, см. вклейку).

Многие из разрывных нарушений проявляются или четко выражены в наличии пространственных разрывов и сдвигов пластов известняка, а также в сочленении разнотипных геоструктурных элементов, часть из которых достигает в длину 500 м и более с амплитудой до 30—50 м. Сместители сопровождаются сближением поверхностей скалывания и динамокластитами различной степени преобразования, составляющими в совокупности «зоны дробления» шириной десятки метров и более. Наряду со взбросами и надвигами встречаются сбросы, сдвиги и комбинированные формы.

Формирование геоблоков в поверхностных слоях происходило, безусловно, под воздействием геологических процессов, проявление которых приводило к образованию разрывных нарушений и разломов. Ниже на основе предложенного в работах [16, 20] способа структурирования массива горных пород по выделенной системе геолого-геомеханических нарушений выполнен анализ геоинформационных данных, которые представлены триангуляционной сетью в объемной цифровой трехмерной модели вертикального борта карьера «Искитимраморгранит» Шипуновского месторождения известняков, построенной методом лазерного сканирования.

Исходные данные, представленные триангуляционной сетью цифровой модели, были обработаны по методике, изложенной в [16, 20]. В рассматриваемой структуре были выделены типовые узловые схемы, которые, за исключением единичных случаев, характеризуют взаимное расположение разрывных нарушений и геологических разломов (см. рис. 4.15) в виде:

- а) непересекающихся линий (линии практически параллельны или с плавными изгибами);
- б) сочленяющихся под малым (до  $30^\circ$ ) углом при схождении трех линий в одной точке;
- в) пересекающихся под малым (до  $30^\circ$ ) углом двух линий;
- г) сочленяющихся под большим (до  $90^\circ$ ) углом при схождении трех линий в одной точке.

Линейные промеры геоблоков и разломов цифровой модели борта карьера (см. рис. 4.15) были выполнены для места установки многоканального продольного деформометра, сейсмоприемников измерительной системы «ЛАВА СМ» и проведения измерений электромагнитной эмиссии. Измерения и графическая обработка информации проводились в соответствии с методикой [16] на основе данных объемной цифровой модели, полученной с использованием программных средств *Суслоне*. При обработке в системе *Суслоне* был выбран формат, исключающий искажение при преобразовании и конвертировании данных. Это позволяет избежать искажения координат отрезков при преобразовании данных. Используемый набор процедур ставит в однозначное соответствие определяемую линейную характеристику выделенному геоблоку.

Поочередным перебором и измерением расстояний до границ по каждому геоблоку, разрыву и разлому был получен набор данных, содержащий численные значения  $\Delta_i$  — линейных размеров геоблоков, и составлена таблица «Размеры выделенных геоблоков», где выходные геоинформационные данные представлены в формате объемной цифровой модели *Суслоне* с линейными графическими объектами общим числом 3162 (табл. 4.2). Построение отрезков показано на рис. 4.15. При измерениях для выделяемых геоблоков максимальный размер принят  $\sim 600$  см; минимальный ограничен  $\sim 10$  см; результаты измерений округлялись с точностью до 0,1 см. В сформированной табл. 4.2 данные характеризуют линейные размеры выделяемых геоблоков по внешним границам и вложенным структурам.

В табл. 4.2 представлен фрагмент результатов измерений, а на рис. 4.16 эти результаты даны по всей выборке данных. Результаты простейшей статистической обработки данных для всех выделенных линейных размеров геоблоков следующие. Размеры, см: 601,9, 595,9, 595,6, 579,4, 579,2, 552,3, 528,7, 321,8, 310, 307,4,

305,7, 299,4, 284,2, 279,5, 263,4, 263,4, 261,2, 259,8, 244,9, 231,7, 229,3, 225,5, 218,4, 218,2, 213,8, 213,4, 204,9, 201,5, 200, 188,7, 188,4, 182, 179,7, 176,9, 176,8, 174,9, 171,6, 169,1, 168,5, 166, 165,6, 164,1, 162,4, 162,4, 157,7, 156,6, 156,3, 155,7, 150,8, 150,1, 149,1, 147,9, 147,6, 147,2, 146, 145,8, 145,7, 145,6, 145,1, 144,9, 144,6, 144,5, 144,1, 144,1, 143,9, 143,5, 143, 142,8, 142,5, 142,4, 142,4, 142,3, 142,1, 141,4, 140,9, 140,7, 140,4, 140, 139,7, 139,7, 138,9, 138,8, 138,4, 138,4, 138, 137,9, 137,8, 137,4, 137, 136,9, 135,5, 135,1, 135, 134,9, 134,7, 134,5, 134,3, 134,3, 133,4, 132,9, 132,7, 132,6, 132,5, 132, 131,8, 131,7, 131,1, 130,6, 130,5, 130,4, 129,8, 129,8, 129,7, 129,7, 129,6, 129,3, 128,3, 128,3, 127,8, 127,8, 127,3, 126,9, 126,8, 126,5, 126,5, 126,4, 126,3, 126,2, 126,1, 125,9, 125,6, 125,4, 125,3, 125,2, 125, 124,6, 124,5, 124,5, 123,9, 123,7, 123,7, 123,5, 123,2, 122,9, 122,8, 122,8, 122,8, 122,7, 122,5, 122,4, 122,4, 122,1, 122, 121,7, 121,6, 121,5, 121,4, 121,2, 121, 121, 120,7, 120,4, 120,3, 120,1, 119,8, 119,6, 119,6, 118,6, 118,5, 118,3, 118,2, 118,1, 118,1, 117,8, 117,7, 117,7, 117,6, 117,5, 117,5, 117,4, 117,3, 116, 115,6.

Таблица 4.2

Параметры геоблоков выделенных по геоинформационным данным объемной цифровой модели борта карьера Шипуновского месторождения известняков

Наименование параметра и размерность	Численное значение
Количество выделенных геоблоков	3162
Максимальный размер геоблока, см	601
Минимальный размер геоблока, см	10

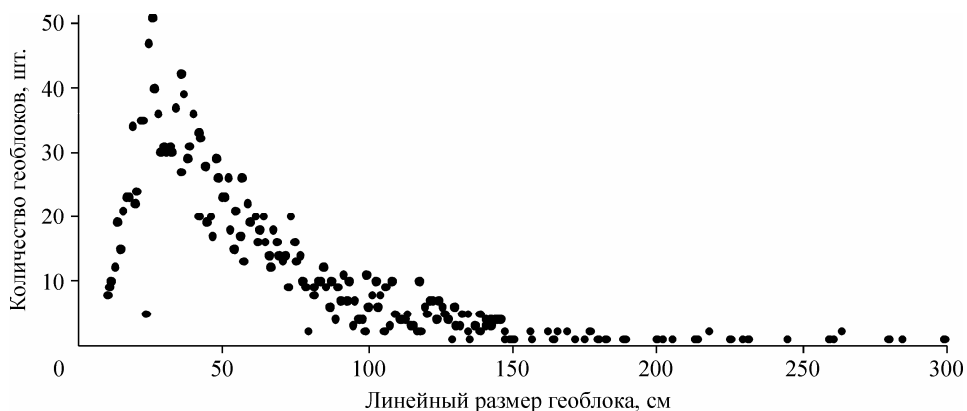


Рис. 4.16. Распределение линейных размеров геоблоков, выделенных по слою «Разрывные нарушения».

#### 4.7. ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

В условиях масштабного недропользования и концентрации на небольших территориях множества шахт и разрезов необходимо создание региональной сис-

темы мониторинга в связи с формированием геомеханического пространства, опасного по геодинамическим проявлениям. Представлена структура информационного обеспечения такой системы, включающая информационные модели геологической среды и базы данных инструментальных наблюдений за деформационными процессами.

#### **4.7.1. Условия формирования геомеханического пространства при разработке угольных месторождений Кузбасса**

Геологическое строение Кузбасса определяет неравномерное распределение угледобывающих предприятий (подземных и открытых) по площади бассейна — сосредоточение их вдоль юго-западной, наиболее угленосной, границы бассейна. В стратиграфическом разрезе этой части бассейна представлено 133 кондиционных пласта с суммарной мощностью 346 м (в основном — верхний палеозой). Для сравнения: в восточной части залегают 49 кондиционных пластов с суммарной мощностью 94 м [29]. Эти территории подвергнуты более интенсивным тектоническим воздействиям. Если северо-восточные и юго-восточные районы характеризуются субплатформенным тектоническим режимом, то юго-западные и северо-западные окраины бассейна формировались в условиях режима, близкого к геосинклинальному, и отличаются интенсивной дислоцированностью угленосных толщ. Складчатые дислокации представлены от микроформ, не выходящих за пределы мощности пласта и породного слоя, до крупных складок протяженностью в десятки километров с амплитудой до 1000 м. Разрывные дислокации представлены от едва заметных трещин до региональных разломов протяженностью более 100 км с амплитудой до 2—3 км. Мелкие разрывы отличаются разнообразной морфологией и беспорядочной ориентацией [29, 30].

Трещиноватость горного массива в бассейне систематизируется по генезису и наслоению (трещины: послонные, нормальные и кососекущие). Трещинам приписывают локальное распространение в пределах слоя или группы слоев (пластов), их происхождение объясняется диагенетическим уплотнением или образованием складок [30]. На территории бассейна выделено множество разномасштабных линейных элементов, группирующихся в четыре региональные системы преимущественно в виде зон повышенной трещиноватости. Выявленная линейная сеть по отношению к складчатой структуре в большинстве случаев носит наложенный характер, что свидетельствует о наличии в угленосной толще сквозных региональных систем трещин наряду с локальными [31].

Территория Кузбасса входит в число опасных горно-добывающих регионов по геодинамическим явлениям (сейсмичность по шкале Рихтера — до 7 баллов). За период наблюдений (200 лет) отмечено 12 землетрясений с магнитудой 3,6—6,5, а с меньшими — ежегодно фиксируются сотни. Развитая складчатость обусловила сложную картину распределения напряжений в массиве горных пород, с превышением горизонтальной составляющей в 1,5—3 раза над вертикальной [32].

Глубина большинства действующих разрезов находится на уровне 200 м и более. В результате этого в последние годы возникли проблемы с обеспечением устойчивости бортов. Участились заколы в прибортовых массивах, оползни и осыпи

бортов и отвалов. Эти явления происходят не только по причине изменения во времени деформационных свойств пород под влиянием проникновения в глубь массива атмосферных и промышленных вод, но и из-за несоответствия фактических параметров бортов допустимым углам устойчивости откосов, а также по причине нагружения бортов внешними отвалами.

С увеличением глубины разрезов возникли новые проблемы, показывающие, что пренебрегать влиянием выделяемого метана при открытом способе добычи угля небезопасно. Например, на разрезе «Бачатский» первые случаи воспламенения метана при взрывных работах наблюдались уже на глубинах 80—100 м от поверхности, а при достижении глубин 150—200 м газовые потоки стали систематически представлять технологическую опасность [33].

Существенная особенность разработки месторождений Кузбасса заключается в концентрации открытых и подземных горных предприятий на сравнительно небольших территориях. В качестве примера на рис. 4.17 показан фрагмент схемы южного района бассейна [34], где на площади ~70 км<sup>2</sup> располагаются четыре разреза — Сибиргинский (№ 1), Красногорский (№ 2), Междуреченский (№ 3), Томусинский (№ 4) — и шахта Томская. На прилегающей территории размещаются и

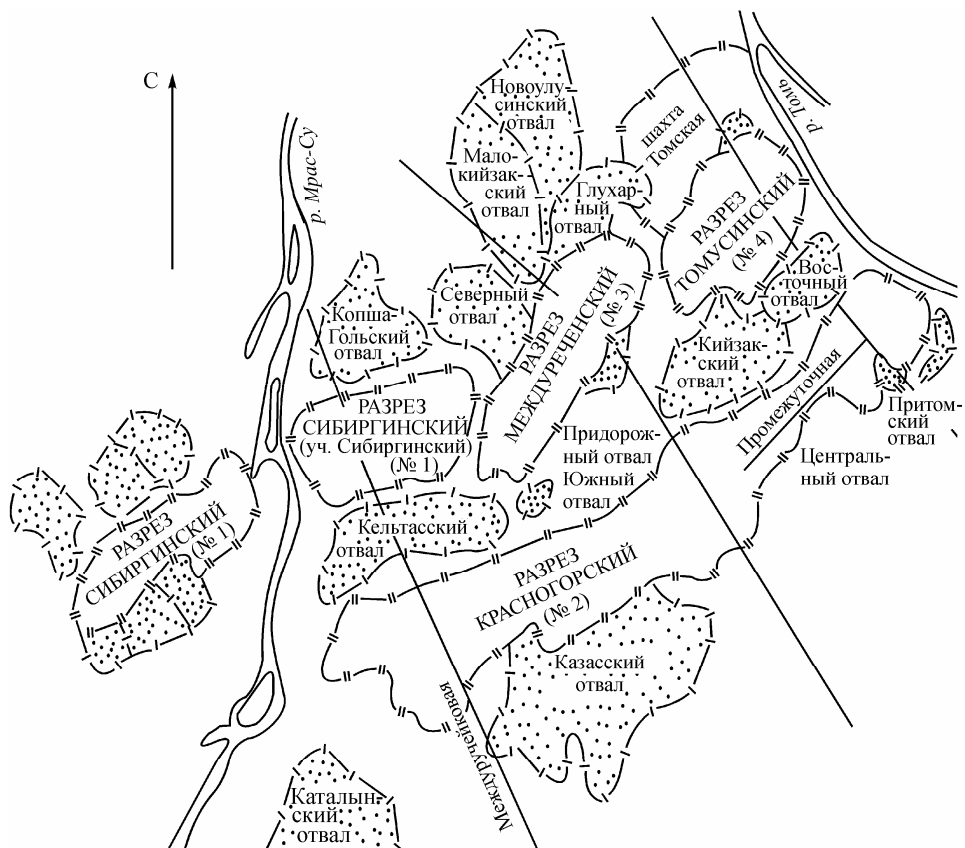


Рис. 4.17. Схема расположения горных предприятий

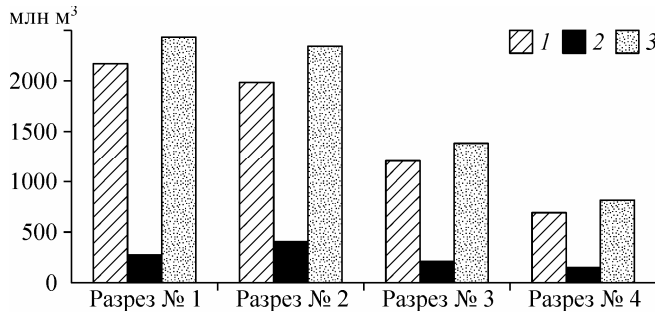


Рис. 4.18. Диаграмма распределения вынимаемых объемов по разрезам Междуречья на момент завершения горных работ.

1 — вскрыша, 2 — уголь, 3 — горная масса.

внешние отвалы. С извлечением промышленных запасов в контурах разрезов (ориентировочно к 2030 г.), на территории сформируется выработанное пространство объемом  $\sim 7 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  (рис. 4.18). Часть пространства объемом  $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  заполнится внутренними отвалами ( $\sim 30\%$  от объемов вскрыши). Объем пород, перемещенный во внешние отвалы, составит  $\sim 4,1 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ . За пределы региона будет вывезено  $\sim 0,95 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  ( $\sim 1,2 \cdot 10^9 \text{ т}$ ) угля. Незаполненный объем выработанного пространства составит  $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ .

Такие масштабы нарушений земной поверхности и верхнего слоя литосферы, сконцентрированные на незначительной площади, приводят к структурным изменениям сопредельных территорий. Но прогнозы последствий отсутствуют. Проектными решениями определен порядок разработки указанного месторождения, в продуктивной толще которого залегают 35 пластов [34]. Пласты 1—6 (нумерация сверху вниз) расположены в границах разрезов № 1, 3, 4. Эти пласты разрабатываются и шахтой «Томская». Пласты 24—35 (стратиграфически нижняя группа) разрабатываются разрезом № 2. Пласты 7—23, залегающие в средней части свиты, пока не разрабатываются (рис. 4.19). Предполагалось, что разработка этой группы пластов будет осуществляться подземным способом. В настоящее время площадь ( $\approx 1600 \text{ га}$ ) над этими пластами нагружена внешними отвалами. Вопрос о влиянии их массы на условия разработки подземным способом пластов средней группы не исследовался.



Рис. 4.19. Положение горных выемок к моменту завершения выемки запасов



разрезами —  $17,8 \cdot 10^3$  га; нарушение гидрологического режима —  $37,24 \cdot 10^3$  га; деформация поверхностей —  $19,96 \cdot 10^3$  га. В сумме будет изъято и нарушено 46 % площади района [35]. Но это лишь видимая и легко оцениваемая часть последствий концентрации горных предприятий. Вопросы прогноза изменений геодинамической обстановки в регионе во времени в проекте не рассматривались, потому что пока нет методов для подобного прогноза. Между тем наличие таких методов позволило бы обоснованно определить допустимую концентрацию горных объектов на территории региона и установить рациональный порядок их строительства и режима эксплуатации не только по экологическим ограничениям, но и с учетом геодинамических проявлений.

В качестве информативных параметров оценки динамики формирования техногенного геомеханического пространства, формируемого посредством открытых геотехнологий, воспользуемся показателями, оценивающими интенсивность (скорость) разрушения исходного состояния горного массива не только на площади ведения горных работ, но и на прилегающей территории. Поскольку речь идет об изменениях во времени пространства с геометрическими границами, то количественная их оценка выполняется соответствующими показателями:  $m^3/T$ ;  $m^2/T$ ;  $m/T$ , где  $T$  — временной срез (год, месяц, сутки, час, минута, секунда), определяемый требованиями решаемой задачи.

Основополагающим показателем техногенного геомеханического пространства является объем карьера (выработанного пространства или выемки), поскольку другие показатели (площади земель под отвалами, под депрессионными воронками, области разгрузки и др.) являются производными от него. Этот показатель можно использовать как для общей оценки формирования техногенного геомеханического пространства, так и для оценки с детальной координатной привязкой к конкретному горному массиву.

В качестве примера оценим скорости формирования выработанного пространства в целом по Кузбассу, рассчитав объемы выемок по годам ( $V$ ,  $m^3$ ) по выражению

$$V = P \cdot \theta; \theta = (K_b + 1/\gamma)/(1 - \xi),$$

где  $P$  — масса добытого угля, т;  $\theta$  — коэффициент, определяющий удельный объем выемки, зависит от природных и технологических условий,  $m^3/т$ ;  $K_b$  — коэффициент вскрыши,  $m^3/т$ ;  $\gamma$  — плотность угля,  $т/m^3$ ;  $\xi$  — коэффициент технологических потерь угля, д. ед.

Суммарный объем выемок, созданных за последние 25 лет открытой разработки в Кузбассе, превысил  $11 \cdot 10^9 m^3$ , что потребовалось для добычи  $1428 \cdot 10^9$  т угля. В среднем за эти годы для добычи 1 млн т угля объем выемки в горном массиве составил  $7,9 \cdot 10^6 m^3$ . Удельный объем выемок в последние годы уменьшился с  $9,8 m^3/т$  в 1993 г. до  $6,48 m^3/т$  в 2004 г. (рис. 4.21). Но это снижение временное и объясняется как вводом новых разрезов, работающих в окрестности границ выходов пластов, так и нарушением технологического регламента (невыполнение требуемых по технологии объемов вскрыши). В настоящее время скорость формирования объемов выемок открытыми геотехнологиями в Кузбассе оценивается на уровне  $(1,3—1,5) \cdot 10^6 m^3/сут.$  Для сравнения: при подземной добыче угля в Кузбассе скорость формирования горных выработок (сумма очистных и подготовительных) в последние годы находится в пределах  $(0,15—0,25) \cdot 10^6 m^3/сут.$



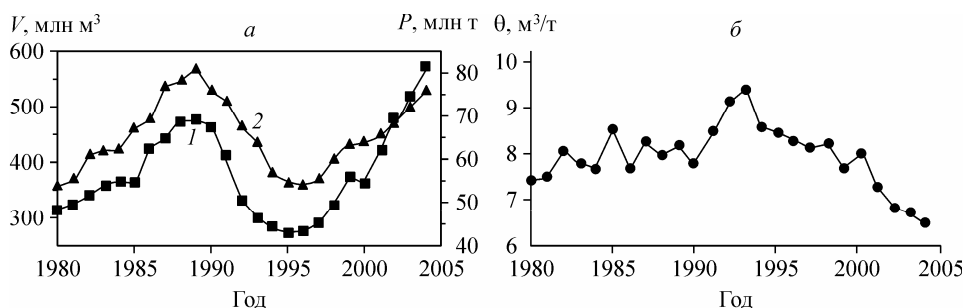


Рис. 4.21. Динамика вынимаемых объемов вскрыши разрезами Кузбасса.

а: 1 — уголь ( $P$ , млн т), 2 — вскрыша ( $V$ , млн  $\text{м}^3$ ); б — удельные объемы ( $\theta$ ,  $\text{м}^3/\text{т}$ ). Построено по [36, 37].

Масштабные объемы выемки горной массы сопровождаются изъятием соответствующих площадей земной поверхности для размещения отвалов, в которые складываются примерно 70 % породы. Удельная землеемкость внешних отвалов определяется рельефом местности, на которой они создаются, и оценивается в пределах  $(10\text{—}40) \cdot 10^4 \text{ м}^2$  на 1 млн т добытого угля [38].

Крупномасштабные воздействия на верхнюю часть литосферы процессами открытой угледобычи не ограничиваются только изъятием земель, выемкой и перемещением больших объемов горной массы. С исчерпанием запасов горные выемки, как правило, рекомендуется использовать под водоемы, что не исключает проявлений опасных реакций среды в новых условиях: оползни бортов из-за изменений свойств пород в водонасыщенном состоянии; формирование непредсказуемых гидрогеологических режимов на прилегающих территориях. При этом нельзя исключить влияния измененных гидрогеологических ситуаций на подземные горные выработки, располагаемые в пределах границ создаваемых водоемов.

Известно, что при заполнении водохранилищ проявляется индуцируемая сейсмичность, занимающая первое место в мире в ряду техногенных землетрясений. Размеры зон активного возбуждения сейсмичности достигают 10—50 км. Механизмы ее возникновения: рост напряжений и увеличение порового давления от веса воды, повышение уровня подземных вод, ослабление сил сцепления между блоками породы и пр. Длительность подготовки гидродинамических явлений различна: от 2—4 до 10—20 лет после заполнения водохранилищ. Однако не каждое водохранилище является источником сейсмичности — ее проявление зависит от тектонической и сейсмической активности региона, а также от глубины водохранилища [39].

Техногенные нагрузки на горный массив создаются за счет: образования в недрах выемок больших объемов; перемещения и складирования значительного количества породы на поверхности; нарушения сложившегося гидрологического режима; воздействия на горный массив энергии массовых технологических взрывов. Все это приводит к изменениям напряженного состояния на неоднородностях в геологической среде — в областях образования выемок происходит разгрузка массива, а на участках формирования отвалов и депрессионных воронок массив нагружается, что ведет к нарушению изостатического равновесия. В результате в сочетании с воздействиями технологических взрывов комплекс влияющих факто-

ров приводит к изменениям структурных и прочностных характеристик горного массива.

В целом действие техногенных нагрузок в области непосредственной добычи (прибортовые зоны разрезов, пространство над подземными выработками) и за счет перемещения и складирования больших объемов горной массы различно. Если в подземных условиях их влияние локализуется в областях, в 3—5 раза превышающих нарушенные, проявляясь в виде зональной дезинтеграции [40], то при открытой разработке влияние техногенных нагрузок прослеживается на километры. Учитывая, что геометрические размеры выемок карьеров с увеличением глубины горных работ постоянно возрастают, то в зоны деформаций вовлекаются сопредельные тектонические блоки разных масштабных уровней, контролирующими напряженное состояние на больших площадях. Возникающие при этом диссипативные структуры обуславливают появление неустойчивых состояний в геологической среде, приводящих к различного вида техногенным проявлениям.

В сложных геолого-тектонических условиях бассейна острота проблемы предупреждения техногенных явлений, традиционно считавшаяся прерогативой подземных технологий, эволюционирует в качественно новое состояние. При этом речь идет о геомеханической эволюции природно-техногенной системы, где в результате взаимодействия технологических процессов с геологическими объектами пространственная локализация геодинамических событий с равной вероятностью может индуцироваться как автономно подземными или открытыми объектами горных работ, так и в результате их совместного взаимодействия.

#### **4.7.2. Принципы создания систем геодинамического мониторинга**

Системам контроля, прогноза, предотвращения техногенных катастроф и управления геомеханическими процессами в практике подземного освоения недр уделяется большое внимание [41—44], чего не отмечается по отношению к предприятиям с открытым способом разработки. Особенно вне внимания оказалось создание систем контроля геодинамической обстановки на месторождениях, разрабатываемых одновременно шахтами и разрезами и образующих взаимодействующие геодинамические зоны. Анализ существующих подходов к созданию мониторинговых систем показал ряд характерных тенденций [45]:

1. Для решения проблемы используются методы сейсмологии по причине того, что не установлено принципиальных различий между механикой техногенной и естественной сейсмичности. Использование сейсмологических методов осуществляется обустройством в комплексе с наземной и подземной сетью сейсмопавильонов для координатной привязки сейсмособытий, индуцируемых техногенными воздействиями. В результате формируются условия для построения внутренне связанной иерархической сети подземных и наземных сейсмопавильонов, открытой для внешних связей с глобальной сетью сейсмических станций.

2. Создание шахтных систем контроля в методическом отношении ориентировано на использование опыта регистрации и обработки сейсмологических данных, но применительно к сейсмособытиям значительно более низких энергетических уровней: толчки, горные удары, техногенные землетрясения. Несмотря на

предпринимаемые усилия по адаптации и совершенствованию методов «большой сейсмологии» применительно к подземным условиям, получить на этой методологической базе надежные критерии прогнозирования катастрофических процессов по месту и времени пока не удалось, поскольку, по сути, копировалась идеология, не оправдавшая себя в «большой» сейсмологии на протяжении минувшего века. Совещание по прогнозу землетрясений (Лондон, 7—8 ноября, 1996 г.) констатировало их непредсказуемость и весьма пессимистично оценило перспективы на будущее [46].

3. На открытых горных предприятиях ключевая роль в системах геомониторинга принадлежит средствам измерения деформаций непосредственно в массивах блочно-иерархических геосред, а также инструментальным наблюдениям за движением земной поверхности как традиционными геодезическими методами, так и с использованием систем GPS, ГЛОНАСС, GNSS. Особое внимание уделяется сейсмическим методам, способным фиксировать изменения колебаний пород в процессе формирования оползней и обрушений бортов карьеров, так как моменту нарушения среды предшествует снижение скоростей упругих волн, что объясняется растягивающими деформациями, а наибольший диапазон изменений сейсмических характеристик наблюдается вблизи границ разрушения горного массива [47—52].

4. Создание мониторинговых систем техногенных катастрофических явлений на горных предприятиях пока не дает удовлетворительных прогнозов. Основная причина — хаотический характер динамики сейсмоактивных разломов в принятом для прогноза масштабе времени (год, месяц, день). В системе разломов действуют механизмы, создающие сильную неустойчивость: вторжение флюидов, химическое разупрочнение пород, фазовые переходы с потерей объема, а также чисто механические явления — деформации, трещинообразование, сдвиги, смятие пород и т. д. Действуя вместе, эти механизмы превращают горный массив в нелинейную геомеханическую среду, состояние которой сложно прогнозировать [53].

5. В последние годы более четко проявляется новая тенденция в развитии мониторинговых систем: включение в анализ совокупности разнородной информации о массивах горных пород с характеристиками их физико-механических свойств; использование геолого-структурной, петрофизической и другой информации, совмещенной с планами ведения горных работ. Развитие этого направления связывается с использованием моделей геологической среды не только отдельных предприятий, но и крупных горно-промышленных регионов.

#### **4.7.3. Информационные аспекты регионального мониторинга геодинамических явлений**

В [16, 54—57] представлена общая характеристика создаваемой геоинформационной системы Кузбасса и этапы ее разработки. Совокупность информации о геологических условиях представляется блоком «Геология и тектоника Кузнецкого бассейна». В ИУУ СО РАН создана электронная версия геолого-промышленной карты Кузбасса в масштабе 1 : 100000, ранее представленной графически [29]. Карта выполнена в географической системе координат и включает множество информационных слоев, в том числе горные отводы действующих и резервных участков угледобычи, опорные разведочные скважины, линии и профили, границы

геотектонических зон и пр. [7]. В электронной версии карты используется векторно-топологическая (геореляционная) модель пространственных данных, в которой связи между атрибутами и пространственными данными устанавливаются через идентификаторы элементарных и комплексных объектов.

В 2008 г. информационная модель системы была расширена за счет создания универсального хранилища данных, одним из компонентов которого является блок электронной геолого-промышленной карты. Использование данного подхода позволяет решать широкий круг задач регионального мониторинга геомеханических явлений, так как хранилище содержит различные типы данных: векторные, графические, текстовые, дистанционного зондирования. Отличительной чертой предложенного подхода является то, что данные в хранилище могут корректироваться на основе спутниковых снимков, и тем самым актуализация геодинамической информации будет происходить регулярно в реальном масштабе времени.

#### **4.7.4. Хранилище данных по угольной промышленности Кузбасса**

В процессе создания системы геодинамического мониторинга было разработано хранилище данных на основе не имеющего мировых аналогов геоинформационного банка данных (ГБД) ИУУ СО РАН по угольной промышленности Кузбасса. ГБД содержит пространственные данные по разрабатываемым и нераспределенным участкам, шахтным полям, геолого-экономическим районам, физической, административной, промышленной и транспортной картам Кузбасса, картам водного бассейна и др. Хранилище данных расширено комплексной ГИС по сейсмической активности и экологической безопасности угледобывающих районов Кузбасса. Завершаются работы по оцифровке и векторизации карты-схемы водопроводности и граничных условий для водоносных комплексов аллювиальных отложений Кузнецкого бассейна (масштаб 1:200000). На основе этого материала модернизируется информационная составляющая базы данных «Угольная промышленность Кузбасса».

Разработаны реляционные таблицы по следующей тематике: учетные карточки буровых скважин, гидрохимия и гидрология 1985—2005 гг., гидрография бассейна р. Томь, экология закрытых шахт Кузбасса. Актуализирована электронная карта (масштаб 1 : 100000) разрабатываемых и нераспределенных участков на основе информации о лицензировании угольных объектов недропользования. Общая схема информационной модели хранилища приводится на рис. 4.22. Проводятся работы по обработке текстовой информации (выданных лицензий), разработке и информационному наполнению структурированной схемы данных, привязки последнего к соответствующему электронному слою и внедрению его в банк данных.

Создано покрытие космоснимков для территории Кемеровской области, Кузнецкого угольного бассейна, отдельных городов области. Покрытие космоснимков интегрировано в структуру базы данных в виде схем георастров СУБД Oracle и используется для актуализации картографической информации. Разработан алгоритм интеграции космоснимков с электронными картами, который позволяет идентифицировать пространственные объекты, определять их границы. Данный метод успешно применяется для отслеживания границ разработки угольных ме-

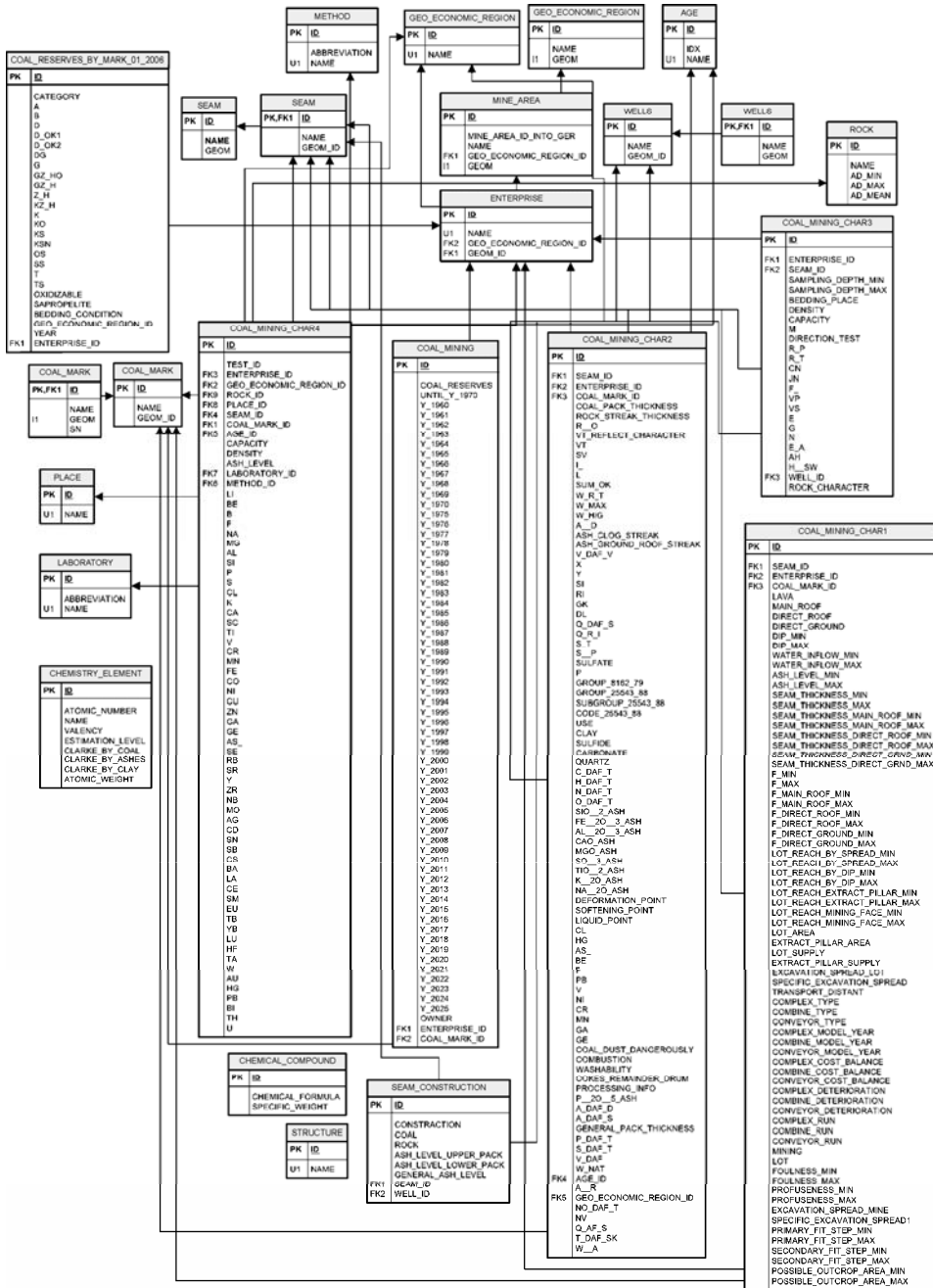


Рис. 4.22. Информационная модель ГД со связями геопространственных таблиц.

сторождений: наложение электронной карты разрабатываемых и нераспределенных угольных участков на космоснимки территории позволяет определить расхождение между юридическими и фактическими границами участка, что важно для аудита.

На основе космоснимков и информации хранилища пространственных данных могут быть получены имитационные модели различных процессов в виде 3D графики (оползневые явления, распространение метана в шахте и т. п.), промоделированы региональные гидродинамические процессы (затопление шахт и др.). На рис. 4.23 (см. вклейку) приводится пример реализации удаленного запроса к хранилищу данных через Internet с визуализацией данных сейсмического мониторинга по Кузбассу и близлежащим регионам.

На рис. 4.24 (см. вклейку) показана карта оползневых явлений по югу Кузбасса, которая была сгенерирована на основе хранилища данных по известным событиям за последние 25 лет.

Система в целом представлена двумя крупными информационными структурами:

**I** — «Информационные мониторинговые системы предприятий» — формируется в процессе разработки месторождений и осуществлении контроля за геодинамическими явлениями;

**II** — «Информационная система регионального аналитического центра» — формируется по результатам, получаемым мониторинговыми системами предприятий (рис. 4.25).

Ядром системы для предприятий является хранилище данных, в котором содержится информация об условиях залегания угольных пластов, показателях качества и структурном строении вмещающего горного массива. Эта информация формируется геологической службой предприятий по данным детальной и эксплуатационной разведки, что позволяет дополнять базу новыми объектами, не обнаруженными сетью детальной разведки и на предшествующих этапах разработки. Для этих целей используются информация по геолого-разведочным объектам (скважины, шурфы, каналы, борозды), горным выработкам (маркшейдерская съемка) и, частично, по крупномасштабным графическим моделям (карты, разрезы).

Поскольку в процессе детальной разведки выявляется лишь 10—20 % тектонических нарушений, а остальные вскрываются эксплуатационными выработками, возникает необходимость в постоянной актуализации баз данных. После каждого обновления формализованная геологическая информация передается в региональный аналитический центр, где она используется для внесения изменений в геолого-тектоническую карту бассейна. Обновление информации позволяет строить информационные модели для решения задач управления горным производством, а также контроля и прогноза геодинамических явлений. При этом графические модели и их электронные версии представляются в крупных масштабах, удовлетворяющих требованиям производства (М 1 : 1000—5000).

Кроме геологических баз данных, каждым предприятием формируются базы данных о положении горных выработок на основе маркшейдерских замеров и по данным аэрофотосъемки (распространенной на разрезах Кузбасса). Полученные в результате обработки электронные версии (карты, планы, отдельные объекты) сопровождаются временной привязкой и содержатся в хранилище данных, что по-

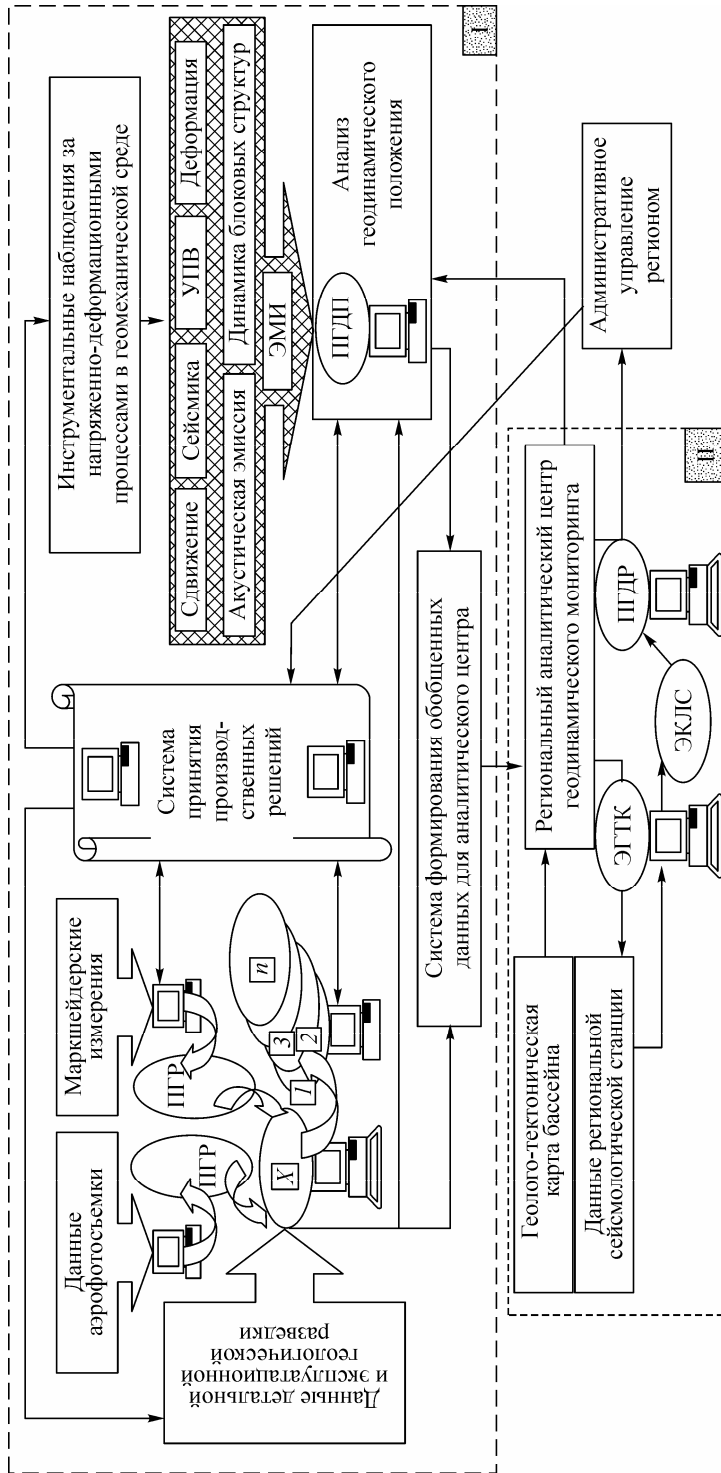


Рис. 4.25. Структура и потоки информации в системе геодинамического мониторинга региона.

УПВ — уровень подземных вод; ЭМИ — электромагнитная эмиссия; ПГР — план положения горных работ; X — хранилище данных по предприятию; 1, 2, 3, ..., n — информационные базы данных для решения производственных задач; ПГДР — прогноз геодинамических явлений на предприятии; ЭГТК — актуализированная электронная версия геотектонической карты региона; ЭЖЛС — электронная версия карты локализованных сейсмособытий в регионе; ПГДР — прогноз опасных геодинамических явлений в регионе.

звolyет использовать информацию для решения производственных задач посредством создания ряда информационных моделей. Укрупненные электронные модели с каждого предприятия передаются в региональный аналитический центр, где осуществляется анализ выработанного пространства по контролируемому региону.

На предприятиях организуются соответствующие инструментальные наблюдения за состоянием горного массива. Наиболее значимые из них описаны в данной монографии. Кроме традиционно применяемых средств наблюдений (сдвигение горного массива, деформации, уровень подземных вод, акустическая эмиссия), представляется необходимым внедрение уже освоенных в других отраслях. В частности, сейсмических методов, способных фиксировать изменения колебаний пород в процессе формирования оползней и обрушений бортов карьеров [52], локализации сейсмических событий в горном массиве на базе сети сейсмопавильонов. Некоторые из указанных методов рассмотрим подробнее ввиду их перспективности.

**Метод контроля деформационно-волновых процессов в массивах горных пород** и его техническое обеспечение (многоканальный деформографический комплекс разработки ИГД СО РАН) прошли экспериментальную проверку в условиях ОАО ГМК «Норильский никель» [57]. В основу метода положены фундаментальные основы теории нелинейных деформационных волн, обусловленных структурно-иерархическим фактором напряженных массивов горных пород и наличием трансляционных компонент движения геоблоков в стесненных условиях. В качестве базовых здесь используются экспериментально обнаруженное явление знакопеременной реакции геоблоков на динамические воздействия (в частности, от промышленных взрывов) и статистически инвариантное отношение среднего расстояния между берегами раскрывающихся трещин ( $\delta$ ) к диаметрам отделяемых ими геоблоков ( $\Delta$ ). Это позволило В.Н. Опарину получить кинематическое соотношение для скоростной характеристики волн маятникового типа [53]:

$$U_v = [(1 + \nu)U_p U_\epsilon] / (U_\epsilon + \nu U_p),$$

где  $\nu = \delta/\Delta$  — отношение линейных характеристик реального раскрытия трещин к диаметру отделяемых ими геоблоков — носителей маятниковых ( $U_v$ ) волн;  $U_p$  — скорость продольной волны в структурных элементах;  $U_\epsilon$  — средняя скорость трансляционного движения геоблоков между берегами трещин.

Напряженное состояние массивов горных пород существенно связано со структурно-иерархическим параметром  $\nu$  зависимостью [45]:

$$\nu(\sigma) \approx 10^{-3}[a - b(\sigma/\sigma_s)^2],$$

где  $a, b$  — экспериментальные (положительные) константы для определенных типов пород;  $\sigma_s$  — предел прочности этих пород на сжатие.

При определенных диапазонах изменения параметров  $U_p, U_\epsilon$  и  $\nu$  приведенное кинематическое соотношение для  $U_v$  дает объяснение ряду экспериментально обнаруженных в геомеханике и геофизике феноменов и эмпирических соотношений, не имеющих интерпретации в рамках ранее использовавшихся теоретических представлений механики сплошных сред. Это свидетельствует о том, что в настоящее время геомеханика находится на перепутье смены парадигм. Использование новых методов инструментальных наблюдений будет способствовать их активному восприятию.



Представляется также перспективным использование для целей геодинимического мониторинга электромагнитного излучения (ЭМИ), возникающего при разрушении горных пород. Не касаясь теоретических вопросов этого эффекта (они представлены в [58]), отметим, что результаты исследований доведены до создания приборов (РВИНДС-II-03, РЭМИ-1, РЭМИ-2, ИЭМИ) и используются в условиях подземных рудников. Но принципиальные возможности приборов таковы, что они применимы и для контроля напряженного состояния в бортах карьеров с целью локализации зон с повышенной напряженностью как предвестников готовящихся деструктивных проявлений в ограниченной области горного массива.

В последние годы большое внимание уделяется экспериментальным исследованиям особенностей развития сейсмических и деформационно-волновых процессов в формирующихся очаговых зонах горного массива. На ряде горных предприятий России функционируют многоканальные автоматизированные системы оперативного контроля сейсмической активности, индуцируемой ведением горных работ. Получаемые при этом результаты вносят существенный вклад в изучение механизмов катастрофических проявлений в результате отработки рудников и шахт. Например, анализ банка данных сейсмических событий на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского месторождения позволил обнаружить эффект пульсирующего режима сейсмоэнерговыведения из напряженных участков горного массива с движением фронтов индуцированной сейсмичности как в направлении от центров зон, так и по направлению к ним — по типу своеобразного колеблющегося «маятника».

Установленная при этом связь между средними значениями скоростей миграции фронтов индуцированной сейсмичности и «кажущихся» скоростей миграции сейсмособытий для упорядоченных по времени их проявления в пределах зон повышенной сейсмоактивности, является важным показателем для прогнозной оценки катастрофических событий в контролируемом массиве [59]. В условиях концентрации на малых территориях большого числа горных предприятий, оборудованных сетью подземных и наземных сейсмопавильонов, сейсмические и деформационно-волновые наблюдения должны стать неотъемлемой частью комплексного мониторинга геодинимических явлений.

С сейсмопавильонов поступает информация о сейсмособытиях различного энергетического уровня, возникающих в контролируемом массиве, в том числе индуцированных массовыми технологическими взрывами. Проблема сейсмического распознавания взрывов и событий тектонического типа в достаточной мере не решена как в нашей стране, так и за рубежом [60]. Поэтому единственный способ распознавания базируется на информации о месте (координаты) и времени проведения технологических взрывов. Кроме основного предназначения, эта информация может быть использована для планирования массовых взрывов во времени с целью координации их проведения в горных массивах, находящихся во взаимовлияющих зонах геомеханического пространства. Информация о сейсмособытиях, поступающая непрерывно с сейсмопавильонов, дифференцируется по типам, энергетическим уровням и сохраняется в соответствующих базах данных.

Ежедневно должен производиться анализ результатов сейсмособытий, по которым строятся карты сейсмической активности. Наличие электронных моделей геологической среды, совмещенных с планами положений горных выработок и

наложенных на них локализованных зон произошедших сейсмособытий, являются представительной базой для анализа причин, их обусловивших, в том числе в сопоставлении с инструментальными наблюдениями за сдвигами и деформациями в контролируемой области.

Результаты инструментальных наблюдений за деформационными процессами на объектах горного предприятия после обработки сохраняются в базах данных по каждому способу. При математических расчетах в сопоставлении с результатами инструментальных наблюдений предоставляется возможность использовать информационные модели геологического строения горного массива. Это позволяет исключить трудности подготовки предметно ориентированной информации для математических моделей (например, типа МКЭ). Результаты обработки наблюдений, решений на математических моделях и сейсмодеформационных измерений анализируются, и выдаются рекомендации для производственных служб предприятий. Полученная по каждому контролируемому массиву (предприятию) информация о сложившейся на соответствующий момент времени геодинамической ситуации передается в региональный аналитический центр, где она анализируется в масштабах всего региона.

Опуская рассмотрение существующих моделей и методов обработки инструментальных наблюдений за сейсмодеформационными процессами, акцентируем внимание на информационных аспектах системы мониторинга. С позиций информационных систем геомеханический мониторинг [7] можно представить в виде некоторого множества:

$$G = \{D, B, M, T\}, \quad (4.1)$$

где  $D = \{d(x, y, z, t)\}$  — множество данных, характеризующих горно-техническую обстановку в пространстве и времени;  $B$  — множество баз данных, ориентированных на хранение  $D$ ;  $M$  — множество математических моделей, предназначенных для обработки информации;  $T$  — множество временных интервалов, на котором осуществлялся сбор данных.

Определим, что

$$B \subset (S, b, A), \quad (4.2)$$

т. е. множество баз данных работает по модели клиент—сервер, где  $S$  — множество серверов;  $b$  — подмножество баз данных;  $A$  — множество клиентов, работающих с соответствующей информацией через конкретный сервер.

В общем случае

$$B = \{b\} \cap \{S\} \cap \{A\}. \quad (4.3)$$

Учитывая распределенность баз данных, расположенных физически на различных серверах, можно предположить, что множество моделей, с помощью которых ведут обработку информации из баз, также имеет распределенный характер, и, следовательно, множество моделей можно определить как многоосновную алгебру:

$$M = \langle D, \Omega \rangle, \quad (4.4)$$

где  $\Omega$  определяет некоторую сигнатуру операций над базами данных.

В свою очередь множество моделей и серверов определяется соотношением вида

$$M1 = M \cap S. \quad (4.5)$$

Таким образом, каждая математическая модель принадлежит некоторому множеству серверов, но может существовать и один сервер, на котором рассчитывается ряд моделей. Считая, что модели распределяются в некоторой локальной сети, (4.5) можно упростить до

$$M1 \subset S1, \quad (4.6)$$

где  $S1$  — множество серверов локальной сети, в которой каждый компьютер выполняет требуемый расчет, поэтому решение конкретной задачи определяется передачей управления соответствующему модулю сети, что выполняет программа диспетчера (брокер запросов).

Из (4.1)—(4.6) следует, что система мониторинга имеет иерархический характер и ее можно синтезировать из отдельных блоков. Широко известны и отработаны методы распределенных вычислений на объектно-ориентированном языке Java, с помощью которого можно создавать брокеры запросов для организации вычислений, работающие по алгоритму случайных запросов. Схему распределения вычислений можно представить следующей диаграммой:

$$\text{Клиент (данные)} \dots \rightarrow \text{Сервер (вычисления)} \dots \rightarrow \text{Клиент (результаты)}. \quad (4.7)$$

Здесь клиент передает данные для расчета на сервер, затем получает результаты. Расчеты могут осуществляться на одном или группе серверов — в зависимости от конкретной задачи и работы брокера запросов. Клиент может иметь маломощный компьютер, на котором работает только одна программа типа броузера, являющаяся стандартной для конкретной операционной среды. Процесс организации расчетов состоит в том, что пользователь для решения задачи заполняет форму, определяющую характер расчетов и виды форм вывода данных (карты, графики, таблицы, диаграммы). При этом клиент заранее не знает, на каком сервере локальной сети рассчитывается его задача — это определяет брокер запросов. В заполняемых клиентом формах используются Java-апплеты, поэтому на начальном этапе диалога с брокером на его компьютере выполняются предварительные вычисления для конкретной задачи, что является удобным способом уменьшить объем вычислений. В результате (4.7) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} &\text{Клиент (данные, локальные вычисления)} \rightarrow \text{Сервер (вычисления)} \rightarrow \\ &\rightarrow \text{Клиент (результаты)}. \end{aligned}$$

Рассмотренная схема легко реализуется для создания распределенной вычислительной среды в системах мониторинга с использованием архитектуры CORBA (Common Object Request Broker Architecture), которая определяет механизм взаимодействия приложений.

Программной основой для создания базовой системы мониторинга является Intranet-узел, состоящий из локальной сети и проблемно ориентированного web-сервера, обеспечивающего интерфейс JDBC и реализацию архитектуры CORBA, главными компонентами которой являются: объектный брокер запросов; язык определения интерфейсов; объектный адаптер; депозитарий интерфейсов. Поскольку

на стороне клиента используются специальные программы для ввода данных, написанные с помощью Java-апплет, то размещаемый на web-сервере брокер объектных запросов может осуществлять соответствующую маршрутизацию запросов, снижая нагрузку на сеть передачи данных и снимая ограничения, характерные для распределенных вычислений. Брокер автоматически находит путь к базам данных и организует с ними взаимодействие, устанавливая связь между расчетными задачами и ресурсами на сервере.

Изложенная выше методология использована в ИУУ СО РАН в информационных системах: «Угли Кузбасса»; ГИС угольной промышленности Кузбасса (15 основных слоев, 18 вспомогательных, пять баз данных); ГИС закрывающихся шахт Кузбасса (18 основных слоев, 10 вспомогательных, семь баз данных); ГИС для оценки экологического состояния закрывающихся шахт Кузбасса (14 основных слоев, 12 вспомогательных, четыре базы данных); ГИС экологический атлас Кемеровской области (12 слоев угольной промышленности, две базы данных). Создан «Кадастр природных ресурсов Кемеровской области», представляющий собой систему из семи баз данных, работающих в распределенной вычислительной среде [7].

#### **4.7.5. 3D-модели и их реализация в задачах сейсмодеформационного мониторинга**

Для решения класса пространственных задач начинают использоваться 3D-модели сложных природных объектов, а на их основе создаются так называемые виртуальные миры. В процессе создания системы информационного обеспечения сейсмодеформационного мониторинга для решения задач геодинамики горно-промышленных регионов была разработана технология виртуальных моделей.

С помощью виртуальных моделей продумываются варианты различных ситуаций и проекты в области градостроительства, прокладки коммуникационных линий, производства, торговли, образования, науки, медицины и многих других форм общественно-культурной деятельности. Однако до настоящего времени эти технологии не нашли применения при решении конкретных научных задач в области горного дела. Для решения сложных геодинамических задач оценки сейсмичности Кузбасса данную технологию применили впервые. Технология создана для обработки и интерпретации данных на основе 3D-моделей и позволяет не только решать прогностические задачи, но и разрабатывать сценарии для оценки региональной и локальной геодинамики.

В этих целях была использована серия новых программных продуктов, таких как 3D Studio MAX 9.0, Mojo Word, Vue d, Espirit Bruce3D 6.0 и ряд других, позволяющих пользователю сформировать привычную для него трехмерную среду и работать в ней, «погружаясь» в свое виртуальное пространство, которое, в отличие от текстового процессора или электронных таблиц, позволяет с помощью изобразительных средств воплощать разнообразные идеи в привычные для специалиста образы. Работа в реальном времени, когда конкретный исследователь, сформировав свой виртуальный специфический для его прикладной области мир, свободно перемещается внутри трехмерной сцены, «ходит» вокруг объекта и может взаимодействовать с ним, — это неотъемлемый признак современной виртуальной вычислительной среды, которая была сформирована на основе ранних разработок

геоинформационной модели [30] по оценке сложного сейсмического состояния горно-промышленного региона.

#### 4.7.6. Технология формирования виртуальных моделей

Исходные материалы по геодинамике Кузбасса можно разделить на следующие группы:

- многослойные электронные карты;
- текстовые материалы (включая исторические описания);
- расчетные геомеханические модели;
- базы данных (числовые и текстовые).

Объединение этих материалов создает виртуальную среду, в которой работает конкретный специалист, изучающий данную предметную область. Как было указано выше, трехмерное представление произвольных данных наиболее информативно. В связи с этим целесообразно формировать виртуальные модели по геодинамике на основе 3D-данных с последующей их интеграцией. Проиллюстрируем вышеизложенное.

В работах предыдущих лет были собраны данные по геодинамике Кузбасса, включающие историческую динамику сейсмособытий, данные по промышленным взрывам и современную сейсмику. С использованием этих данных и типовых ГИС (ArcView 3.3) были построены GRID-модели, карты которых показаны на рис. 4.26, 4.27 (см. вклейку).

На данной основе была сформирована база моделей, которые можно использовать для проведения геомеханических расчетов. Дальнейшее развитие системы показало, что на основе GRID-моделей существует возможность создания полноценных 3D-моделей, содержащих топологию сформированных объектов и процессов. Такие структуры могут использоваться для решения широкого класса геологических, горно-технологических и геомеханических задач, включая задачи сейсмодиформационного мониторинга. Базой для генерации таких объектов является электронная геолого-промышленная карта Кузбасса. Каждый слой карты преобразуется в 3D-объект, а их топологическая комбинация позволяет осуществлять генерацию виртуальных моделей.

Рисунки 4.28, 4.29 (см. вклейку) иллюстрируют технологию поэлементной сборки виртуальной 3D-модели геодинамических событий Кузбасса. На рис. 4.28 выделены элементы границ области и конкретные геоблоки, из которых формируется виртуальная модель. Рисунок 4.29 показывает формирование виртуальной модели сейсмической геодинамики Кузнецкого региона, которая получена путем обработки данных из хранилища. Процесс обработки является многостадийным и требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому в последующем будут отработаны типовые варианты, по которым будет осуществляться формирование базового объекта виртуальной 3D-модели сейсмособытий.

Модели, созданные с помощью 3D-преобразований, могут быть использованы для формирования анимационных последовательностей на основе:

- технологии простой анимации, представляющей последовательность графических образов модели, которые формируются аффинными преобразованиями исходной;

технологии интеллектуальной трассировки модели, которая формируется путем назначения некоторого пути вдоль анализируемой поверхности.

Второй способ более привлекателен, так как обеспечивает приближение к реализации виртуальной модели. Как было рассмотрено выше, формируемые фрагменты 3D-поверхностей могут быть объединены в технологии виртуальных моделей и впоследствии любой пользователь может «погрузиться» в них и работать в интерактивном режиме, анализируя те или иные свойства окружающего проблемно-ориентированного пространства.

Пример работы программ по синтезу виртуальных моделей геодинамики Кузбасса показан на рис. 4.30 (см. вклейку). На рис. 4.31 (см. вклейку) показан кадр формирования геологического блока с нарушением, который был получен на основе технологии виртуальных 3D-моделей.

#### **4.7.7. Проблемы создания информационного обеспечения системы сейсмодеформационного мониторинга**

В условиях концентрации горных предприятий на небольших территориях решение проблемы контроля, прогнозирования и предупреждения геодинамических явлений в пределах геомеханического пространства отдельного предприятия малоэффективно. Необходимо создание региональной системы мониторинга с аналитическим центром обработки информации. В таком центре должна сосредотачиваться информация о геодинамической ситуации (результаты анализов по инструментальным наблюдениям) на предприятиях и с наземных сейсмических станций, расположенных в регионе. В центр должна поступать и перманентно актуализироваться информация по электронным версиям планов горных работ и геолого-тектонических карт, а также уточняемые в процессе разработки информационные модели месторождений. Естественно, что информация по всем предприятиям должна представляться в единой системе координат для обеспечения построения карт (электронных и на твердой основе) геомехано-геодинамического состояния по контролируемому региону.

Наиболее оперативной является сейсмическая информация. Ее анализ по предприятиям и в аналитическом центре может производиться по параметрам, подтверждающим актуальность в практике сейсмического мониторинга:

- количество динамических явлений за определенный промежуток времени в фиксированных объемах горного массива каждого предприятия;

- величина сейсмической энергии, выделяющейся в фиксируемом объеме за определенный промежуток времени;

- максимальные энергетические классы сейсмособытий;

- изменение плотности сейсмособытий во времени;

- пространственно-временное распределение зон сейсмической активности;

- константы повторяемости, связывающие количество произошедших динамических явлений с величиной выделенной сейсмической энергии;

- градиенты нарастания сейсмособытий и увеличение их суммарной энергии во времени;

- динамика возвратно-поступательного движения фронтов индуцированной сейсмичности.

Анализ перечисленных параметров сейсмособытий нацелен как на оценку характерных особенностей проявлений последних в динамике по каждому предприятию региона, так и на определение взаимного влияния в условиях единого геомеханического пространства. Предполагается, что результаты анализа могут использоваться не только для предупреждения опасных геодинамических проявлений, о чем оповещаются органы административного управления регионом и предприятиями, но и для планирования ведения технологических процессов (в частности, массовых взрывов) и ведения горных работ по каждому предприятию.

Анализ накапливаемой в аналитическом центре информации будет не только способствовать получению новых знаний о причинно-следственных связях происходящих в регионе геодинамических процессах, но и объяснять механизмы их проявлений.

#### 4.8. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Необходимость прогнозирования свойств горных пород обусловлена тремя причинами: 1) малым объемом инженерно-геологических исследований горных пород при детальной разведке — всего исследуется порядка 10 % извлеченного материала [30], что недостаточно даже для определения закономерностей изменения свойств пород в границах горного отвода; 2) стремлением сократить объем работ по подготовке информации для ввода ее в базы данных; 3) отсутствием информации о структурно-прочностных свойствах массивов горных пород, прилегающих к горным отводам (площади под отвалами, инженерными сооружениями, между соседними горными предприятиями). Эти данные приобретают актуальность при построении пространственных моделей геомеханического пространства.

В основу методики прогнозирования положена взаимосвязь генетических признаков, совокупное влияние которых определяет свойства горных пород в осадочных формациях Кузбасса [61—68]. В исследованиях структурно-прочностных свойств пород выделяют две группы геолого-генетических признаков. К первой группе относят: тип и состав цемента, минералогический состав обломочного материала, структурное строение. Ко второй — степень метаморфизации, геотектонические условия, влияние процессов выветривания, глубин расположения литологических разностей от дневной поверхности.

В предлагаемой методике первая группа факторов отражается в наименованиях пород. Ниже акцентируем внимание на второй группе факторов.

В качестве стандартного показателя вторичных превращений органического вещества (метаморфизм) в классификации углей по маркам принята отражательная способность по витриниту ( $R_0$ , %) [69]. По этому показателю угли Кузбасса охватывают все каменноугольные ( $0,5 < R_0 < 2,59$ ) и ранние антрацитовые ( $2,2 < R_0 < 4,5$ ) стадии. Граница регионального метаморфизма контролируется в основном тектонической структурой бассейна, т. е. глубиной погружения пластов в период максимальной напряженности термобарических условий. Степень метаморфизации в общем случае повышается от стратиграфически вышележащих пластов к нижележащим и в направлении падения пластов в складчатых и моноклинальных формах (рис. 4.32, 4.33). Проявление контактового метаморфизма известно на

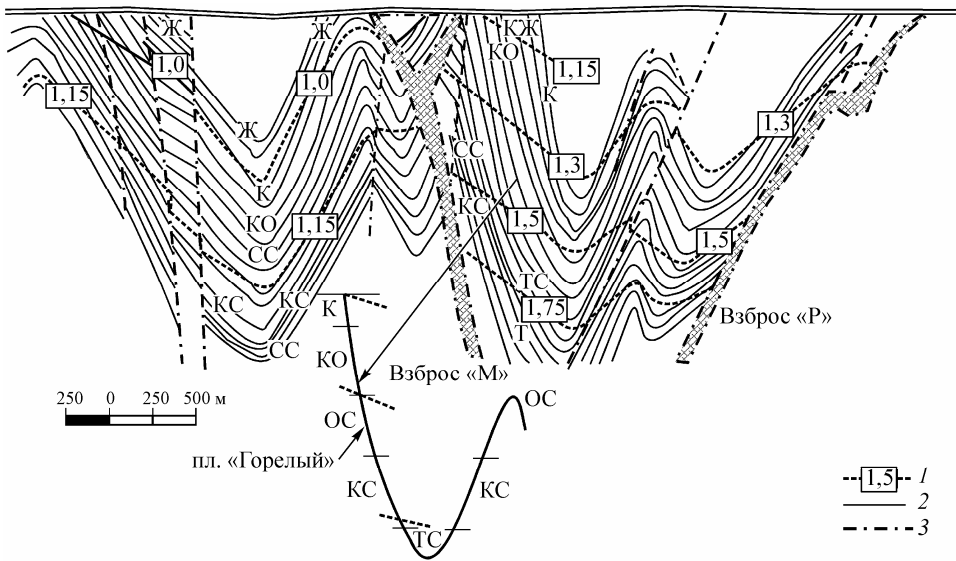


Рис. 4.32. Типовая дислокация и метаморфизм углей Пригорношорской зоны (представлено схематично по [29]).

1 — отражение по витриниту, %; 2 — пласты углей; 3 — тектонические нарушения; ОС, КС, К марки углей.

двух месторождений юго-восточной части бассейна, где его влияние обусловлено базальтовой интрузией [29].

Из анализа данных следует, что стadiи метаморфизма можно определить в зависимости от современной глубины залегания пластов. При моноклинальном пологом залегании, как правило, каждый пласт можно отнести к определенной стadiи метаморфизма за исключением зон, попавших под влияние контактового метаморфизма. Здесь один и тот же пласт, по мере удаления его от центра интрузии, подвергнут различной степени метаморфизации, что в конечном итоге отражается на идентификации углей по маркам (см. рис. 4.33).

В складчатых формах (крутопадающие пласты) степень метаморфизации одного и того же пласта, как правило, изменяется с глубиной погружения. Применительно к подобным формам зоны метаморфизма пластов и зависящие от них свойства пород определяются современной глубиной залегания от дневной поверхности и параметрами тектонических нарушений.

Таким образом, одним из информативных показателей для прогнозирования свойств пород, в общем случае, является современная глубина расположения зон метаморфизма не только по месторождению в целом, но по его характерным тектоническим зонам. Анализ информации показал наличие достаточно тесных корреляционных связей, соотношения между которыми можно представить структурными выражениями вида

$$(\sigma_s)_{i,k} \approx f(J, H, L); (d_e)_{i,k} \approx \psi(\sigma_s)_{i,k}, \quad (4.8)$$

где  $i$  — литологическая разность породы;  $k$  — геотектоническая зона;  $J$  — стadiя метаморфизма;  $H$  — глубина залегания литотипа;  $L$  — структурные данные литотипа.



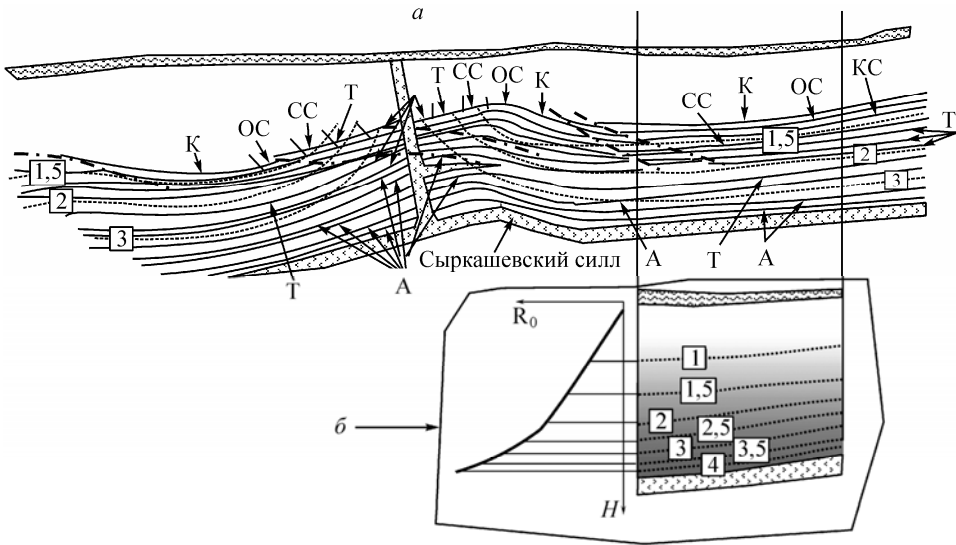


Рис. 4.33. Дислокация и метаморфизм углей Присалаирской зоны, представлено схематично по [29] (а); зависимость интенсивности метаморфизации от глубины (б).

Условные обозначения см. на рис. 4.32.

Прежде чем раскрыть содержание (4.8), рассмотрим связь стадий метаморфизма с марками углей. Для чего воспользуемся данными [70, см. ст. «углефикация»] количественных соотношений между стадиями метаморфизма углей ( $J$ ) и отражательной способности витринита ( $R_0$ ). В результате обработки табличных данных для каменноугольных и ранних антрацитовых стадий метаморфизма получены зависимости:

$$\begin{aligned} \text{для } 0,5 \leq R_0 < 1 \quad J &\approx 3,232 \ln(R_0) + 2,76; \\ \text{для } 1,0 \leq R_0 \leq 2,49 \quad J &\approx 3,831 \ln(R_0) + 2,74; \\ \text{для } 2,49 \leq R_0 \leq 5,5 \quad J &\approx 3,522 \ln(R_0) + 3,62, \end{aligned} \quad (4.9)$$

где в интервалах:  $0,5 \leq R_0 \leq 2,49$  — каменноугольные стадии метаморфизма;  $2,49 \leq R_0 \leq 5,5$  — антрацитовые стадии.

Определенные по (4.9) стадии метаморфизма  $J$  не представляются целочисленным значением, как это принято в практике и в [69]. Но, с другой стороны, принятое деление метаморфизма по стадиям является условным (процессы метаморфизации протекали не скачкообразно) и используется лишь для целей классификации. В (4.9) округленное до ближайшего целого значение  $J$  соответствует принятой классификации углей по [69], а представление  $J$  действительным числом отражает интенсивность метаморфизма, количественно оцениваемую физически измеряемым показателем  $R_0$ . Пример плавного изменения степени метаморфизации по глубине разреза показан на рис. 4.33, б уровнем затененности. Используя количественные значения  $R_0$  по глубине месторождения, равно как и любой его частей, всегда можно получить корреляционную зависимость степени метаморфизации пород от современной глубины их погружения.

В качестве примера для условий, показанных на рис. 4.33, б, получены зависимости изменения  $R_0$  и  $J$  от  $H$ :

$$R_0 \approx 0,4026 \exp(0,0085H); J \approx 0,4026H - 0,567 \text{ при } H > 50 \text{ м.}$$

Такой подход в определении степени метаморфизации можно принять для операционных вычислений в прогнозировании свойств пород, однако применение его в общем случае затруднительно ввиду того, что в геологической документации, особенно прошлых лет, информация о распределении показателя отражения по витриниту на геологических разрезах (как это сделано в [29]), как правило, отсутствует. Поэтому с достаточным приближением можно допустить, что пачки пород, расположенные между парой смежных пластов, подвергнуты такой же степени метаморфизма, как и нижний пласт этой пары.

Как известно, в определении марок углей, кроме  $R_0$ , используются и другие показатели. Поэтому корреляция между марками углей и стадиями метаморфизма слабая. Одна и та же марка угля по соотношению технологических показателей может быть отнесена к разным стадиям метаморфизма, как это следует из табл. 4.3. Следовательно, использовать наименование марки в качестве информативного показателя для определения стадии метаморфизма некорректно. Наиболее информативным для определения стадий метаморфизма является показатель  $R_0$ . Воспользуемся тем, что в «единой классификации углей» [69] каждой марке угля, в зависимости от содержания других классифицирующих показателей, присваивается класс углей ( $K_y$ ). При этом взаимосвязь между  $K_y$  и  $R_0$  с коэффициентом корреляции, равным единице, определяется линейной зависимостью на интервале

$$0,1K_y \leq R_0 \leq 0,1K_y + 0,09. \quad (4.10)$$

Как видно из табл. 4.3, для классов углей также характерно наличие областей пересечения. Поэтому определить по классу угля его марку, строго говоря, невозможно. Но если указан класс угля, то по (4.10) можно вычислить среднее значение  $R_0$ , а затем по (4.9) степень его метаморфизации, количественное значение которой представляется действительным числом. Таким образом, при наличии информации о классе углей в информационных моделях месторождений исключаются затруднения в определении степени метаморфизации горных пород.

Сформировавшиеся к началу разработки месторождения свойства пород являются измененными, особенно в зонах, прилегающих к земной поверхности, подвергнутых процессам выветривания. В Кузбассе граница этой зоны прослеживается до глубины 60—80 м от поверхности. В границах зоны выветривания с увеличением глубины свойства пород изменяются интенсивно, а за ее границами градиент изменения снижается [68]. Примем, что свойства пород на границе зон окисления определяются степенью метаморфизации углей, что основано на многочисленных статистических данных. Следовательно, для каждого типа пород, расположенного на глубине 60—80 м, можно определить значения свойств, приняв их как базовые в соответствующих геологических сериях и тектонических зонах бассейна.

Для условий Кузбасса информация о средних размерах отдельностей ( $d_e$ , м) и сопротивлении пород одноосному сжатию ( $\sigma_s$ , МПа) получена по двум геологическим сериям и пяти геотектоническим зонам, в пределах которых располагаются

Таблица 4.3

Соотношения между марками и классами углей, отражением по витриниту и стадиями метаморфизма

Марка углей по [58]	Индекс по [58]	Отражение по витриниту (по [58])	Стадии метаморфизма		Класс углей по [58]
			по (4.9)	округленно	
Длиннопламенный	Д	0,40—0,79	0,30—2,00	1—2	4—7
Длиннопламенный газовый	ДГ	0,50—0,79	0,52—2,00	1—2	5—7
Газовый	Г	0,50—0,99	0,52—2,73	1—3	5—9
Газовый жирный, отощенный	ГЖО	0,60—0,99	1,11—2,73	1—3	6—9
Газовый жирный	ГЖ	0,50—0,99	0,52—2,73	1—3	5—9
Жирный	Ж	0,80—1,19	2,04—3,41	2—3	8—11
Коксовый жирный	КЖ	0,90—1,29	2,42—3,72	2—3	9—12
Коксовый	К	1,00—1,69	2,74—4,75	3—4	10—16
Коксовый отощенный	КО	0,80—1,39	1,89—4,00	2—4	8—13
Коксовый слабоспекающийся, низкометаморфизованный	КСН	0,80—1,09	1,89—3,07	2—3	8—10
Коксовый слабоспекающийся	КС	1,10—1,69	3,11—4,75	3—5	11—16
Отощенный спекающийся	ОС	1,30—1,99	3,74—5,38	4—5	13—19
Тощий спекающийся	ТС	1,40—1,99	4,03—5,38	4—5	14—19
Слабоспекающийся	СС	0,70—1,39	1,37—4,00	1—4	7—13
Тощий	Т	1,30—2,59	3,74—6,38	4—6	13—25
Антрациты	1А	2,2—3,69	6,40—8,22	6—8	22—36

практически все действующие угольные разрезы. За основу приняты данные, обобщенные в [68], по результатам оценки  $d_e$  и  $\sigma_s$  соответственно по 15 и 5 тысячам измерений на горизонтах обнажений в бортах карьеров. Эта выборка дополнялась по справочным данным, публикациям и отчетам геологической разведки, а также по результатам исследований структурно-прочностных свойств пород, периодически выполняемых на действующих разрезах для уточнения нормативных показателей.

Статистической обработкой указанного множества данных получены соответствующие уравнения связей показателей  $d_e$  и  $\sigma_s$  со степенью метаморфизации  $J$  по наиболее представительным для Кузбасса литологическим типам (табл. 4.4). Вариации отклонений вычисленных значений от фактических не превышают  $\pm(15—25)\%$ . При этом значения степени метаморфизации (без округления до ближайшего целого) в уравнениях трендов определяются по (4.9), (4.10) при известных классах углей. По представленным в табл. 4.5 уравнениям трендов определяются  $d_e$  и  $\sigma_s$  на границах зон окисления (глубина 60—80 м) и принимаются в качестве базовых.

Количественную оценку изменений структурно-прочностных свойств пород в зонах, подвергшихся процессам выветривания, определим с учетом (4.8) по следующим выражениям:

$$(\sigma_s)_{i,k} \approx f(J, H, L) \approx \{(\sigma_s)_{i,k}\} (K_s)_{H,i,r}; (d_e)_{i,k} \approx \psi(\sigma_s)_{i,k} \approx \{(d_e)_{i,k}\} (K_d)_{H,i,r}, \quad (4.11)$$

Таблица 4.4

Уравнения связи предела прочности на одноосное сжатие и размера естественной отдельности пород в массиве со стадиями метаморфизма

Порода и ее основная характеристика	Индекс литотипа	Геологические серии				
		Балахонская			Кольчугинская	
		Геотектонические зоны				
		Приколювань-Томская	Присалаирская	Пригорно-шорская	Присалаирская	Центральная
	$3 \leq J \leq 4$	$4 \leq J \leq 6$	$4 \leq J \leq 6$	$1 \leq J \leq 2$	$1 \leq J \leq 2$	
Конгломераты, гравелиты	KO, GR	$\frac{13,9 \ln(J) + 54,7}{0,013(\sigma_s) + 0,55}$	— —	$\frac{46J^{0,36}}{0,0042\sigma_s - 1,34}$	— —	— —
Песчаники на карбонатном цементе	PC	$\frac{34,7 \ln(J) + 92}{0,015\sigma_s + 0,15}$	$\frac{66,88J^{0,44}}{0,024\sigma_s - 0,38}$	$\frac{83J^{0,38}}{0,0145\sigma_s + 0,27}$	$\frac{24,5 \ln(J) + 79}{0,0235\sigma_s + 0,41}$	$\frac{32 \ln(J) + 62}{0,027\sigma_s + 0,74}$
Песчаники крупнозернистые, полимиктовые	PK	$\frac{114 - 27,8 \ln(J)}{0,025\sigma_s - 0,5}$	$\frac{34,9J^{0,523}}{0,024\sigma_s - 0,38}$	$\frac{57J^{0,28}}{0,035\sigma_s - 1,43}$	$\frac{40,4 \ln(J) + 47}{0,0107\sigma_s + 0,7}$	$\frac{31,7 \ln(J) + 39}{0,0136\sigma_s + 0,38}$
Песчаники среднезернистые	PS	$\frac{123,4 - 1,3 \ln(J)}{0,034\sigma_s - 1,27}$	$\frac{42,68J^{0,418}}{0,032\sigma_s - 1,09}$	$\frac{55J^{0,32}}{0,029\sigma_s - 0,9}$	$\frac{42 \ln(J) + 49}{0,012\sigma_s + 0,66}$	$\frac{31,7 \ln(J) + 39}{0,0136\sigma_s + 0,38}$
Песчаники мелкозернистые	PM	$\frac{115 - 24,3 \ln(J)}{0,0357\sigma_s - 1,44}$	$\frac{38,9J^{0,49}}{0,0234\sigma_s - 0,429}$	$\frac{61J^{0,26}}{0,045\sigma_s - 2,28}$	$\frac{42 \ln(J) + 49}{0,0172\sigma_s + 0,31}$	$\frac{32 \ln(J) + 38}{0,0135\sigma_s + 0,42}$
Песчаники на глинистом цементе	PH	$\frac{105 - 27,8 \ln(J)}{0,05\sigma_s + 2,25}$	$\frac{23,4J^{0,68}}{0,0324\sigma_s - 0,9}$	$\frac{35J^{0,53}}{0,03\sigma_s - 0,91}$	$\frac{21,6 \ln(J) + 42}{0,0133\sigma_s + 0,49}$	$\frac{20,3 \ln(J) + 36}{0,0143\sigma_s + 0,39}$
Песчаники с переслаиванием алевролита	PA	$\frac{101 - 31,3 \ln(J)}{0,023\sigma_s - 0,29}$	$\frac{16,47J^{0,82}}{0,0205\sigma_s - 0,038}$	$\frac{37J^{0,42}}{0,028\sigma_s - 0,59}$	$\frac{17,3 \ln(J) + 40}{0,0167\sigma_s + 0,28}$	$\frac{15,9 \ln(J) + 35}{0,0182\sigma_s + 0,16}$
Алевролиты на карбонатном цементе	AC	$\frac{41,7 \ln(J) + 29,2}{0,0167\sigma_s + 0,35}$	$\frac{29,7J^{0,65}}{0,0206\sigma_s + 0,065}$	$\frac{34J^{0,69}}{0,0216\sigma_s - 0,19}$	$\frac{27,4 \ln(J) + 50}{0,024\sigma_s + 0,016}$	$\frac{24,5 \ln(J) + 44}{0,025\sigma_s + 0,015}$
Алевролиты крупнозернистые	AK	$\frac{103 - 38,2 \ln(J)}{0,023\sigma_s - 0,28}$	$\frac{12,7J^{0,93}}{0,043\sigma_s - 1,28}$	$\frac{26J^{0,64}}{0,022\sigma_s + 0,003}$	$\frac{18,8 \ln(J) + 41}{0,011\sigma_s + 0,63}$	$\frac{17,3 \ln(J) + 35}{0,0125\sigma_s + 0,46}$
Алевролиты мелкозернистые	AM	$\frac{55 - 13,9 \ln(J)}{0,0125\sigma_s + 0,2}$	$\frac{4,5J^{1,3}}{0,027\sigma_s - 0,31}$	$\frac{10,5J^{0,86}}{0,032\sigma_s - 0,493}$	$\frac{20,2 \ln(J) + 28}{0,029\sigma_s + 0,02}$	$\frac{14,4 \ln(J) + 0,25}{0,025\sigma_s - 0,125}$
Аргиллиты	AR	—	$\frac{5,5J^{1,08}}{0,015\sigma_s + 0,185}$	—	$\frac{8,66 \ln(J) + 22}{0,025\sigma_s - 0,05}$	—

Примечание. Во всех столбцах отражены зависимости: в числителе —  $\sigma_s = f(J)$ ; в знаменателе —  $d_e = \psi(\sigma_s)$ .

где  $\{(\sigma_s)_{i,k}\}$ ,  $\{(d_e)_{i,k}\}$  — соответственно прочность и средний размер блока на границе зоны окисления (4.8);  $(K_s)_{H,i,r}$ ,  $(K_d)_{H,i,r}$  — функциональные зависимости, отражающие изменения соответственно прочности и размеров блока  $i$ -го литотипа в  $r$ -й геологической серии от глубины его залегания.

Зависимости  $(K_s)_{H,i,r}$  и  $(K_d)_{H,i,r}$  получены на основе анализа и обработки статистических данных и представлены уравнениями трендов (см. табл. 4.6) для  $30 \leq H \leq (150-200)$  м. При этом в результате анализа установлено, что влияние глубины на изменение  $d_e$  и  $\sigma_s$  по некоторым литологическим разностям равнозначно, на основании чего они объединены в группы. Также незначительны изменения  $d_e$  и  $\sigma_s$  от глубины по геотектоническим зонам, но они значительно отличаются в геологических сериях, что отражено в табл. 4.5.

Установлено, что влияние степени метаморфизации на плотность ( $\rho$ , т/м<sup>3</sup>) горных пород оценивается корреляционным отношением

$$\rho = c_1 J^2 + c_2 J + c_3. \quad (4.12)$$

Коэффициенты в (4.12) приведены в табл. 4.6.

Плотность алевролитов и аргиллитов в третьей и более стадиях углефикации практически остается постоянной и равной соответственно 2,55—2,56 и 2,52—2,53 т/м<sup>3</sup>. Взаимосвязь пористости со степенью метаморфизации представляется также полиномом типа (4.12), но со значениями коэффициентов, указанными в табл. 4.7. Аналогичные тренды связей стадий метаморфизма с физико-механическими свойствами пород можно получить и по другим показателям.

Необходимо заметить, что представленные выше уравнения трендов получены по данным для геологических серий и геотектонических зон. Естественно, что

Таблица 4.5

Связи, отражающие изменения коэффициентов прочности и блочности с глубиной

Индексы литотипов	Коэффициент изменения прочности $K_s$		Коэффициент изменения блочности $K_d$	
	$H \leq (60-80)$	$(60-80) < H < 200$	$H \leq (60-80)$	$(60-80) < H < 200$
Балахонская серия				
PC, AC	$0,256 \ln(H) - 0,08$	$0,062 \ln(H) + 0,75$	$0,51 \ln(H) - 1,1$	$0,0006H + 0,96$
PK, PS, PM	$0,42 \ln(H) - 0,68$	$0,156 \ln(H) - 0,338$	$0,444 \ln(H) - 0,84$	$0,0014H + 0,9$
PH, PA	$0,447 \ln(H) - 0,85$	$0,22 \ln(H) + 0,057$	$0,586 \ln(H) - 1,48$	$0,001H + 0,94$
AK, AM, AP	$0,51 \ln(H) - 1,13$	$0,273 \ln(H) - 0,17$	$0,595 \ln(H) - 1,49$	$0,0017H + 0,88$
Кольчугинская серия				
PC, AC	$0,45 \ln(H) - 0,85$	$0,126 \ln(H) + 0,46$	$0,541 \ln(H) - 1,3$	$0,0019H + 0,86$
PK, PS, PM, PH, PA	$0,55 \ln(H) - 1,28$	$0,263 \ln(H) - 0,125$	$0,734 \ln(H) - 2,12$	$0,0021H + 0,85$
AK, AM, AP	$0,51 \ln(H) - 1,1$	$0,348 \ln(H) - 0,5$	$0,61 \ln(H) - 1,55$	$0,002H + 0,9$

Таблица 4.6

Коэффициенты регрессионного соотношения (4.12) для плотности

Породы	$c_1$		$c_2$		$c_3$	
	$J \leq 3$	$J > 3$	$J \leq 3$	$J > 3$	$J \leq 3$	$J > 3$
Песчаники	-0,041	-0,022	0,188	0,142	2,313	2,206
Алевролиты	-0,049		0,225		2,281	
Аргиллиты	-0,037		0,189		2,284	

Таблица 4.7

Коэффициенты регрессионного соотношения (4.12) для пористости

Породы	$c_1$		$c_2$		$c_3$	
	$J \leq 3$	$J > 3$	$J \leq 3$	$J > 3$	$J \leq 3$	$J > 3$
Песчаники	1,55	1,97	-7,49	-2,81	15,16	13,08
Алевролиты	1,61	0,05	-8,2	-0,35	15,92	5,8
Аргиллиты	1,34	-6,61	-6,61	-0,96	14,43	8,35

они основаны на средних значениях показателей и в сравнении с данными конкретных месторождений могут отличаться. Но здесь мы преследовали цель изложить суть методики, в которой на количественном уровне отражается влияние степени метаморфизации угольных пластов на структурно-прочностные свойства пород. Следуя предложенной методике, можно получить аналогичные уравнения трендов для конкретного каменноугольного месторождения с использованием минимума данных геологической и эксплуатационной разведки.

Наличие уравнений связи между структурно-прочностными свойствами горных пород и стадиями метаморфизма углей позволяет сократить объем инженерно-геологических исследований и количество информации, содержащейся в базах данных посредством вычисления значений показателей свойств в любых точках горного отвода месторождения и на прилегающих к его границам площадях. Общая схема алгоритма прогнозирования структурно-прочностных свойств пород представлена в работе [71].

Таким образом, в условиях концентрации угледобывающих предприятий в территориально небольших регионах Кузнецкого бассейна, при интенсивном ведении горных работ формируются региональные геомеханические пространства. В результате, нельзя исключить, что возникшие геодинамические явления на одном предприятии могут индуцировать аналогичные явления на других, входящих в единое геомеханическое пространство. В таких условиях методология контроля и предупреждения геодинамических процессов должна быть ориентирована на создание региональных мониторинговых систем с аналитическими центрами обработки и анализа информации.

В настоящее время создание мониторинговых систем связано с проблемами сбора, хранения и анализа информации, характеризующей как общее состояние геомеханического пространства, так и процессов в нем, протекающих в результате разработки месторождений. Для формализации описания горно-технической обстановки и физико-геомеханических ситуаций используются аналитические и численные математические модели, в том числе модели прогнозирования принципиально значимых показателей структуры и свойств геоматериалов и массивов горных пород, предназначенных для значительного уменьшения объемов подготавливаемой информации и сокращения размерностей пространства наблюдаемых факторов, число которых достаточно велико, а также для определения наиболее влияющих на выбор конкретных технологических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

1. *Мирошниченко Н. А., Рубцова Е. В.* Об одном подходе к информационному моделированию геодинамических процессов в массиве горных пород // ГИАБ. — 2005. — № 7.
2. *Мирошниченко Н. А., Новикова Е. В.* Метод объемного моделирования геомеханического пространства на основе планов горизонтов // Там же. — 2006. — № 4.
3. *Ярославцев А. Ф., Мирошниченко Н. А., Новикова Е. В.* Информационное моделирование геомеханического пространства // ФТПРПИ. — 2007. — № 2.
4. *Yaroslavtsev A. F., Miroshnichenko N. A., Novikova E. V.* Information modeling of a geomechanical space // J. Mining Science. — 2007. — V. 43, N 2.
5. *Беляков В. Г., Леонтьев А. В., Мирошниченко Н. А., Рубцова Е. В.* Блочная модель в реализации прогнозной компоненты геомеханического мониторинга // ФТПРПИ. — 2003. — № 4.
6. *Беляков В. Г., Леонтьев А. В., Мирошниченко Н. А. и др.* Система вероятностно-временных моделей динамики блочного массива // Там же. — 2000. — № 3.
7. *Потапов В. П.* Математическое и информационное моделирование геосистем угольных предприятий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
8. *Мирошниченко Н. А.* О перспективах построения системы мониторинга движений породного массива // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды международной конференции. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004.
9. *Скворцов А. В.* Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне // Вычислительные методы и программирование. — 2002. — Т. 3.
10. *Owen S. J.* A survey of unstructured mesh generation technology // Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable. — 1998.
11. *Bern M., Plassmann P.* Mesh generation // Handbook of Computational Geometry / Sack J.-R., Urrutia J. (ed.). — Elsevier Science. 1999.
12. *Галанин М. П., Щеглов И. А.* Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные / ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. — М., 2006. (Препринт; № 9).
13. *Галанин М. П., Щеглов И. А.* Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы / ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. — М., 2006. (Препринт; № 10).
14. *Мирошниченко Н. А.* Об оценке качества триангуляций при создании информационных моделей горно-геологических объектов // ГЕО-Сибирь-2008. Тр. IV междунар. науч. конгресса. — Новосибирск: СГГА, 2008.
15. *Трембач А. В., Мытров Ю. А. и др.* Оптимальное решение для хранения пространственных данных // Информационный бюллетень. ГИС-Ассоциация. — 2005. — № 1 (48).
16. *Опарин В. Н., Потапов В. П., Юшкин В. Ф. и др.* К вопросу формирования информационной геомеханической модели строения Кузнецкого угольного бассейна // ФТПРПИ. — 2006. — № 3.
17. *Назаров И. В.* Использование информационных технологий для повышения эффективности недропользования // Информационные недр Кузбасса: Тр. III регион. науч.-практ. конф-ции. — Кемерово: ИНТ, 2004.
18. *Нифантов Б. Ф., Кирильцева Н. А., Карташова О. Н., Ахмадеева Л. Л.* Использование ГИС-технологий для создания ГИС-проекта геолого-промышленной карты Кузбасса // Тр. междунар. науч.-практ. конф-ции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». — Кемерово, 2004.
19. *Потапов В. П., Федотов А. М.* Геоинформатика и геомеханика. Проблемы интеграции и их решения. Информационные недр Кузбасса // Тр. III регион. науч.-практ. конф-ции. — Кемерово: ИНТ, 2004.

20. *Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашинова Е. Г.* О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
21. *Угольная база России. Т. II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай).* — М.: ООО «Геоинформцентр», 2003.
22. *Сканеры для применения в различных областях [электронный ресурс]:* офиц. сайт. — Режим доступа: <http://www.gfk-leica.ru/scan/HDS3000ttch.htm/>
23. *Principle of Operation, Performance, and Applications of RIEGL 3D Laser Imaging Scanners [электронный ресурс]:* официальный сайт фирмы RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Austria. — Режим доступа: <http://www.riegl.com/>
24. *Лобанов А. Н.* Фотограмметрия: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1984.
25. *Королюк В. С., Портенко Н. И., Скорохов А. В., Турбин А. Ф.* Справочник по теории вероятности и математической статистике. — М.: Наука, 1985.
26. *Середович А. В., Иванов А. В.* Разработка методики определения геометрических параметров РВС по данным лазерного сканирования // ГЕО-Сибирь-2006. — Т. 2. Геодезия, картография, маркшейдерия: сб. материалов науч. конгр. 24—28 апреля 2006 г., Новосибирск. — Новосибирск: СГГА, 2006.
27. *Комиссаров Д. В., Середович А. В.* Применение наземных лазерных сканеров для решения научно-прикладных задач // ГЕО-Сибирь-2005. Т. 5. Геодезия, картография, маркшейдерия: сб. материалов науч. конгр. 25—29 апреля 2005 г., Новосибирск. — Новосибирск: СГГА, 2005.
28. *Прокопьева С. А.* Применение технологии наземного лазерного сканирования при решении задач археологии // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 2. Геодезия, картография, маркшейдерия: сб. материалов науч. конгр. 24—28 апреля 2006 г., Новосибирск. — Новосибирск: СГГА, 2006.
29. *Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна. М-б 1 : 100000: Объяснительная записка / Под ред. А. З. Юзвickого.* — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2000.
30. *Методика разведки угольных месторождений Кузнецкого бассейна.* (Мингео СССР, Минуглепром СССР). — Кемерово: Кн. изд-во, 1978.
31. *Юзвickий А. З., Полканов В. П., Грицук Я. М.* Линеамент Кузнецкого бассейна по материалам дешифрирования космических снимков // Исследование Земли из космоса. — 1980. — № 6.
32. *Лаптев Б. В., Минькин А. Н., Перепелицын А. И.* О геодинамической ситуации на горных предприятиях России. Ч. 1. Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика // Сб. докладов Международного совещания (Кировск, Мурманской обл., Россия, 14—16 апреля 2004). — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004.
33. *Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н., Рычковский В. М., Пестриков В. Г.* Природно-технологическая база комплексного извлечения ресурсов углеметановых месторождений Кузбасса. — Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004.
34. *Танайно А. С., Ермолаев В. А., Ческидов В. И.* Повышение эффективности использования геологических запасов // Междунар. науч.-практ. конф-ция «Экологические проблемы угледобывающей отрасли в регионе при переходе к устойчивому развитию». Т. 1. — Кемерово, 1999.
35. *Курленя М. В., Маттис А. Р., Васильев Е. И., Танайно А. С.* Оценка возможностей развития открытой угледобычи // Промышленная оценка и прогноз ожидаемых последствий разработки открытым способом перспективных месторождений Кузбасса. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1994. (Препринт; № 45).
36. *Угольная промышленность СССР. Т. IV.* — М.: Минуглепром СССР, 1980—1990 годы.



37. Уголь. 1991—2005 годы.
38. *Танайно А. С., Ческидов В. И.* Обоснование порядка открытой разработки свиты пологих и наклонных пластов с использованием выработанного пространства под внутренние отвалы // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
39. *Гупта Х., Растоги Б.* Плотины и землетрясения. — М.: Мир, 1979.
40. *Открытие № 400 СССР.* Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемакин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин и др. // Оpubл. БИ. — 1992. — № 1.
41. *Рубан А. Д., Захаров В. Н., Фейт Г. Н. и др.* Система комплексного мониторинга геодинамических явлений в шахтах // Тр. Междунар. конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
42. *Журков М. А., Смычник А. Д.* Проектирование геомониторинговых систем для регионов крупномасштабного освоения подземного пространства. — Минск: Изд-во БелАБЖ, 1997.
43. *Курленя М. В., Леонтьев А. В., Беляков В. Г. и др.* Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга // ФТПРПИ. — 1995. — № 2.
44. *Егоров П. В., Редькин В. А.* Мониторинг горных ударов при разработке рудных залежей с блочной структурой // Тр. Междунар. конф-ции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
45. *Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. и др.* Стратегия развития автоматизированной системы контроля геодинамической безопасности на рудниках ОАО горно-металлургическая компания «Норильский никель» // Там же.
46. *Моргунов В. А.* Реальности прогноза землетрясений // Физика Земли. — 1999. — № 1.
47. *Панжсин А. А.* Наблюдения за сдвижением земной поверхности на горных предприятиях с использованием GPS / Изв. Уральской горно-геологической академии. — Екатеринбург, 2000. — № 11.
48. *Демин А. М.* Проблема контроля устойчивости приоткосных массивов и пути ее решения // Горный журнал. — 1997. — № 1.
49. *Галустьян Э. Л.* Исследования в области контроля устойчивости бортов карьеров // Горн. журнал. — 1997. — № 1.
50. *Ямщиков В. С., Вознесенский А. С.* Геоинформационное обеспечение контроля за деформационными процессами на карьерах // Там же.
51. *Лукьянов А. Н., Иоффе А. М.* Методы контроля устойчивости бортов карьера «Мурунтау» // Там же.
52. *Тихвинский И. О., Постоев Г. П.* Контроль активности оползней // Там же.
53. *Курленя М. В., Опарин В. Н.* Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. — Ч. 1. — 1999. — № 3; Ч. 2. — 2000. — № 4.
54. *Потапов В. П., Власенко Б. В., Ильина Е. Ю.* Информационная модель геодинамического строения массива горных пород в системе мониторинга Кузнецкого угольного бассейна // Проблемы и перспективы развития горных наук (2004, Новосибирск). Тр. Междунар. конф-ции, посв. 60-летию образования ИГД СО РАН. Т. 1. Геомеханика. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005.
55. *Нифонтов Б. Ф., Кирильцева Н. А., Карташова Н. А. и др.* Использование ГИС-технологий для создания ГИС-проекта геолого-промышленной карты Кузбасса / Тр. Междунар. науч.-практ. конф-ции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». — Кемерово, 2004.
56. *Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.* Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массива // ФТПРПИ. — 1993. — № 3.
57. *Опарин В. Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф.* Нелинейные деформационные процессы в окрестности выработок. Ч. 1 // ФТПРПИ. — 2003. — № 4.

58. Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
59. Опарин В. Н., Востриков В. И., Жилкина Н. Ф. и др. О пульсирующем режиме сейсмоэнерговыведения из напряженных участков шахтных полей // Проблемы и перспективы развития горных наук (2004, Новосибирск). Тр. Междунар. конф-ции, посв. 60-летию образования ИГД СО РАН. Т. 1. Геомеханика. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005.
60. Su F., Aki R., Biswas N. Discrimination quarry blasts from earthquakes using coda waves // Bull. Seism. Soc. Am. — 1999. — V. 81, N 1.
61. Меньшиков А. Я. К вопросу влияния геологических факторов на физико-механические свойства пород // Инженерно-геологические условия строительства крупных карьеров в Сибири. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
62. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. 1. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
63. Пельдяков И. С. Исследование закономерностей изменения петрографического состава, метаморфизма, крепости угля и боковых пород // Технология и экономика угледобычи / ЦНИИЭуголь. — М., 1964. — № 88.
64. Жингель И. П. Петрографический состав и прочностные свойства горных пород Томусинского района // Исследования по вопросам горного давления в Кузбассе. — 1968. — № 16.
65. Юдин М. И. Петрографический состав и прочностные свойства осадочных пород Талдинского каменноугольного месторождения // Инженерно-геологические условия строительства крупных карьеров в Сибири. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973.
66. Станкус В. М., Изаксон В. Ю., Ненашев Р. И. и др. Исследование зависимости прочности горных пород Кузнецкого бассейна от геотектонических и физических характеристик // ФТПРПИ. — 1973. — № 5.
67. Аксененко М. И., Болдырев П. И., Кристин К. А. Физико-механические свойства горных пород Прокопьевско-Киселевского района и их связь с геологическими факторами // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
68. Бирюков А. В., Кузнецов В. И., Ташикинов А. С. Статистические модели в процессах горного производства. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 1996.
69. ГОСТ 25543-88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим признакам. — М.: Госкомиздат, 1988.
70. Горная энциклопедия. Т. 5 / Гл. ред. Е. А. Козловский. — М.: Сов. энциклопедия, 1991.
71. Танайно А. С. Структурно-прочностные свойства горных пород вскрыши угольных месторождений в задачах открытых геотехнологий. Ч. 1. Создание баз данных // ФТПРПИ. — 2002. — № 3.

## Глава 5

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И УПРАВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ НА РУДНИКАХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

### 5.1. МОНИТОРИНГ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Согласно современным представлениям о геологической среде [1—3], подземное сооружение с вмещающим его участком массива пород представляет собой сложную самоорганизующуюся природно-техническую систему (ПТС), эволюция которой сопровождается чередованием стадий адаптации и дезадаптации. На стадии адаптации обеспечивается устойчивость системы (подземного сооружения) в конкретных горно-геологических условиях. Процесс адаптации — управляемый, поскольку параметры системы меняются в пределах, основанных на информации о структуре, соответствующих расчетных моделях, свойствах и состоянии геологической среды. Но расчетные модели не в полной мере отражают реальные процессы в рассматриваемой среде, а исходная геологическая и геомеханическая информация о массиве пород имеет вероятностный характер. К тому же в самой геологической среде постоянно идут экзо- и эндогенные процессы, которые при длительной эксплуатации подземного сооружения могут оказывать на него негативное влияние. Все это в совокупности дестабилизирует ПТС, в результате чего система может перейти в стадию дезадаптации, чреватую как нарушением нормального функционирования сооружения, так и техногенными катастрофами. Поэтому на современных подземных сооружениях организуется мониторинг геологической среды (ГС ПТС), который является неотъемлемой частью технологического процесса их эксплуатации.

Постоянный мониторинг состояния массива пород обязателен при разработке месторождений полезных ископаемых. При этом в соответствии со стадиями и этапами отработки месторождений и подземного строительства методика и техника мониторинга имеет свои особенности. Основные этапы мониторинга:

- 1) мониторинг на стадии инженерно-геологических изысканий;
- 2) мониторинг на стадии строительства подземного сооружения;
- 3) мониторинг на стадии эксплуатации сооружения;
- 4) социально-экологический мониторинг.

Основная задача мониторинга на стадии инженерно-геологических изысканий — изучение геологии и тектоники участка строительства, параметров физических свойств и состояния пород в массиве. При этом конструктивные параметры и технология строительства подземных сооружений определяются механическими свойствами пород и параметрами их напряженного состояния в массиве. На опре-

деления прочностных свойств пород в настоящее время уже существуют международные и отечественные стандарты. По вопросам оценки напряженного состояния имеются лишь отдельные методические указания, среди которых наиболее полными являются «Методические рекомендации ...» [4]. При этом основным способом количественных определений параметров напряженного состояния пород в массиве, как и прогнозировалось в монографии [5], остается метод разгрузки. Этот метод, вероятно, будет базовым и в ближайшие десятилетия, изменения могут идти только по линии совершенствования буровой и измерительной техники, а также развития программного обеспечения компьютерной обработки результатов.

Основные задачи мониторинга на стадии строительства рудников — оптимизация параметров горных выработок и технологии их проведения, оценка воздействия строительства на окружающую среду. На этой стадии мониторинг включает:

- физическое и математическое моделирование напряженного состояния и устойчивости подземных сооружений;

- уточнение параметров напряженного состояния пород в наиболее ответственных конструктивных элементах подземных сооружений;

- инструментальный контроль нарушенной зоны вокруг горных выработок для корректировки параметров их крепления;

- опережающий контроль смещений и состояния пород, особенно при проходке выработок в сложных горно-геологических условиях;

- оценку динамики состояния приконтурной области подземных сооружений;

- проведение специальных горных выработок и камер с бурением наблюдательных скважин и закладкой соответствующих датчиков;

- оборудование полигонов для контроля состояния массива пород вокруг основных подземных сооружений.

На этой стадии должно быть практически завершено формирование основных систем мониторинга с прокладкой линий связи, оборудованием центра сбора и обработки информации, установкой и сдачей в эксплуатацию вычислительного комплекса.

При решении геомеханических задач в последние годы используют численное моделирование методами конечных и граничных элементов. Объемы физического моделирования при этом постоянно сокращаются вследствие большой трудоемкости и сложности с обеспечением подобия модели реальной геологической среде. По-видимому, эта тенденция сохранится и в ближайшем будущем.

Уточнение параметров напряженного состояния пород на стадии строительства также целесообразно проводить методом разгрузки. Эти определения можно использовать как реперные при использовании других способов, например, ультразвукового, сейсмического.

Для инструментального контроля нарушенной зоны вокруг горных выработок используется ряд методов: от простейших реометрических до геофизических, в том числе и метод сейсмической томографии. Необходимо подчеркнуть, что геофизические — ультразвуковая и сейсмическая томография — помимо размеров нарушенной зоны дают возможность оценить степень нарушенности массива, а также уровень напряжений в массиве. Эти же методы, в том числе контроль раз-

рушения скважин (КРС), используются для опережающего контроля состояния пород при проходке горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

В настоящее время мониторинг геологической среды сопровождает почти все виды подземного и наземного строительства и эксплуатации ответственных сооружений: гидротехнических объектов, подземных и наземных АЭС [6—9], всевозможного городского строительства [10, 11], в том числе и метрополитена [12]. Наибольшее развитие мониторинг геологической среды получил при разработке удароопасных месторождений и при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях [13—17] для целей прогноза разрушений пород в горных выработках, главным образом — горных ударов и техногенных землетрясений.

Наиболее информативным индикатором процессов деформирования и разрушения горных пород является сейсмоакустическая эмиссия, амплитудно-частотная характеристика которой в значительной мере определяется энергией деформационных процессов [18]. Поэтому основу современных систем мониторинга геологической среды в горно-промышленных районах составляют автоматизированные системы контроля сейсмоактивности массива (АСКСМ).

АСКСМ представляет собой программно-аппаратный комплекс, осуществляющий непрерывный прием, обработку, отображение и накопление информации о сейсмических явлениях в геомеханическом пространстве рудника или подземного сооружения. Система включает пункты регистрации сейсмических сигналов, информация с которых по каналам связи поступает в обрабатывающий центр, где в реальном времени отражаются параметры сейсмического режима контролируемого участка или района, площадь и объемы которых определяются числом сеймопунктов и геометрией их расположения. Все существующие отечественные и зарубежные АСКСМ имеют схожую конфигурацию и различаются только техническими параметрами регистрирующей аппаратуры и обрабатывающей техники.

Первичными параметрами сейсмического режима, отражающими состояние контролируемого участка массива пород, являются число и энергия сейсмических событий, характеризующие так называемую сейсмическую активность массива. Однако параметры сейсмической активности не всегда могут быть интерпретированы однозначно, поскольку она может сопровождать процессы как нарастания напряжений на контролируемом участке, так и их релаксации. Поэтому в настоящее время идет активный поиск более эффективных предвестников критических состояний горного массива. В качестве таких предвестников могут выступать временные интервалы между сейсмическими событиями [19], изменение фрактально-го размера пространственного распределения сейсмических событий [20] и другие.

Сравнительно недавно появились космические средства геодезических измерений, которые существенно расширили возможности геодинамических и инженерно-геологических исследований [21]. В настоящее время используют три системы космической геодезии: 1) радиоинтерферометрия на сверхдлинных базах (Very Long Baseline Interferometry — VLBI); 2) лазерная локация спутников и планет (Satellite Laser Ranging — SLR) и 3) радионавигационная спутниковая глобальная система позиционирования (Global Positioning System — GPS). Наибольшее применение в геодинамических исследованиях в последние годы находит система, основанная на измерении разницы времен прихода радиосигналов с некоторого множества специальных спутников (американская навигационная система

спутников Navigation System for Timing and Ranging — NAVSTAR и российская Глобальная навигационная спутниковая система — ГЛОНАСС) к специальным радиоприемникам, установленным на земной поверхности в контрольных пунктах.

Современные комплексы спутниковой геодезии способны принимать и обрабатывать пространственные координаты любых объектов с частотой обновления до 20 Гц, достигая точности 1 см, а при длительных наблюдениях точность может быть увеличена до 0,1 мм [22]. В настоящее время имеется положительный опыт использования системы GPS при ведении мониторинга смещений и деформаций земной поверхности на Урале [22], при решении задач строительства в Москве — оценка влияния выемки горной массы из котлована под подземную часть сооружаемого здания на деформации прилегающих строений [23], экологическом мониторинге природно-технических систем для обоснования строительства Катунской ГЭС [24].

В связи с постоянно возрастающей техногенной нагрузкой на природные экосистемы и ухудшающейся экологической ситуацией в районах крупномасштабного строительства (гидротехнические сооружения, карьеры, шахты, рудники и т. д.) возникла необходимость организации социально-экологического мониторинга, который должен обеспечить оптимальное состояние ПТС: здоровье населения, его деятельность, уровень жизни; отсутствие деградации животного и растительного мира, ландшафтов и земных недр, искусственных ландшафтов и сооружений. Основные задачи социально-экологического мониторинга:

адаптация возводимого сооружения или предприятия при минимальном ущербе природе;

предотвращение и снятие социальной напряженности и конфликтных ситуаций; обеспечение развития региона в соответствии с интересами местного населения.

Организационная схема социально-экологического мониторинга представлена на рис. 5.1.

В условиях роста самостоятельности регионов и повышенной ответственности местных властей перед избирателями необходима существенная корректировка организационно-управленческой деятельности на природно-технических объектах при их адаптации. Опыт использования социально-экологического мониторинга в гидротехническом строительстве показал его высокую эффективность. Более того, с учетом тенденций развития общества, а также отечественного и зарубежного опыта внедрение социально-экологического мониторинга обеспечит коэволюционное развитие природно-технических систем и окружающей среды.

Таким образом, главная задача мониторинга ГС ПТС — обеспечение безопасности сооружения в периоды строительства и эксплуатации [25]. Поскольку оценка безопасности сооружения проводится по данным комплекса методов и параметров, то для анализа информации с целью диагностики состояния сооружения и определения мер по его устойчивому функционированию создаются специальные экспертные системы. Экспертная система — это программная система принятия управляющих решений, использующая для решения соответствующих задач как конкретные параметры мониторинга, так и эвристику на базе накопленных знаний. Для решения задач обеспечения безопасности подземных сооружений наиболее адекватны экспертные системы, разработанные для удароопасных рудников [26, 27], а также для контроля гидротехнических сооружений [25, 28].

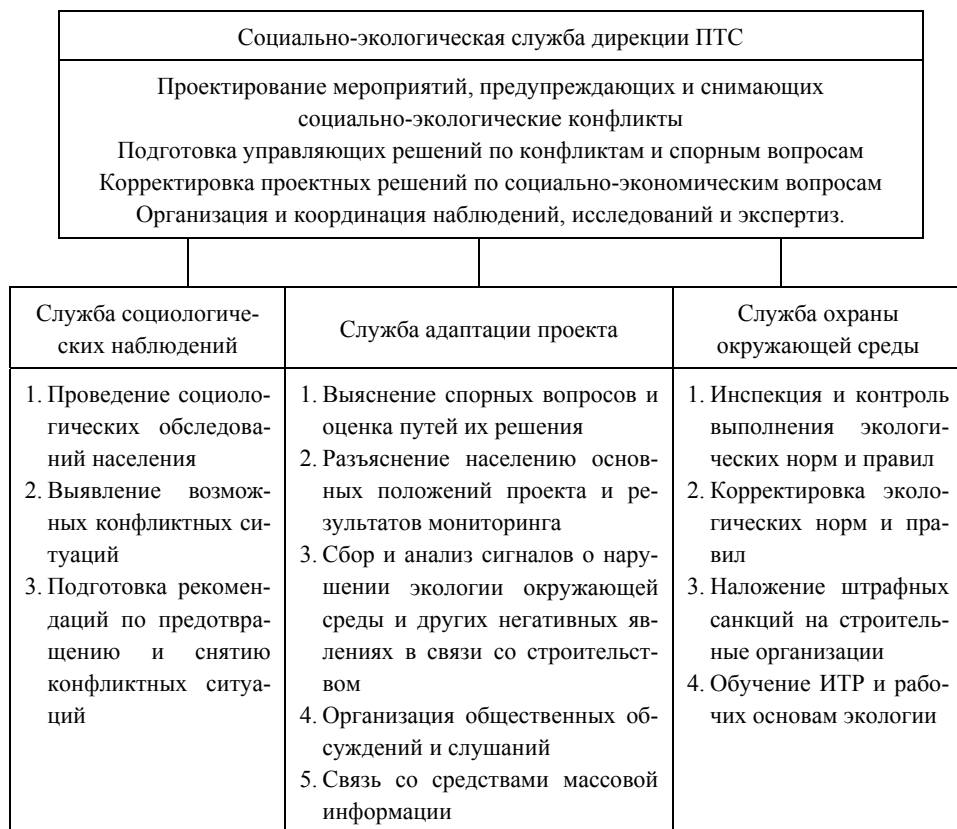


Рис. 5.1. Пример структуры социально-экологического мониторинга [24].

## 5.2. ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ХИБИНСКОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОСТЬ ЕГО БЛОКОВ

Напряженное состояние горного массива существенно зависит от его тектоники и геологического строения, о чем свидетельствуют исследования, выполненные в натуральных условиях в различных регионах Земли [31], а также на основе численного моделирования [32—34]. В [35] представлено сопоставление натуральных и расчетных данных по Евразийскому континенту, что позволило установить среднее значение абсолютной величины горизонтальных тектонических напряжений  $T = 50$  МПа, действующих на границе Евразийской литосферной плиты.

На основе имеющейся информации о блочном и геологическом строении Хибинского массива горных пород и результатов исследования напряженного состояния массивов Кольского полуострова с учетом их блочного и геологического строения, выполненных ранее [33, 34], разработана численная модель Хибинского массива с целью более детального исследования его напряженного состояния и выделения зон повышенной энергонасыщенности.

В соответствии с исходной информацией Хибинский массив представлен 16 блоками с различными механическими характеристиками пород и одним блоком,

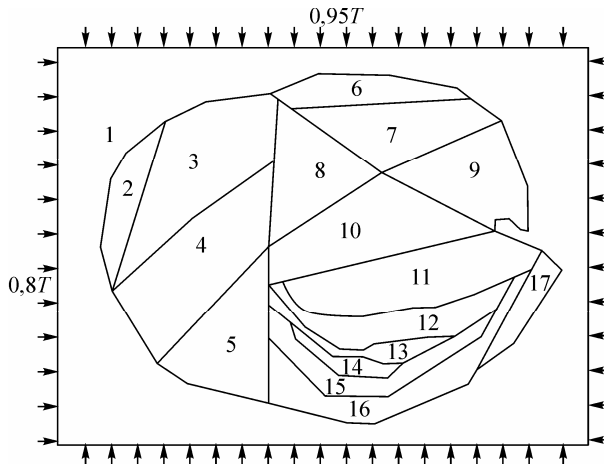


Рис. 5.2. Схема расчетной модели блочного строения Хибинского массива и граничные условия.

1—17 — номера блоков.

окружающим его (рис. 5.2). Свойства пород, составляющих блоки, представлены в табл. 5.1.

На границе блока 1, включающего Хибинский массив, по результатам ранее проведенных исследований были заданы равномерно распределенные тектонические силы в направлении С—Ю —  $0,95T$ , а в направлении В—З —  $0,8T$ .

Расчет напряжений осуществлялся методом граничных элементов. Граница расчетной модели была разделена на 1908 элементов, включая и элементы на контактах блоков с различными механическими характеристиками. Условия на контактах блоков предполагались таковыми, чтобы сплошность массива не нарушалась, т. е. нормальные к границам блоков напряжения и перемещения с обеих сторон одинаковы.

Характер распределения главных напряжений  $\sigma_1/T$  и  $\sigma_2/T$  приведен на рис. 5.3. Здесь блоки 11—16 объединены в один блок, в котором показаны средние

Таблица 5.1

Механические характеристики пород блоков Хибинского массива

Номер блока	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\nu$	Номер блока	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\nu$
1	5,0	0,25	10	6,93	0,173
2	4,2	0,26	11	7,0	0,17
3	4,48	0,25	12	6,6	0,22
4	4,78	0,254	13	5,0	0,3
5	4,44	0,256	14	6,6	0,22
6	4,2	0,26	15	7,0	0,17
7	5,38	0,23	16	4,2	0,26
8	6,0	0,235	17	4,2	0,26
9	7,0	0,17			



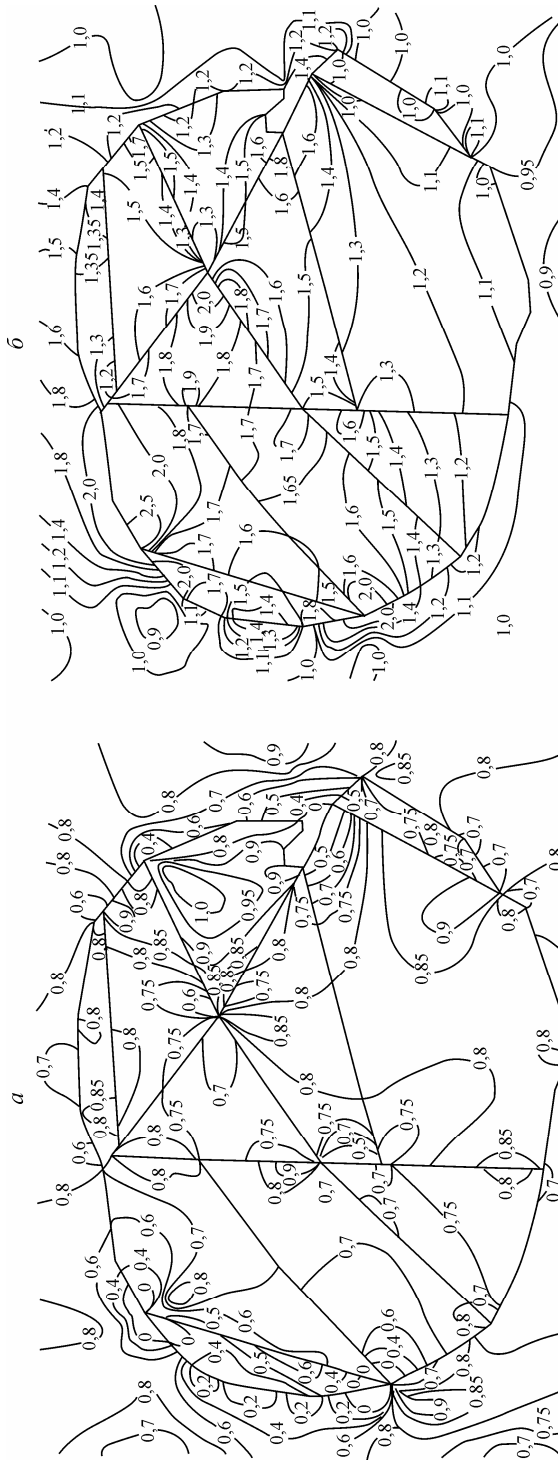


Рис. 5.3. Распределение главных напряжений в блочной структуре Хибинского массива:  
 а — минимальные  $\sigma_1/T$ , б — максимальные  $\sigma_2/T$ .

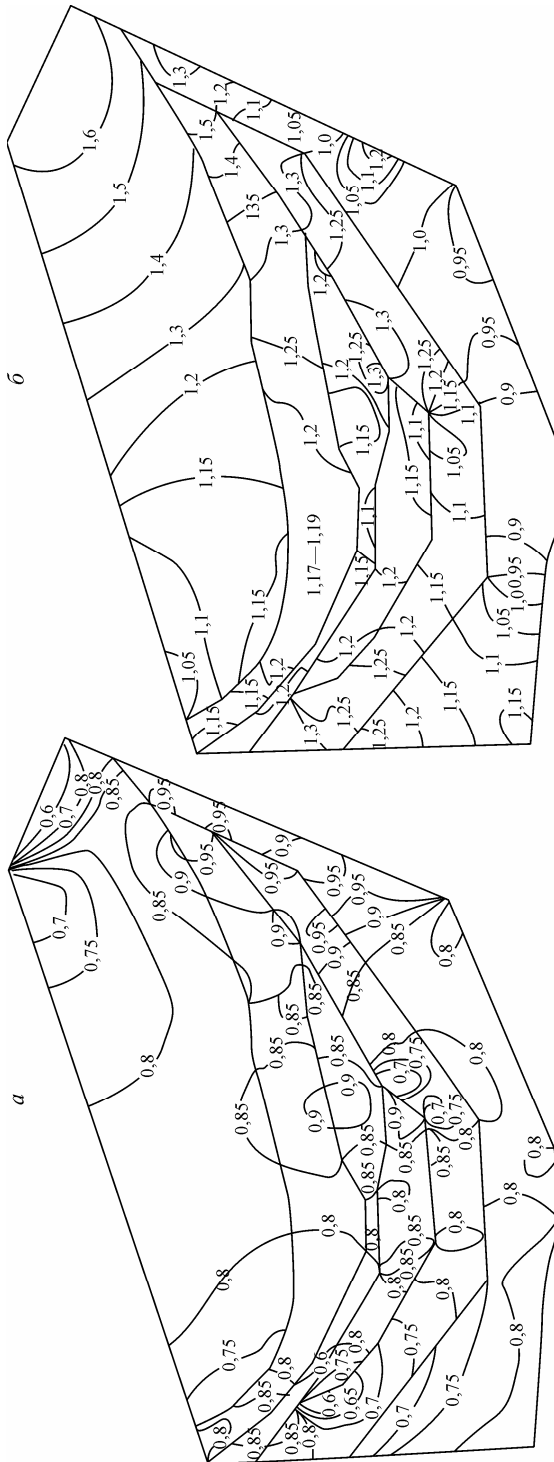


Рис. 5.4. Распределение главных напряжений в блоках 11—16 Хибинского массива:  
 а — минимальные  $\sigma_1/T$ , б — максимальные  $\sigma_2/T$ .

значения напряжений, а на рис. 5.4 дано детальное распределение соответствующих напряжений в этих блоках. Поскольку распределение напряжений весьма неоднородно и носит мозаичный характер, можно лишь в общих чертах отметить его особенности. Напряжения  $\sigma_1$  (наименьшие сжимающие) изменяются в основном в пределах от  $0,6T$  до  $0,85T$ . На отдельных участках, вблизи угловых зон (блоки 1—4) напряжения  $\sigma_1$  снижаются до  $(0,2—0,4)T$  и даже до 0, а на других (блоки 7, 9) они увеличиваются до  $(0,9—1,0)T$ . Напряжения  $\sigma_2$  (наибольшие сжимающие) практически всюду превышают  $T$ , достигая в отдельных участках  $(1,7—2,0)T$  и даже  $2,5T$  (блок 3).

Средние величины напряжений  $\sigma_1$  в блоках 11—16 изменяются в пределах от  $0,5T$  до  $0,9T$ , а напряжения  $\sigma_2$  от  $1,1T$  до  $1,6T$ . Наибольший интерес с практической точки зрения представляет распределение напряжений в блоке 13, где расположены горно-добывающие предприятия (апатит-нефелиновая дуга), и в соседних с ним блоках 12, 14 и 15, характеризующихся более высокими модулями упругости. Можно сказать, что блоки 12, 14 и 15, обладающие большей жесткостью по сравнению с блоком 13, «принимают на себя повышенную нагрузку». Так, напряжения  $\sigma_1$  в них изменяются от  $0,8T$  до  $0,95T$ , а  $\sigma_2$  — от  $1,15T$  до  $1,35T$ , в то время как в блоке 13 напряжения распределены более равномерно и имеют значения  $\sigma_1 = (0,8—0,85)T$ ,  $\sigma_2 = (1,15—1,2)T$ .

По данным численного моделирования напряженного состояния пород в блочных структурах Хибинского массива определили удельную энергию деформирования по формуле

$$w = \frac{1}{2ES} \iint_{(S)} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu\sigma_1\sigma_2) dS, \quad (5.1)$$

где  $E$  — модуль Юнга пород, слагающих блоки,  $S$  — площадь блока.

Таблица 5.2

Значения удельной энергии деформирования в блочных структурах Хибинского массива

Номер блока	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$w \cdot 10^{-6}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$w_* \cdot 10^{-6}$ , Дж/м <sup>3</sup>
2	4,2	147	0,1513	0,2572
3	4,48	154	0,1548	0,2635
4	4,78	160	0,1568	0,2666
5	4,44	152	0,1766	0,2625
6	4,2	147	0,1410	0,2572
7	5,38	170	0,1576	0,2676
8	6,0	167	0,1749	0,2324
9	7,0	200	0,1111	0,2857
10	6,93	200	0,1257	0,2886
11	7,0	200	0,0966	0,2857
12	6,6	180	0,0892	0,2454
13	5,0	160	0,1038	0,2560
14	6,6	180	0,0796	0,2454
15	7,0	200	0,0855	0,2857
16	4,2	147	0,1204	0,2572
17	4,2	147	0,1034	0,2572

В табл. 5.2 приведены расчетные значения удельной энергии деформирования. Для сравнения даны значения критической величины удельной энергии  $w_*$ , рассчитанной по формуле

$$w_* = \frac{\sigma_c^2}{2E}, \quad (5.2)$$

где  $\sigma_c$  — предел прочности породы при одноосном сжатии.

По данным табл. 5.2 можно сказать, что естественная энергонасыщенность блока 13 составляет 41 % критической величины удельной энергии деформирования, а блоков 12, 14, 15 — порядка 36, 32 и 30 % соответственно, несмотря на то, что уровень напряжений в них выше. Наибольшая относительная энергонасыщенность в блоке 8 составляет 75 % от критической. Однако ведение горных работ в блоке 12 в значительной степени увеличивает энергонасыщенность пород, что приводит к возникновению горных ударов и техногенных землетрясений.

### 5.3. УПРАВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Хотя в России и ряде стран с развитой горно-добывающей промышленностью проблеме горных ударов и техногенной сейсмичности уделяется значительное внимание, она по-прежнему остается актуальной. И острота ее будет нарастать с увеличением глубин ведения и масштабов горных работ [36].

В последние годы в результате комплексных исследований техногенной сейсмичности в горно-рудной природно-технической системе «Хибины» достигнут определенный прогресс в понимании механизма образования очаговых зон и реализации динамических явлений в рудниках.

Разработаны модели динамических явлений, установлены некоторые индикаторы критического состояния участков геологической среды в геомеханических пространствах рудников, получили развитие методика и техника геомеханического мониторинга горно-рудной природно-технической системы (ГрПТС), разработаны и обоснованы некоторые схемы развития горных работ, снижающие опасность динамических проявлений горного давления [36].

Необходимо отметить, что состояние проблемы техногенной сейсмичности теснейшим образом связано с состоянием проблемы природной сейсмичности, где в последние годы четко обозначился кризис, обусловленный нерешенностью вопросов средне- и краткосрочного прогноза землетрясений. В ряде отечественных и зарубежных публикаций последних лет вообще ставится под сомнение сама возможность краткосрочного прогноза землетрясений. И здесь уместно напомнить широко известное положение, что успехи фундаментальных наук не только открывают новые пути для технического прогресса, но и освобождают от некоторых иллюзий. Результаты исследований в области эволюции сложных открытых систем и нелинейной динамики показывают принципиальную невозможность однозначного прогноза поведения таких систем. Но при этом, по мере развития теории катастроф, разработки современных моделей эволюции сложных систем различного характера, появляется возможность прогнозировать опасные ситуации в этих системах, оценивать риски от чрезвычайных ситуаций и проводить соответст-

вующие профилактические мероприятия. Поэтому в соответствии с современными тенденциями в науке о безопасности нами предложена и обоснована концепция управления геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород, отличающаяся тем, что осуществляются прогноз и профилактика не отдельного динамического события, а кризисной области, опасной по динамическим проявлениям горного давления типа горных ударов и техногенных землетрясений, что обеспечивает более надежный геодинамический прогноз и позволяет повысить безопасность горных работ [36].

Риск есть количественная мера оценки опасности от какой-либо угрозы. Чтобы управлять риском, надо знать его величину. Для этого разработана методика оценки и управления геодинамическими рисками, состоящая из блоков моделирования и анализа информации, инструментального контроля и технических решений по снижению этого риска.

### **5.3.1. Общие принципы управления геодинамическим риском**

В процессе разработки полезных ископаемых в геологической среде формируются аномальные энергонасыщенные зоны (участки высоконапряженных пород), которые мигрируют вместе с перемещением фронтов очистных работ. Местоположение и размеры этих зон оценивают по данным аналитических исследований и экспериментальных определений в массиве пород. В ряде случаев, например при отработке блоков-целиков и переходных зон между открытыми и подземными горными работами или между сближенными рудниками, вся область ведения горных работ представляет собой единую энергонасыщенную зону, где возникают основные проблемы с управлением горным давлением, а в удароопасных условиях — проблемы с техногенной сейсмичностью. Следует заметить, что по мере развития горных работ на действующих предприятиях с увеличением их объемов и глубины удельный вес таких зон будет непрерывно возрастать. Для некоторых рудников в скором времени большая часть горных работ будет осуществляться в условиях высоконапряженных пород, что значительно увеличит опасность динамических проявлений горного давления типа горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений.

Как техногенная, так и естественная сейсмичность являются отражением процессов самоорганизации геологической среды в процессе ее эволюции: в первом случае — в природно-технической системе, во втором — в верхней части земной коры. Единство физической природы техногенных и тектонических землетрясений обусловило широкое использование моделей и методов классической сейсмологии в решении проблемы техногенной сейсмичности [37].

Между тем в последние годы в сейсмологии и смежных науках все чаще появляются публикации, ставящие под сомнение возможность на современном этапе развития теории разрушения горных пород и техники геофизического эксперимента надежного краткосрочного прогноза землетрясений. Так, в [38]: «Число опробованных предвестников уже перевалило за 1000. Из них более 140 зарегистрированы как открытия, а примеров удачного оперативного прогноза землетрясений фактически нет». В работе [39]: «Постепенно во всем мире работы по прогнозу землетрясений свертываются, прекращается финансирование как теоретических иссле-

дований, так и наблюдений на геодинамических полигонах, а высвобождающиеся научные силы переключаются на более надежные работы по оценке сейсмического риска и сейсмического районирования, что ставит своей конечной целью определение, с каким запасом прочности надо строить сооружения в сейсмоактивных районах».

В связи с этим предложена упомянутая выше методология управления геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород, повышающая надежность геодинамического прогноза и безопасность горных работ.

Управлению различными рисками повсеместно уделяется большое внимание, о чем свидетельствует возросшее число публикаций на эту тему, в том числе в горном деле [40—42] и в гражданском строительстве [43, 44]. Общие принципы при этом остаются неизменными: риск есть количественная мера оценки опасности, равная произведению вероятности этой опасности на ожидаемый от нее ущерб. Для уменьшения риска применяют мероприятия, устраняющие эти опасности или снижающие вероятность их реализации, а также предполагающие уменьшение ущерба от этих опасностей.

Для управления геодинамическим риском можно использовать разработанную в [35] методику диагностики критических состояний участков геологической среды и выбора технических решений для обеспечения безопасности горных работ (рис. 5.5, см. вклейку). Структура методики включает в себя два информационных блока регионального прогноза и детального моделирования и анализа информации, блок инструментального контроля выявленного в первых двух блоках опасного участка и блок технических решений по снижению геодинамического риска.

Уровень риска оценивают по результатам исследований в первом блоке и уточняют по данным анализа во втором блоке. Величину риска определяют по формуле

$$R = PD\alpha, \quad (5.3)$$

где  $P$  — вероятность динамического события;  $D$  — ожидаемый суммарный ущерб от этого события;  $\alpha$  — коэффициент неопределенности в оценке величин  $P$  и  $D$ .

Вероятность реализации динамического события оценивают по имеющейся на предприятии соответствующей статистике или по данным геодинамического мониторинга. При этом следует иметь в виду, что статистика динамических событий на руднике является результатом того, что уже произошло, в то время как вероятность — это предсказание того, что может случиться на руднике при определенной геомеханической ситуации. И поскольку при наличии геодинамической опасности эту ситуацию по возможности целенаправленно меняют, то частота и вероятность реализации динамических явлений могут существенно различаться между собой, что и имеет место на рудниках.

Суммарный ущерб определяют по формуле

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4, \quad (5.4)$$

где  $D_1 = P_1 C_1 K n$  — ущерб от травмирования рабочих;  $P_1$  — вероятность присутствия рабочих на участке реализации динамического явления;  $K$  — коэффициент тяжести несчастного случая ( $K_{\max} = 1$  при летальном исходе);  $n$  — число пострадавших рабочих;  $C_1$  — стоимость человеческой жизни. Существуют различные

методики оценки стоимости человеческой жизни: по зарубежным исследованиям человеческая жизнь оценивается от 650 тыс. до 7 млн долл. США [45]; от 2,8 млн долл. (Англия) до 7,6 млн долл. (Япония) [46], смертельный случай на рудниках Норильска обходится в 11 млн руб. [47];  $D_2$  — затраты на ремонт поврежденного оборудования и восстановление горных выработок;  $D_3$  — потери за счет простоя горного участка или рудника;  $D_4$  — стоимость потерянных запасов по причине динамического явления.

Величина риска может варьировать в широких пределах, она зависит в основном от мощности динамического явления. Динамические явления на апатитовых рудниках классифицируются (табл. 5.3) по уровню риска и в соответствии со стадиями возникновения и развития опасных ситуаций [48, 49]. В таблице 5.3 горно-тектонический удар и техногенное землетрясение объединены в одну группу, как принято в [49] и других инструктивных документах. Действительно, в отечественной горно-технической литературе не обозначена четкая граница между этими двумя понятиями: в обоих случаях это — мощное динамическое событие с катастрофическими последствиями для рудников. Между тем в материалах Австралийского центра геомеханики есть упоминание о том, что техногенное землетрясение

Таблица 5.3

Классификация геодинамических явлений в рудниках

Геодинамическое явление	Этап развития опасной ситуации	Сущность процесса	Уровень геодинамического риска
Шелушение стреляние, динамическое заколообразование	Угроза	Постепенное разрушение породы на поверхности выработки на отдельные пластинки, из-за отслоения которых места шелушения всегда выглядят «свежими»; отскакивание с обнажений выработки пластин пород различных размеров со звуком; стреляние с постепенным прорастанием трещин в течение длительного времени, образующиеся пластины повторяют по форме контур выработки	Низкий
Микроудар	Инцидент	Мгновенное хрупкое разрушение целика или части массива горных пород с выбросом породы в горные выработки без нарушения технологического процесса и травмирования людей	Низкий
Горный удар	Авария	Мгновенное хрупкое разрушение целика или части массива пород с выбросом породы в горные выработки с нарушением крепи, повреждением машин и механизмов и нарушением технологического процесса	Средний
Горно-тектонический удар (техногенное землетрясение)	Катастрофа	Мгновенная подвижка крупного блока пород по тектоническому нарушению или прорастание значительной трещины в массиве с образованием оперяющих трещин, сопровождаемые серией горных ударов и микроударов, разрушением выработок и крепи на больших площадях, нарушением или остановкой технологического процесса, образованием пылевого облака и воздушной волны, резким звуком или гулом	Высокий

может и не сопровождаться разрушением горных выработок, но наличие таких землетрясений однозначно свидетельствует об опасности горных ударов. Совершенно очевидно, что последствия для рудника техногенного землетрясения будут зависеть от расположения его очага: при достаточном удалении от горных работ будет иметь место толчок, звук и сотрясение от которого будут определяться энергией события; при расположении очага вблизи горных работ будет иметь место

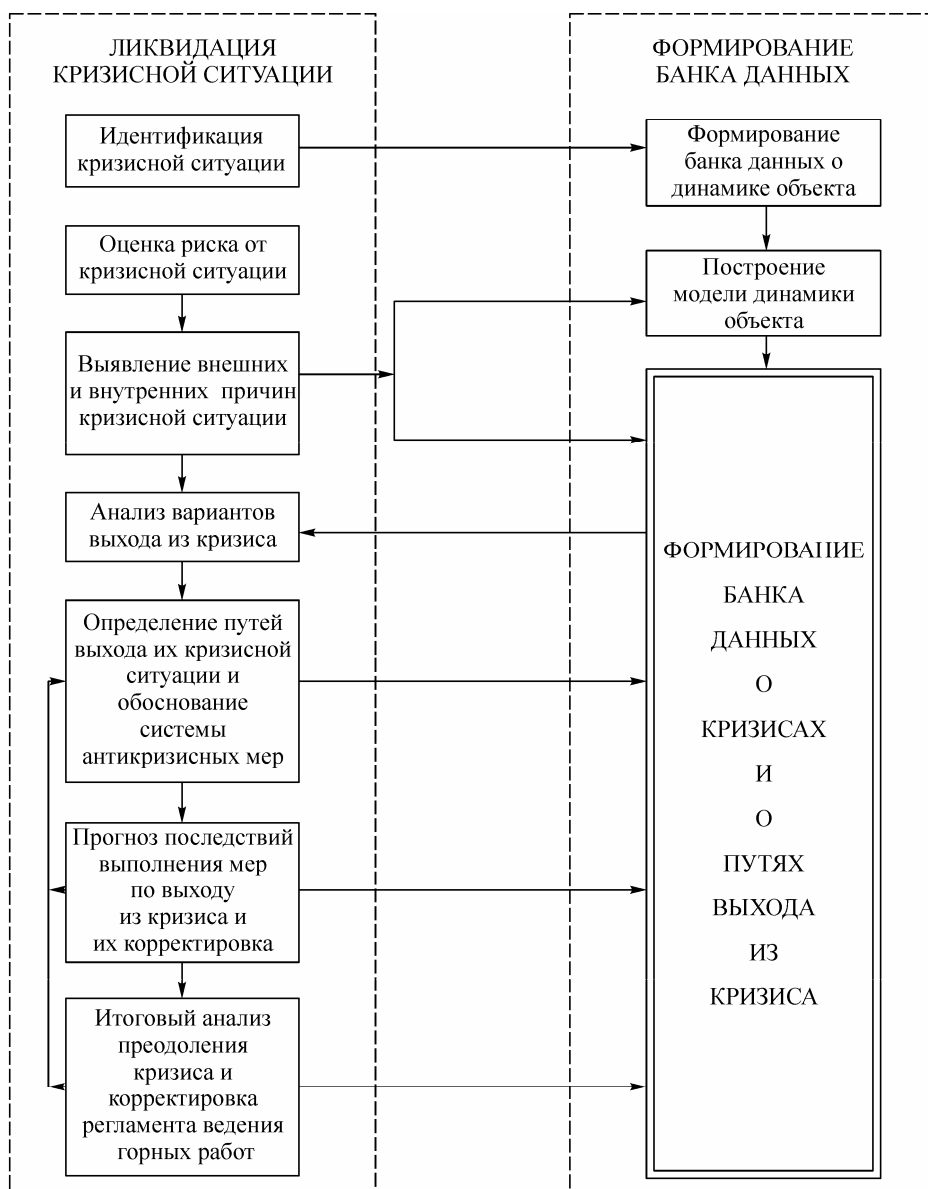


Рис. 5.6. Блок-схема ликвидации кризисной ситуации.



горно-тектонический удар в его общепринятой формулировке. Это обстоятельство следует иметь в виду при составлении соответствующих инструкций и в публикациях по тематике горных ударов.

Однако, как показывает опыт, по причине неоднородности состава и строения горных пород в массиве, неполной геомеханической и геологической информации, вынужденных (ситуативных) отступлений от проекта горных работ в руднике периодически возникают кризисные ситуации, сопровождаемые внезапными разрушениями горных выработок, в том числе и по причине динамических явлений в массиве пород. В производственном процессе любой кризис крайне нежелателен и подлежит незамедлительному устранению. Ликвидацию этих ситуаций следует осуществлять по типовому алгоритму (рис. 5.6) [50].

В первую очередь осуществляют идентификацию кризисной ситуации (определение типа разрушения, мощности динамического явления и т. д.) и оценивают величину риска от этого явления для всего технологического процесса по приведенной выше формуле.

Если величина риска оказывается неприемлемой, выявляются причины возникшей ситуации и определяются пути ее ликвидации. В достаточно простых случаях и при значительном опыте инженерно-технических работников многие из приведенных в алгоритме процедур выполняются интуитивно. Однако в более сложных случаях, действуя по приведенному алгоритму, можно сформировать базы данных и знаний о кризисных ситуациях в руднике, что существенно облегчит выход из этих ситуаций.

Следует подчеркнуть, что универсальность базовой модели определяет и универсальность алгоритма выхода из критических ситуаций, т. е. этот алгоритм может быть использован для ликвидации любой критической ситуации не только во всех звеньях производственного процесса, но и в других сферах человеческой деятельности.

### **5.3.2. Модель эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горно-рудной природно-технической системе**

Фундаментальной основой для управления геодинамическими рисками является изучение условий и факторов, влияющих на формирование и развитие опасных геодинамических процессов. Для этого необходимо развивать методику и технику геодинамического мониторинга, вести поиск индикаторов опасного и критического состояния участков геологической среды, совершенствовать систему профилактических противоударных мероприятий. Наиболее успешно эти задачи могут быть решены на основе законов эволюции геологической среды в горно-рудной природно-технической системе, для чего необходимо разрабатывать соответствующие модели.

Процесс эволюции на этом этапе можно представить в следующей математической форме:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{A}{(t_* - \tau)^s}, \quad (5.5)$$

где  $t_*$  — время обострения (начало бифуркации),  $\tau$  — текущее время,  $A, s$  — вообще говоря, неизвестные, постоянные величины,  $w$  — параметр, управляющий эволюционным процессом, например, энергия деформирования.

Интегрируя (5.5), получаем:

$$w_* - w(t) = \frac{A(t_* - t)^{1-s}}{(1-s)}, \quad (5.6)$$

где  $w^*$  — критическое значение удельной энергии деформирования.

Так как величина  $w_* - w(t)$  конечная и положительная, то должно выполняться условие

$$1 - s > 0. \quad (5.7)$$

В силу того, что скорость изменения удельной энергии деформирования в процессе эволюции даже в период адаптации не постоянна, то существует некоторое ее ускорение, которое получим, продифференцировав (5.5):

$$\frac{d^2 w}{d\tau^2} = \frac{As}{(t_* - \tau)^{1+s}}. \quad (5.8)$$

Для определения неизвестных величин  $A, s, t_*$ , входящих в уравнения (5.5)—(5.8), воспользуемся начальными условиями

$$w(0) = w_0, \quad \dot{w}(0) = \dot{w}_0, \quad \ddot{w}(0) = \ddot{w}_0, \quad (5.9)$$

которые находятся по результатам экспериментальных или расчетных данных на первых этапах эволюции системы. В (5.9) точками обозначены первая и вторая производные по времени. При этом имеем

$$w_0 = w_* - \frac{At_*^{1-s}}{1-s}, \quad \dot{w}_0 = \frac{A}{t_*^s}, \quad \ddot{w}_0 = \frac{As}{t_*^{1+s}}. \quad (5.10)$$

Если в качестве приращения времени взять  $\Delta t = 1$ , то определим значения

$$\dot{w}_0 = \frac{w_1 - w_0}{1}; \quad \ddot{w}_0 = \frac{\dot{w}_1 - \dot{w}_0}{1} = \frac{w_2 + w_0 - 2w_1}{1}.$$

Таким образом, из (5.10) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1-s}{s} &= \frac{(w_1 - w_0)^2}{(w_* - w_0)(w_2 + w_0 - 2w_1)}, \\ t_* &= \frac{(w_* - w_0)(1-s)}{w_1 - w_0}, \\ A &= (w_1 - w_0)t_*^s. \end{aligned} \quad (5.11)$$

В качестве примера рассмотрим изменение удельной энергии деформирования горных пород на Кировском руднике ОАО «Апатит» (гор. +252 м) с точки зрения эволюционного процесса с обострением. По результатам численного моделирования имеем  $w_0 = 0,088 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>,  $w_1 = 0,098 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>,  $w_2 = 0,1095 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>,  $w_* = 0,27 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>.

Из (5.11) находим  $(1-s)/s = 0,366$ ,  $s = 0,732$ ,  $1-s = 0,268$ ,  $t_* = 4,9$ ,  $A = 0,0319$ .

Тогда

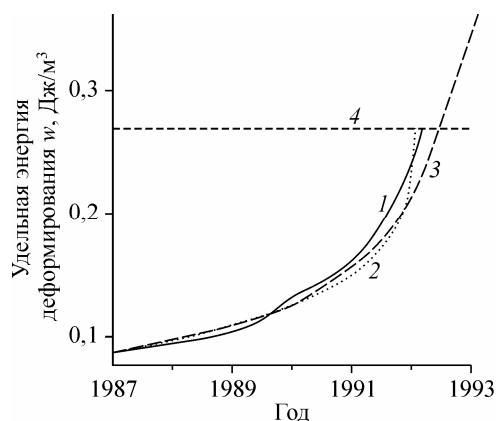


Рис. 5.7. Удельная энергия деформирования при отработке целика на гор. +252 м Кировского рудника.

Поясн. см. в тексте.

аппроксимация по формуле (5.12), а кривая 3 — аппроксимация зависимостью (5.13). Из рисунка видно, что данные численного моделирования достаточно хорошо аппроксимируются зависимостями, полученными как при рассмотрении эволюционного процесса с обострением, так и при рассмотрении его с точки зрения естественного накопления и диссипации энергии в процессе отработки блока-целика.

Таким образом, имеется принципиальная возможность по величинам критической энергии деформирования и начальным значениям энергии, ее первой и второй производным по времени определить время реализации динамического явления. Но по причине большой изменчивости параметров свойств и состояния пород в массиве надежный временной прогноз в настоящее время представляется затруднительным. Поэтому для оценки геодинамической безопасности необходим геодинамический мониторинг геологической среды.

### 5.3.3. Экспертная система оценки геомеханической ситуации в руднике для выбора способов управления горным давлением при разработке апатитовых месторождений

Для управления геодинамическим риском в Горном институте КНЦ РАН на основе численного метода разработана экспертная система прогнозной оценки изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород с целью выбора технических решений по обеспечению безопасности горных работ. Для оценки НДС массива пород выбран метод конечных элементов (МКЭ). Создан программный комплекс для последовательных экспертных оценок состояния массива на разных масштабных уровнях, позволяющий не только осуществлять региональный прогноз опасных зон концентрации напряжений на уровне рудника или шахтного поля, но обоснованно разрабатывать и принимать технические решения, снижающие опасность возникновения динамических форм проявления горного давления.

$$w(t) = 0,27 - 0,1191(4,9 - t)^{0,268}. \quad (5.12)$$

Эволюционный процесс можно рассматривать как процесс накопления и диссипации энергии. В этом случае его можно аппроксимировать зависимостью

$$w(t) = w_0 + (w_1 - w_0) \frac{\operatorname{sh} t}{0,1752t^2 + 1}, \quad (5.13)$$

где  $w_0, w_1$  — те же, что и выше,  $\operatorname{sh} t$  — гиперболический синус времени  $t$ .

На рис. 5.7 показано изменение удельной энергии деформирования. Здесь кривая 1 — данные по результатам численного моделирования процесса отработки блока-целика, 2 —

Разработанное компьютерное приложение Sigma3D включает в себя три крупных блока: блок подготовки исходных данных, блок решения задачи МКЭ, блок дополнительной обработки и визуализации результатов расчета.

Важнейшим этапом в решении задач методом конечных элементов является построение расчетной модели, а именно, сетки конечных элементов. От того, насколько удачно это сделано, зависят скорость сходимости решения, его точность и надежность. В этой связи был создан пользовательский интерфейс, направленный на построение оптимальной конечно-элементной модели.

Создание модели массива горных пород для расчета напряженно-деформированного состояния предполагает учет основных геологических и горно-технических факторов. К первой группе относятся: рельеф дневной поверхности, основные структурные нарушения (разломы), контакты рудных тел; ко второй группе — границы текущих и проектируемых очистных пространств, местоположение выработок и других элементов горной технологии, которые планируется учесть в конкретной задаче. Модель создается таким образом, чтобы обеспечить многовариантность расчетов, поэтому рассматриваемый этап является самым трудоемким.

Границы расчетной модели выбираются таким образом, чтобы они не оказывали влияния на распределение напряжений внутри области при изменении от варианта к варианту параметров очистных пространств, уточнении конфигурации разломных зон и контактов рудных тел. Рекомендованное удаление границ от отработанных пространств составляет три усредненных радиуса очистной выемки.

Процесс выбора границ зависит от того, является ли данная модель исходной или она формируется как подобласть мелкомасштабной модели с уже рассчитанным полем напряжений. В первом случае действует правило трех радиусов, а во втором происходит сравнение перемещений на гранях будущей модели для двух, наиболее различающихся по конфигурации очистных пространств, вариантов. При решении аналогичных задач было установлено, что отклонения напряжений в массиве с размером отработанного очистного пространства  $l_{отб}$  ( $l_{отб}$  — размер половины пролета отбиваемого в плане очистного пространства) от напряжений в ненарушенном массиве пород в пределах точности решения МКЭ составляет примерно  $4l_{отб}$ . С учетом этого определение границ новой расчетной области сводится к нахождению таких узлов глобальной расчетной области, перемещения в которых  $u_x$ ,  $v_y$  и  $w_z$ , рассчитанные для не нарушенного горными работами массива пород, не отличались бы более чем на 5 % от значений после полной его отработки. Данное условие является более жестким, чем выбор граничных условий по напряжениям, поскольку напряжения убывают обратно пропорционально  $l_{отб}^2$ , а перемещения — обратно пропорционально  $l_{отб}$ . Таким образом, в конечной крупномасштабной расчетной схеме оказываются учтенными основные влияющие на напряженное состояние массива пород факторы.

Для удобства пользователя вместе с разработанной моделью поставляется набор подложек с геологической и технологической информацией.

Приложение Sigma3D (вид окна приложения показан на рис. 5.8, см. вклейку) позволяет создавать новые варианты — редактировать геометрию очистных пространств, уточнять положение контактов рудных тел: вводить элементы для моделирования неоднородностей второго и третьего порядков, нарушенных зон (эти процедуры можно выполнить путем задания любому элементу типа породы с оп-

ределенным модулем упругости, коэффициентом Пуассона и объемным весом), изменения местоположения отдельных узлов расчетной схемы; производить перерасчет напряженно-деформированного состояния; выполнять анализ результатов. В качестве выходной информации могут выдаваться главные компоненты напряжений и деформаций в виде карт изолиний или их векторного распределения, а также категории состояния выработок (рис. 5.9, см. вклейку) в буквенном отображении или как карты изолиний. Основные категории качества состояния выработок на апатитовых рудниках Хибин приведены в табл. 5.4—5.6.

Таблица 5.4

Классификация категорий состояния горных выработок

Категории состояния выработок	Напряженное состояние			Формы проявления горного давления
	в устойчивых породах (Ik)	в среднеустойчивых породах (IIк)	в слабоустойчивых породах (IIIк)	
А	$\sigma_d \leq 0,3\sigma_c^*$	—	—	Выработка сохраняет устойчивость (разрушения и отслоения не наблюдаются)
Б	—	$\sigma_d \leq 0,3\sigma_c$ в породах IV, V категорий по трещиноватости		Вывалы по трещинам
В	$0,3\sigma_c < \sigma_d \leq 0,5\sigma_c$ в породах I—III категорий по трещиноватости			Постепенное хрупкое разрушение пород на контуре в виде шелушения и плитчатого расслоения пород, отслоения по трещинам
Г	$0,5\sigma_c < \sigma_d \leq 0,8\sigma_c$ в породах I—III категорий по трещиноватости		—	Стреляние пород, динамическое заколообразование, интенсивное шелушение пород
Д	$\sigma_d > 0,8\sigma_c$ в породах I—III категорий по трещиноватости		—	Интенсивные стрельяние пород и динамическое заколообразование, возможны микроудары и горные удары

\*  $\sigma_d = \sigma_2/\sigma_1$  ( $\sigma_1$  — максимальная компонента напряжений),  $\sigma_c$  — предел прочности пород на сжатие.

Таблица 5.5

Классификация пород и руд по интенсивности трещиноватости

Категория	Качественная характеристика пород и руд по трещиноватости	Интенсивность трещиноватости $I_T$ , шт./пог. м
I	Монолитные	1
II	Слаботрещиноватые	2—5
III	Среднетрещиноватые	6—10
IV	Сильнотрещиноватые	11—15
V	Раздробленные и перемятые (разрушенные)	>15

Таблица 5.6

Классификация пород и руд апатитонефелиновых месторождений по устойчивости

Категория	Оценка состояния устойчивости	Категория по прочности	Категория по интенсивности трещиноватости
I	Устойчивые	I—IV	I—III
II	Среднеустойчивые	I—IV V	IV—V I—III
III	Слабоустойчивые	I—IV V VI	V IV, V III—V

Одним из существенных преимуществ созданного программного продукта является привязка расчетной модели к рудничным координатам, как на этапе редактирования, так и на этапе анализа результатов. Сечения модели дополняются привычными для горного инженера разрезами (по и вкрест простирания рудного тела), а также планами основных рабочих горизонтов. Такие подложки могут корректироваться по мере необходимости. В итоге, пользователь получает картину распределения напряжений на определенной высотной отметке с нанесенными на нее фактически пройденными и проектными выработками (рис. 5.10, см. вклейку).

Следующим масштабным уровнем является возможность создания крупномасштабной модели окрестности одиночной или системы выработок в расчетном поле напряжений в любом месте исходной модели и получения детальной картины распределения каждой из перечисленных выше компонент на контуре выработок, сечение которых также можно корректировать. Для реализации этой функции разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме выбирать местоположение и параметры новой расчетной области, производить ее привязку, формировать файлы, описывающие новую локальную конечно-элементную модель и используемые в дальнейшем для расчета напряженно-деформированного состояния пород. Начальные условия задаются в виде узловых перемещений, рассчитанных путем интерполяции значений, полученных для модели блока при заданной конфигурации очистных пространств. Все эти процедуры выполняются автоматически, без участия пользователя. По завершении работы соответствующих программ формируется новый проект со всеми необходимыми файлами. В итоге исследователь получает данные о напряженно-деформированном состоянии пород в окрестности выработки (или системы выработок), выполняет анализ полученных результатов, получает уточненную оценку категории состояния пород на контуре выработки и рекомендации по обеспечению ее устойчивости.

Специалист службы предупреждения и профилактики горных ударов может получить необходимую информацию по НДС массива и категориям состояния выработок на текущий момент времени, на ближайшую или отдаленную (до 3 лет) перспективу, заранее определить наиболее удароопасные участки массива, виды и объемы крепления выработок. Такая оценка особенно важна при необходимости корректировки планов горных работ.

В настоящее время разработанное программное обеспечение установлено на двух подземных рудниках ОАО «Апатит» для удароопасных блоков и использует-

ся как один из методов регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород, а также для выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ.

#### 5.3.4. Пространственно-временные закономерности развития техногенной сейсмичности при отработке Хибинских апатитовых месторождений

Техногенная сейсмичность является отражением самоорганизации геомеханических процессов, происходящих в геологической среде горно-рудной природно-технической системы. Широкий энергетический диапазон сейсмичности говорит о каскадном развитии разрушения в массиве горных пород от микротрещин до магистрального разрыва. Это свидетельствует о принципиальной возможности пространственно-временного прогноза критического состояния контролируемых участков шахтного поля по параметрам сейсмического процесса. На настоящее время определены прогностические критерии сейсмической опасности, апробированные в условиях крупномасштабной разработки апатитовых месторождений на Кольском полуострове (северо-запад России).

Поскольку процесс разрушения участков массива развивается в пространстве и во времени, определение условий перехода в критическое состояние участков геологической среды должно в первую очередь учитывать именно пространственно-временные параметры сейсмического режима, анализ которых выполнен по базам данных подсистем Центра геофизического мониторинга (ЦГМ) ОАО «Апатит».

В настоящее время используются следующие прогностические критерии: концентрационный, фрактальный, угол наклона графика повторяемости сейсмических событий, параметр  $A$  и комплексный критерий, рассчитываемый двумя способами.

Ниже приведено краткое описание каждого из критериев.

Критерий фрактального размера пространственного распределения сейсмических событий

Критерий фрактального размера пространственного распределения сейсмических событий  $D$  определяется из выражения связи числа событий  $N(r)$  в заданном круге радиуса  $r$ . Критерий  $D$  равен:

$$D = \frac{\log(C(r))}{\log r}, \quad (5.14)$$

где  $C(r)$  — корреляционный интеграл гипоцентрального распределения сейсмических событий  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$  для радиусов  $r$  от 50 до 250 м [7]:

$$C_{(r)} = \frac{\sum_{\substack{N \\ |p_i - p_j| < r}} N_{\text{пар}}(p_i, p_j)}{N^2}, \quad (5.15)$$

где  $N_{\text{пар}}$  — количество пар событий с расстоянием между ними меньше  $r$ ;  $N$  — общее число событий.

Фрактальный размер должен уменьшаться перед возникновением сильных сейсмических событий. Уменьшение значений угла наклона графика перед землетрясением с физической точки зрения означает концентрацию большинства сейсмических событий в узкой области вблизи будущего эпицентра события, т. е. имеет место лавинообразный процесс формирования магистрального разрыва за счет энергии большого числа трещин меньших размеров.

Применение этого критерия как единственного затруднено тем, что повышенная вероятность ложных тревог при прогнозе с помощью фрактального критерия обусловлена взрывными работами, проводимыми на руднике. Этот недостаток может быть устранен путем наложения запрета на тревогу в начале релаксационной последовательности сейсмических событий, вызванных взрывом. Также следует отметить неустойчивость при работе с малыми выборками событий (5—7), что является характерной особенностью всех статистических моделей. При увеличении размера выборки неустойчивость исчезает, но незначительно увеличивается вероятность пропуска цели. Вероятность пропуска цели также обусловлена особенностью методики, рассчитанной на прогноз в квазисплошном массиве при естественном ходе подготовки мощного сейсмособытия.

Критерий изменения величины угла наклона графика повторяемости сейсмических событий

Величина угла наклона графика повторяемости сейсмических событий  $\gamma$  рассчитывается по методу максимального правдоподобия по формуле, предложенной в [1]:

$$\gamma = \lg \left[ 1 + \frac{N_{\Sigma}}{\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot N(K_{\min} + \Delta K n)} \right] / \Delta K, \quad (5.16)$$

где:  $N_{\Sigma}$  — суммарное число сейсмических событий в диапазоне энергетических классов от  $K_{\min}$  до  $K_{\max}$  (объем выборки);  $N(K_{\min} + \Delta K n)$  — число сейсмических событий энергетического класса  $K_{\min} + n\Delta K$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\Delta K$  — единица диапазона энергетических классов.

Распределения значений параметра  $\gamma$  по ячейкам демонстрируют, что сейсмически активные зоны шахтного поля сильно дифференцированы по параметру  $\gamma$  на зоны высоких и низких значений. Эти зоны меняют свою конфигурацию и местоположение, отражая тем самым характер перераспределения напряжений в массиве в процессе ведения очистных работ.

Применение этого критерия как единственного затруднено тем, что при попадании в рассматриваемую ячейку единичного события максимального (или минимального) энергетического уровня (по сравнению с фоновыми значениями для остальной совокупности событий, находящихся в этой ячейке) мы получаем автоматически значение этого параметра для всей ячейки. Это соответственно отражается на общем анализе и приводит к завышенным (или заниженным) значениям параметра  $\gamma$  по данной ячейке. А это, в свою очередь, влияет на дальнейшие расчеты эффективности прогноза по данному критерию.



Таким образом, вероятностный прогноз по изменению значений угла наклона графика повторяемости в принципе возможен, но необходимо увеличивать количество событий в выборке для более адекватного представления анализа и, по возможности, применять его в комплексе с другими прогностическими критериями.

#### Концентрационный критерий

Согласно кинетической теории прочности, разрушение твердых тел — не единовременный мгновенный акт, а развивающийся во времени процесс, зависящий от характеристик материала, приложенной нагрузки и температуры. Окончательному разрушению твердых тел, связанных с прохождением магистральной трещины, предшествует стадия объемного разрушения материала — накопление микротрещин с последующим укрупнением и слиянием их. В лабораторных экспериментах установлено, что определяющим при переходе от микро- к макроразрушению является концентрационный критерий [1]

$$K = N^{-1/3}/l_{cp}, \quad (5.17)$$

где  $N$  — число трещин в единице объема в предразрывном состоянии;  $l_{cp}$  — средняя длина трещин.

Разрушение наступает, когда концентрация трещин в некотором объеме твердого тела достигает критической величины. Абсолютная величина концентрационного критерия позволила установить причину потери устойчивости тела вследствие взаимодействия зародышевых трещин. При достижении концентрационного критерия определенной величины плавный процесс накопления трещин сменяется ускоренным лавинообразным процессом слияния и укрупнения трещин, что и приводит к макроскопическому разрушению материала. С кинетической точки зрения это означает, что основная доля долговечности материала затрачивается на подготовку критического состояния, сам же лавинообразный процесс перехода к макроразрушению занимает малую долю долговечности. Среднее значение концентрационного критерия при разрушении образцов различных материалов, в том числе и горных пород,  $K = 3—5$ .

При анализе процесса перехода к укрупнению трещин целесообразно исходить из представления о хаотическом распределении трещин.

Пусть в образце образовались микротрещины с размерами  $l_i$  и концентрацией  $N_i$ . Тогда среднее расстояние между центрами трещин в единицах размера микротрещин будет находиться из формулы (5.17). В силу неравномерности распределения трещин некоторые микротрещины могут оказаться на достаточно близком расстоянии друг от друга, что приведет к их слиянию и появлению более крупной трещины размером  $l_s$ . Число  $N_s$  скопления из  $s$  микротрещин может быть получено из выражения

$$N_s = \frac{N_i a^s}{s s!}, \quad (5.18)$$

где  $a$  — среднее число микротрещин в скоплении. С учетом формулы Стирлинга  $s! = 2\pi s(s/l)^s$  выражение (5.18) принимает вид

$$N_s = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi s^{3/2}}} \left( \frac{e}{K} \right)^s. \quad (5.19)$$

Важным следствием, вытекающим из анализа процесса накопления стабильных зародышевых микротрещин на основе статистики, является возникновение критической ситуации при уменьшении  $K$ . При низкой концентрации микротрещин, когда  $K > l_{\text{ср}}$ , вероятность возникновения крупных трещин с учетом формулы Стирлинга  $s!$ , согласно (5.19), очень мала. При условии  $K \approx l_{\text{ср}}$  эта вероятность резко возрастает. Условие  $K = l_{\text{ср}}$  определяет границу перехода стадии спокойного накопления мелких трещин к стадии резкого укрупнения трещин. Следовательно, с учетом (5.17) равенство  $K = l_{\text{ср}}$  может рассматриваться как концентрационный критерий разрушения твердых тел.

#### Критерий А

Под воздействием крупномасштабной обработки месторождений в блочных геологических средах при действии высоких гравитационно-тектонических силовых полей в массиве горных пород происходит значительное перераспределение напряжений, выражающееся в сейсмической активизации наиболее напряженных участков массива. При этом процесс формирования магистральных разрывных нарушений, так же как и подвижки блоков пород по существующим зонам ослаблений, характеризуется увеличением суммарной длины трещин исследуемого участка массива. Если эти процессы рассматривать как возможные источники изменений напряженного состояния породных массивов и режима проявлений горного давления, то по значению соотношения суммарной длины трещин к количеству событий в рассматриваемом пространственно-временном окне можно констатировать переход рассматриваемого участка массива из одного состояния в другое:

$$A = \sum L/N, \quad (5.20)$$

где  $A$  идентифицирует переход рассматриваемого участка массива из устойчивого состояния (при  $A = 1,5—2,0$ ) в неустойчивое (при  $A = 2,5—3,0$ ), или достижение им предельного напряженного состояния (при  $A > 3,5$ ), при котором вероятность реализации сильного сейсмического события на данном участке значительно повышается.

Значения критерия здесь приведены условно, поскольку каждое из обрабатываемых месторождений полезных ископаемых отличается от других по своим физико-механическим свойствам. В связи с этим пороговый уровень перехода из одного состояния в другое необходимо рассчитывать и устанавливать с учетом специфики контролируемого массива.

Подтверждение сделанных предположений можно продемонстрировать результатами анализа базы данных сейсмических событий за период с сентября 2006 по конец июля 2007 г., зарегистрированных Кировской подсистемой ЦГМ ОАО «Апатит». В течение всего периода наблюдений (рис. 5.11) происходили колебания параметра  $A$  в пределах значений, соответствующих устойчивому состоянию контролируемого массива. Пик в декабре 2006 г. обусловлен девятью сейсмическими событиями с энергией выше  $10^5—10^6$  Дж, пик в марте 2007 года — пятью сейсмическими событиями с энергией выше  $10^5—10^6$  Дж.

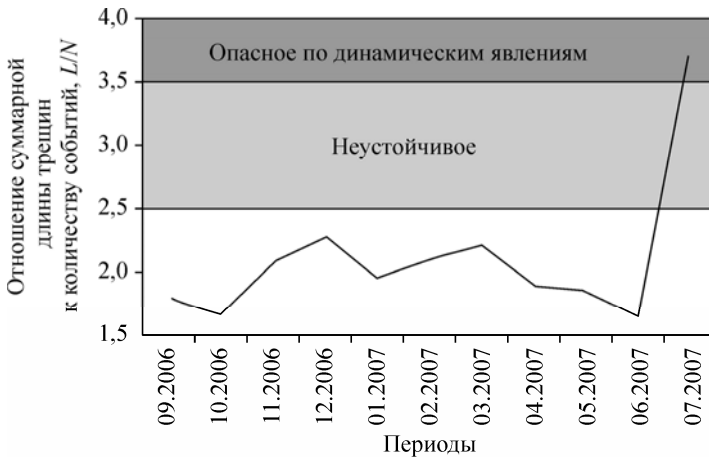


Рис. 5.11. Соотношение суммарной длины трещин  $L$  к количеству событий  $N$  за рассматриваемый период для Кировской подсистемы.

Переход в неустойчивое состояние в июле 2007 г. обусловлен сейсмическими событиями с энергией выше  $10^6$  Дж. Так, 14.07.2007 в 9 : 08 : 09 произошло сейсмическое событие с энергией  $E = 1,34 \cdot 10^8$  Дж, при котором встряхивание массива ощущалось работниками рудника, но разрушений выработок не было зафиксировано; 19.07.2007 произошло обрушение горных пород с кровли в районе геологических нарушений (падением заколов был травмирован взрывник). Такое заколообразование обусловлено непосредственной близостью очистных работ к окисленной зоне и влиянием динамических нагрузок при взрывании вееров скважин. 23.07.2007 зафиксировано сейсмическое событие с энергией  $1,67 \cdot 10^9$  Дж, при котором встряхивание массива ощущалось не только работниками рудника, но и в пос. Кукисвумчорр, однако видимых разрушений выработок службой СППГУ Кировского рудника не отмечено.

Расчет общей вероятности возникновения сильного сейсмического события при одновременном контроле нескольких критериев по формуле Байеса

Расчет производится по формуле

$$P(D_1 | K) = \frac{P(D_1) \cdot \prod_{i=1}^n P(K_i | D_1)}{P(D_1) \cdot \prod_{i=1}^n P(K_i | D_1) + P(D_2) \cdot \prod_{i=1}^n P(K_i | D_2)}, \quad (5.21)$$

где  $P(D_1)$  — безусловная стационарная вероятность возникновения сильного сейсмического события (ССС) в рассматриваемой пространственной ячейке (событие  $D_1$ );  $P(D_2) = 1 - P(D_1)$  — безусловная стационарная вероятность отсутствия СССР в рассматриваемой пространственной ячейке (событие  $D_2$ );  $P(K_i | D_1)$  — условная вероятность появления прогностического признака  $K_i$ , за которым последовало СССР в рассматриваемой пространственной ячейке (вероятность обнаруже-

ния);  $P(K_i|D_2)$  — стационарная условная вероятность появления прогностического признака  $K_i$ , за которым не последовало ССС (вероятность ложной тревоги);  $n$  — количество прогностических признаков.

По полученной карте стационарной условной вероятности возникновения ССС проводится расчет статистических характеристик.

Расчет общей вероятности возникновения сильного сейсмического события при одновременном контроле нескольких критериев по средним значениям

Для каждого прогностического признака проводится нормировка значений признака к интервалу  $[0, 1]$  по формуле

$$X'_i = \frac{X_i - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}, \quad (5.22)$$

где  $X$  — множество всех значений прогностического признака;  $X_i$  — старое значение прогностического признака;  $X'_i$  — новое значение прогностического признака;  $i = [1..m]$ ,  $m$  — количество значений прогностического признака.

В результате расчетов получаются карты распределения значений прогностических признаков, нормированных к интервалу  $[0, 1]$ . Значение комплексного показателя в ячейке рассчитывается путем суммирования полученных величин прогностических признаков по формуле

$$X'' = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X'_j, \quad (5.23)$$

где  $N$  — количество отдельных прогностических признаков,  $X'_j$  — значение прогностического признака.

Таким образом, используя данные критерии, можно определить опасность реализации крупных динамических событий.

Ниже приводятся результаты анализа состояния массива за период июнь 2007—июнь 2008 г.

**Расвумчоррская подсистема.** На графиках параметров сейсмичности на Расвумчоррском руднике за июнь 2007—июнь 2008 гг. (рис. 5.12) видны три пика максимальных значений суммарной энергии зарегистрированных событий (максимальный в октябре и два незначительных превышения в январе и мае). Первый и последний пики обусловлены резкими изменениями температур и обильными водопритоками, а январский — технологическим режимом. При этом значения количества событий и суммарной длины трещин на протяжении всего рассматриваемого периода изменялись незначительно, но характерно увеличение количества событий при уменьшении суммарных энергии и длины трещин, что свидетельствует об увеличении количества низкоэнергетических событий по сравнению с предшествующим периодом. Настораживает устойчивое увеличение суммарных энергии и соответственно длины трещин, наблюдающееся с середины апреля.

Результаты анализа изменений параметра  $A$  приведены на рис. 5.13. Для событий с энергией выше  $10^5$  Дж четко прослеживаются четыре пика. Максимальные из них соответствуют августу и октябрю (значения параметра превышают 15), связаны с обильными водопритоками и резкими изменениями температур. Январский

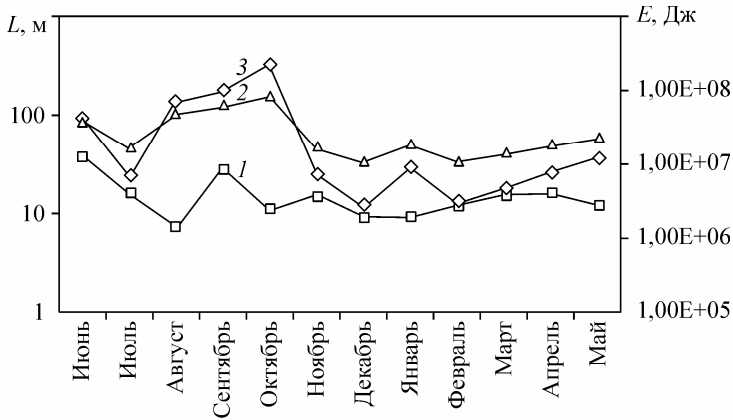


Рис. 5.12. Сейсмичность на Расвумчоррском руднике за 2007—2008 гг.

1 — количество событий  $N$ ; 2 — суммарная длина трещин  $L$ ; 3 — суммарная энергия  $E$ .

пик обусловлен изменением технологического режима. Больше всего опасений вызывает устойчивая тенденция увеличения значения параметра, начавшаяся в середине марта. С учетом ожидаемых обильных водопритоков в июне, возможна реализация сейсмических событий с энергией больше  $10^7$  Дж.

**Объединенная Кировская подсистема.** Ранее нами приводились результаты анализа сейсмического режима по данным Кировской и Юкспорской подсистем. Вследствие развития горных работ на Объединенном Кировском руднике (в том числе отработка запасов вблизи Саамского разлома, уход горных работ от левого фланга), зоны взаимного влияния Кукисвумчоррского и Юкспорского крыльев значительно пересеклись. В ОАО «Апатит» было принято решение об объединении двух сейсмических подсистем в одну с расширенной зоной контроля. С июня 2007 г. такая система реализована. Поскольку изменились начальные координаты пространственного окна (сдвиг на 400 м), сопоставление с ранее проведенными наблюдениями в настоящее время затруднительно. Поэтому ниже приводится анализ данных только новой подсистемы.

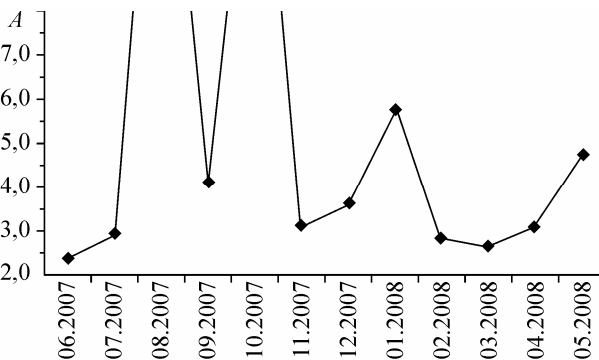


Рис. 5.13. Изменение параметра  $A = L/N$  на Расвумчоррском руднике за 2007—2008 гг.

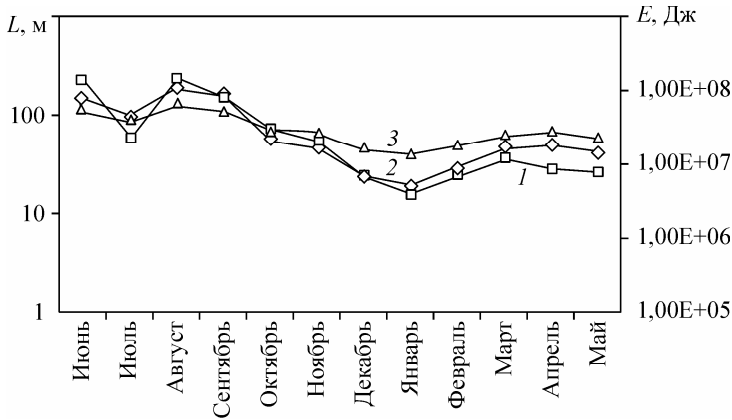


Рис. 5.14. Сейсмичность на Объединенном Кировском руднике за 2007—2008 гг.

Усл. обозн. см. рис. 5.12.

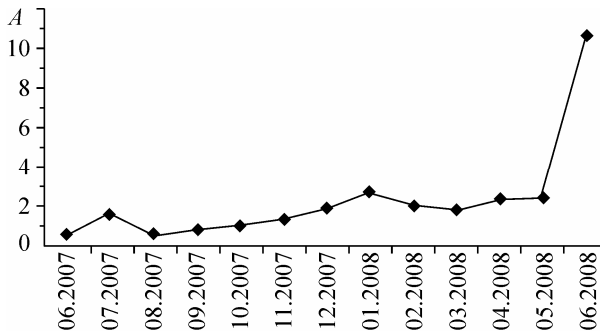


Рис. 5.15. Изменение параметра  $A$  на Объединенном Кировском руднике за 2007—2008 гг.

Как видно из динамики параметров сейсмичности на Объединенном Кировском руднике за период с июня 2007 по июнь 2008 г. (рис. 5.14), к январю 2008 г. происходило постепенное уменьшение всех параметров, которые затем также плавно начали повышаться к апрелю. Первый (в августе) и последний (в апреле) пики обусловлены резким изменением температур и обильными водоприитоками.

Как видно из данных анализа сейсмичности массива (рис. 5.15), по изменению параметра  $A$  для событий с энергией выше  $10^5$  Дж картина поведения массива резко отличается от оценки по приведенным выше параметрам. Постепенно значения параметра за весь анализируемый период увеличивались и к маю превысили критический уровень. То есть массив находится в состоянии наиболее вероятной реализации крупных сейсмических событий, которые могут быть спровоцированы (наряду с техногенными факторами) резкими изменениями температурного режима и обильными водоприитоками.

### 5.3.5. Оценка геодинамической опасности по комплексному критерию

Методика выявления геодинамически опасных периодов

Методика выявления геодинамически опасных периодов по каждому прогностическому критерию предусматривает расчет статистических характеристик на основе ретроспективного анализа баз данных по сейсмичности массивов на первом этапе и возможность перехода к анализу в режиме реального времени на последующих этапах. Анализ предусматривает определение следующих статистических характеристик:

- 1) среднее время ожидания сильного сейсмического события и ошибка времени ожидания;
- 2) вероятность возникновения события;
- 3) эффективность прогноза по времени и по площади.

Для расчета перечисленных характеристик нами разработана программная система «Mining-Induced Earthquakes Prediction System» (MIEPS)\*.

Общая схема работы программной системы

Общая схема работы приложения представлена на рис. 5.16.

Обработка данных происходит одновременно по нескольким отдельно выбранным критериям либо одновременно по всем критериям. Переход к обработке данных по комплексу прогностических признаков имеет смысл только в том случае, когда получены результаты для двух и более отдельных прогностических признаков.

Для каждого из прогностических критериев необходимо выбрать такие параметры, при которых получаются наилучшие результаты прогноза сильных сейсмических событий.

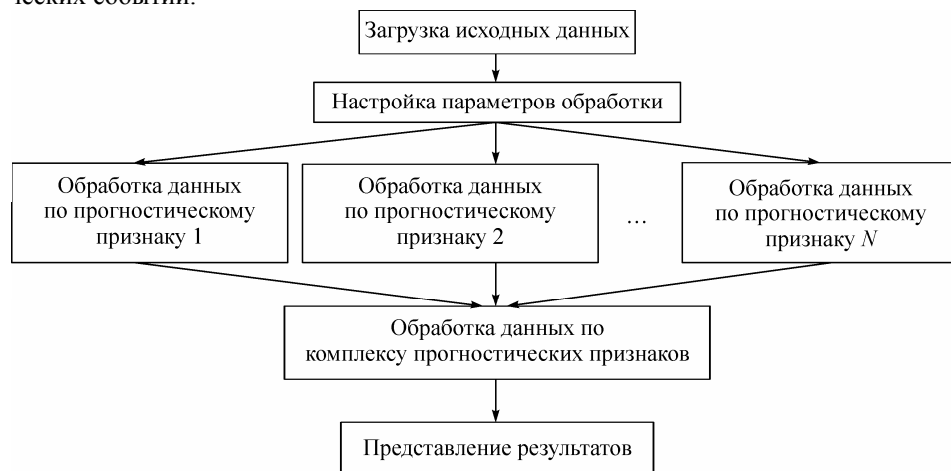


Рис. 5.16. Общая схема работы приложения.

\* Разработка системы осуществлена О. Г. Журавлевой.

Выбирается пространственно-временной интервал, для которого будет проводиться прогноз, а также устанавливаются критические уровни для каждого из критериев. Критический уровень — это определенное значение прогностического критерия в данное время в данной области. Если значение прогностического критерия превысило или стало равным критическому уровню, принято считать, что в данной области может произойти сильное событие в течение определенного периода времени с какой-то вероятностью.

Расчет значений прогностических критериев, вероятностей и времени ожидания сильного сейсмического события ведется с использованием методики, описанной ранее. В настоящий момент в программе для исследовательских целей реализованы все рассмотренные выше прогностические критерии.

На данном этапе работы мы получаем:

- 1) карты распределения величин прогностических критериев;
- 2) вероятности появления сильного сейсмического события, а также других характеристик для каждой выборки, полученной на этапе 1.

При прогнозе используется либо событийное, либо временное окно.

Событийное окно рассматривается со сдвижкой его по временной оси на одно событие, размеры событийного окна могут быть любыми, например, равные 15, 20 и 30 событиям, для выяснения, при каком числе событий прогноз будет более устойчив.

Размеры временного окна также могут быть любыми. Например, размер окна 30 дней со сдвижкой на 15 дней. Для временного окна также устанавливается минимум событий, для которого целесообразно проводить расчеты значений критериев (например, пять событий).

Необходимо определить оптимальные значения всех параметров, т. е. такие, при которых результаты прогноза будут наилучшими.

При прогнозировании важную роль играют значения следующих параметров:

- 1) вероятность обнаружения;
- 2) время тревоги;
- 3) эффективность прогноза по времени и по площади.

При этом необходимо учитывать, что, несмотря на маленькую величину вероятности обнаружения  $P(K/D_1)$ , эффективности прогноза могут иметь удовлетворительные значения по времени  $I_T$  и по площади  $I_S$ . Это связано с тем, что эффективность прогноза зависит от времени тревоги. Чем оно меньше, тем больше эффективность прогноза и, соответственно, наоборот, чем больше время тревоги, тем меньше эффективность прогноза. Такие вычисления производятся по каждому критерию с разными уровнями тревог и различными значениями параметров событийного окна.

После проведенной оценки для исследуемой области по отдельным критериям для каждой пространственной ячейки может определяться условная вероятность возникновения опасного состояния по комплексу прогностических критериев.

Обработка данных по комплексу прогностических критериев

В основу комплексного прогноза критических состояний участков массивов пород нами положен принцип выделения пространственно-временных областей

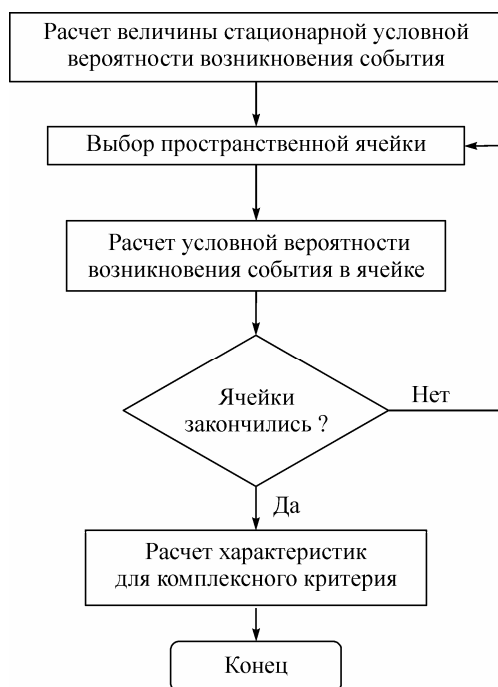


повышенной вероятности ожидания опасных состояний по совокупности единичных контролируемых параметров. При этом все прогностические параметры должны быть представлены в виде пространственно-временных распределений аномальных отклонений от долговременного или фоновое уровня каждого параметра. Для всех прогностических параметров должны быть установлены ретроспективные статистические оценки эффективности прогноза для выбранных уровней тревоги.

При обработке данных комплексным критерием границы области сканирования фиксированы. Они не выходят за пределы области сканирования, выбранной при обработке данных по отдельным прогностическим критериям. Проводить обработку данных по комплексному критерию можно неограниченное число раз. То есть пользователь может изменять координаты области сканирования, чтобы получить результаты в разных частях области отдельно друг от друга. Программа использует рассчитанные распределения величин отдельных критериев и на основе этих данных строит карту условных вероятностей возникновения сильных событий.

Общая схема работы программы на данном этапе представлена на рис. 5.17.

Так же как и в случае обработки данных по отдельным прогностическим критериям, обработка данных по комплексу прогностических критериев представляет собой сложную задачу. Можно сказать, что представленная схема разбивает эту сложную задачу на несколько подзадач, т. е. данный этап работы разбивается на более простые этапы, которые в свою очередь также могут быть представлены в виде блок-схем.



Для работы с комплексным критерием пользователю предоставляется только одна возможность — установить критические уровни. Поскольку при различных критических уровнях результаты могут получиться также различные, пользователь может неограниченное число раз запускать программу для обработки по комплексному критерию. Следовательно, предоставляется возможность подобрать те критические уровни, при которых результат будет наилучшим. Необходимость подбора критических уровней связана с тем, что при разных исходных данных, а также при различных размерах пространственно-временного окна для одинаковых исходных данных получа-

Рис. 5.17. Схема работы программы на этапе обработки данных по комплексу прогностических критериев.

ются различные результаты, т. е. критические уровни могут сильно различаться.

На данном этапе обработки базы данных будут получены расчетные значения вероятности появления сильного сейсмического события, а также других характеристик для карты условных вероятностей возникновения сильных сейсмических событий, полученной на этапе 1.

#### Прогноз сейсмичности по комплексному критерию

Расчет общей вероятности возникновения сильного сейсмического события (ССС) по комплексу прогностических признаков проводится двумя способами: по формуле Байеса и по средним значениям.

С помощью разработанной программной системы MIEPS рассматривалась база данных сейсмических событий за 2006—2007 гг., зарегистрированных подсистемой Кировского рудника. База включает в себя события со значением энергии до  $10^8$  Дж. Сейсмические события в базе данных разбиваются на две группы: прогнозируемые сейсмические события с энергией от  $10^6$  до  $10^8$  Дж, а также сейсмические события с энергией от  $10^3$  до  $10^5$  Дж, на основании анализа которых осуществляется прогноз. Анализ проводился ретроспективно с целью выявления зон повышенной вероятности возникновения различных ССС, в том числе и для события, зарегистрированного 14 мая 2007 г. (время 7 : 13 : 19;  $E = 2 \cdot 10^6$  Дж).

Рассматривалась база данных по состоянию на 13 мая 2007 г. (за один день до проявления ССС) для различных периодов наблюдения: с 1 апреля 2006 г. и с 1 октября 2006 г. При осуществлении прогноза были проанализированы различные пространственные области площадью от 160000 до 400000 м<sup>2</sup>, включающие область возникновения прогнозируемого ССС. Прогноз осуществлялся посредством событийного и временного окна.

На рис. 5.18 (см. вклейку) представлено распределение сейсмических событий в пространстве для анализируемого периода, где в зоне контроля выделено прогнозируемое ССС. За радиус окружности нами принимается длина трещины  $L$ . Поскольку на данный момент нам известны координаты очага сейсмического события и его энергия (а вместе с ней и длина трещины), но неизвестно направление трещины, то мы исходили из того, что направление трещины может быть любым от местоположения очага события, т. е. максимальная область вероятного разрыва — это окружность радиусом  $L$ .

Всего в данной пространственно-временной области произошло 30 ССС, из них 24 события — до 1 октября 2006 г. Вблизи местоположения очага прогнозируемого ССС проявилось много ССС, причем 14 из них — за достаточно короткий промежуток времени 10 июля — 28 августа 2006 г.

В табл. 5.7—5.9 представлены результаты расчетов прогноза единичного ССС по комплексу критериев для максимального пространственно-временного окна.

Полученные значения практически всех статистических параметров для каждого из подходов по сравнению с предыдущими рассмотренными результатами улучшились, но, также являются неудовлетворительными.

Рассчитанные значения времен ожидания и вероятностей возникновения ССС как для первого, так и для второго подхода являются неудовлетворительными.

Таблица 5.7

Результаты комплексного прогноза ССС для пространственной области площадью 400000 м<sup>2</sup>

Параметр прогноза	Результаты прогноза	
	по формуле Байеса	по средним значениям
Критический уровень	0,92	0,56
Среднее время ожидания, дни	35,00	26,00
Среднеквадратическая ошибка, дни	35,25	27,67
Вероятность того, что событие произойдет	0,18	0,21
Эффективность по времени	0,59	1,90
Эффективность по площади	1,77	2,82

Таблица 5.8

Результаты комплексного прогноза ССС для пространственной области площадью 320000 м<sup>2</sup>

Параметр прогноза	Результаты прогноза	
	по формуле Байеса	по средним значениям
Критический уровень	0,996	0,56
Среднее время ожидания, дни	27,00	26,00
Среднеквадратическая ошибка, дни	27,11	27,67
Вероятность того, что событие произойдет	0,24	0,26
Эффективность по времени	1,44	1,78
Эффективность по площади	2,95	3,32

Таблица 5.9

Результаты комплексного прогноза ССС для пространственной области площадью 160000 м<sup>2</sup>

Параметр прогноза	Результаты прогноза	
	по формуле Байеса	по средним значениям
Критический уровень	0,95	0,4
Среднее время ожидания, дни	7,00	6,00
Среднеквадратическая ошибка, дни	11,59	6,55
Вероятность того, что событие произойдет	0,53	0,73
Эффективность по времени	1,48	3,66
Эффективность по площади	32,38	101,44

Значения времен ожидания, так же как и значения вероятностей проявления ССС, приблизились к требуемым. Значения эффективности прогноза по времени остаются достаточно низкими, однако, если рассматривать статистические данные, имеющиеся на настоящий момент, такие значения можно считать приемлемыми. Значения эффективности прогноза по площади являются очень высокими при расчетах с использованием второго подхода.

Таким образом, с уменьшением рассматриваемой пространственной области значительно улучшаются результаты прогноза ССС. Возможно, что такие резкие

различия значений статистических параметров связаны с тем, что рассматриваемая пространственная область содержит как участки с повышенным уровнем микросейсмичности, так и «пустые» участки, в которых либо не зарегистрировано сейсмических событий, либо их было крайне мало. Поскольку наличие таких «пустых» ячеек пропорционально размерам пространственной области, то чем меньше площадь рассматриваемой пространственной области, тем лучше будут результаты прогноза.

На рис. 5.19 (см. вклейку) представлена максимальная по площади пространственная область, ограниченная зоной уверенной регистрации сейсмических событий АСКСМ, на которой выделена минимальная расчетная область. Результаты прогноза для обеих областей рассмотрены выше.

Вполне вероятно, что одиночные события невысокого энергетического диапазона незначительно влияют на группы событий в пространственной области и на напряженное состояние массива в целом. Учет таких одиночных событий при прогнозировании ухудшает результаты прогноза. Таким образом, в рамках повышения качества прогноза, необходимо рассмотреть вопрос о целесообразности применения кластерного анализа для исключения микросейсмических событий из анализируемой базы.

Следует также отметить, что если для краткосрочного прогноза полученные результаты, в основном, являются неприемлемыми, то для среднесрочного прогноза результаты почти всегда приемлемы, как, например, для Кировской подсистемы АСКСМ (табл. 5.10).

Итак, результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. При минимально возможных размерах пространственного окна результаты прогноза являются наилучшими.
2. Проведение кластерного анализа для сейсмических событий позволит более детально дифференцировать события по местоположению, что, возможно, приведет к увеличению значения вероятности проявления и уменьшению значения среднего времени ожидания ССС.
3. Увеличение числа используемых критериев позволит более детально дифференцировать контролируемую область по вероятностям возникновения мощных сейсмических событий. Для совершенствования методики с целью повышения

Таблица 5.10

Результаты среднесрочного комплексного прогноза ССС для Кировской подсистемы

Параметр прогноза	Результаты прогноза	
	по формуле Байеса	по средним значениям
Критический уровень	0,92	0,40
Среднее время ожидания, дни	19,00	17,00
Среднеквадратическая ошибка, дни	25,13	25,65
Вероятность того, что событие произойдет	0,92	0,83
Эффективность по времени	1,88	1,56
Эффективность по площади	25,63	26,04

точности прогноза и локализации сейсмически опасных участков планируются к рассмотрению следующие прогностические критерии:

плотность распределения энергии;

вариации временных интервалов между сейсмическими событиями.

Следует особенно отметить, что использование критерия вариации временных интервалов между сейсмическими событиями может повысить надежность прогноза, так как этот критерий отражает временные характеристики потока микро-сейсмических событий в процессе подготовки мощного сейсмического явления, а уже используемые нами критерии отражают пространственные характеристики.

Значительную разницу в результатах для двух периодов наблюдений 01.04.2006—13.05.2007 и 01.10.2006—13.05.2007 можно объяснить большим количеством ССС, произошедших до 01.10.2006, в особенности 14 ССС в июле—августе 2006 г. Эти события предварялись малым количеством слабых сейсмических событий (с энергией, на два-три порядка меньшей, чем энергия ССС), что отрицательно сказалось на результатах прогноза. В настоящее время нами исключаются из рассмотрения ССС, которые произошли в течение 72 ч после проявления первого ССС, т. е. мы их считаем афтершоками. Возможно, необходимо также наложить запрет на объявление тревоги в начале релаксационной последовательности сейсмических событий, вызванных ССС.

В динамике параметров сейсмичности на Кукисвумчоррском крыле ОКР ОАО «Апатит» по месяцам за анализируемый период (рис. 5.20) наблюдаются четыре пика максимальных значений суммарной энергии зарегистрированных событий (ноябре, марте, мае и самый большой в июле). При этом значения количества событий и суммарной длины трещин на протяжении всего рассматриваемого периода изменялись незначительно с увеличением в апреле (это соответствует одному из минимальных значений суммарной энергии зарегистрированных событий, которое, вероятно, обусловлено началом процесса интенсивного снеготаяния), и в июле, когда регистрировались более энергоёмкие события при уменьшении их общего числа (что обусловлено, вероятно, процессом формирования магистрального разрыва).

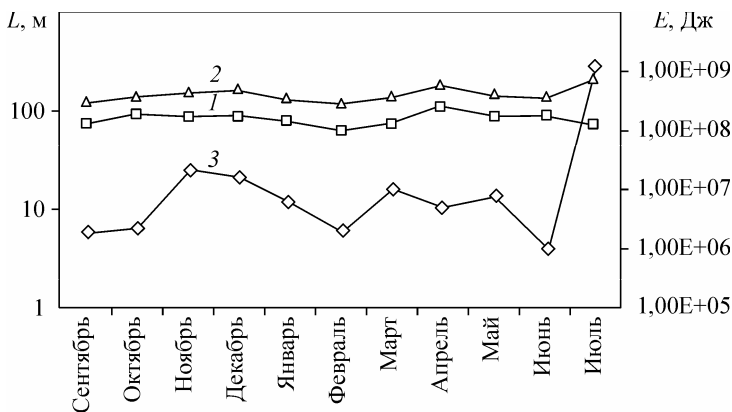


Рис. 5.20. Сейсмичность на Кукисвумчоррском крыле Объединенного Кировского рудника.

Усл. обозн. см. рис. 5.12.

Таким образом, на настоящее время Горным институтом КНЦ РАН спроектирована, разработана, используется и находится в процессе совершенствования программная система MIEPS, которая применяется для прогнозирования техногенных землетрясений в Хибинском массиве и позволяет осуществлять прогноз критических состояний участков массивов пород посредством одновременного анализа ряда прогностических критериев.

В основу комплексного прогноза критических состояний участков массивов пород положен принцип выделения пространственно-временных областей повышенной вероятности ожидания опасных состояний по совокупности единичных контролируемых параметров. При этом все прогностические параметры представлены в виде пространственно-временных распределений аномальных отклонений от долговременного или фонового уровня каждого параметра.

#### **5.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И МИГРАЦИИ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ЗОН ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ**

Исследования по вопросам организации и проведения геодинамического мониторинга состояния массива пород при разработке месторождений полезных ископаемых применительно к условиям горных предприятий Кольского полуострова и, в первую очередь, Хибинских апатитонепелиновых рудников ОАО «Апатит», выполняются Горным институтом КНЦ РАН с 1991 г. Постоянные наблюдения организованы на полигонах Кировского и Центрального рудников ОАО «Апатит», а также на руднике Железный ОАО «Ковдорский ГОК». Конечной целью этих исследований является выявление энергонасыщенных зон массива пород, мониторинг их изменения в пространстве и времени, оценка степени критичности состояния массива по комплексу признаков и на этой основе прогнозирование геомеханической ситуации в контролируемых участках геологической среды.

##### **5.4.1. Общее состояние изученности и современные представления о характерных особенностях и геомеханическом состоянии массива горных пород как среды функционирования горно-рудных предприятий**

Для достижения указанной цели на геодинамических полигонах выполняются длительные наблюдения геодезическими методами [51, 52]. Основные из них — методы высокоточного нивелирования и лазерной светодальнометрии, дополнительные, в стадии освоения, — методы спутниковой геодезии.

По современным представлениям, любой реальный массив горных пород представляет собой сложную, иерархически блочную среду, каждой структурной единице которой присущи свои деформационные характеристики. Степень изученности общих закономерностей деформирования и разрушения подобных сред еще недостаточна. Однако определенная ясность в этих вопросах уже есть, благодаря последним результатам исследований, полученным в связи с организацией и анализом длительных наблюдений за состоянием различных ответственных со-

оружений. Кроме того, последний период времени характеризуется интенсивным развитием новых методов контроля состояния массива, к которым, в первую очередь, следует отнести физические методы измерения расстояний и методы спутниковой геодезии, имеющие существенные преимущества перед традиционными методами и вследствие этого позволившие уже на данном этапе получать качественно новую информацию.

В целом современные представления о геомеханическом состоянии и основных закономерностях деформирования и разрушения иерархически-блочных массивов горных пород сводятся к следующему:

1. Для массивов горных пород в пределах верхней мантии и земной коры характерна общая схема иерархически-блочного строения, которую можно проследить от планетарных структур типа литосферных плит, континентов и рифтов до микроструктур на уровне отдельных минеральных зерен и кристаллов. Это позволяет представлять схему строения массива пород в виде вложенных друг в друга структурных блоков, ограниченных структурными неоднородностями различных порядков и имеющих различные поперечные размеры — от тысяч километров до долей миллиметров. В свою очередь общая схема иерархически-блочного строения массивов горных пород предопределяет возможность с единых позиций подходить к вопросам поведения и состояния различных объемов массивов горных пород.

2. Массивы горных пород отличаются наличием начального (естественного) напряженного состояния, обусловленного действием, главным образом, двух считающихся независимыми полей напряжений. Одно из них обусловлено действием гравитационных сил, оно повсеместно; другое обусловлено действием условно называемых «тектонических» сил и характерно ориентировочно для 60 % скальных массивов и 20 % массивов, сложенных осадочными породами.

3. На начальное напряженное состояние массивов накладываются различные воздействия, обусловленные как естественными причинами, так и результатами деятельности человека, в частном случае, строительством и эксплуатацией каких-либо сооружений или разработкой месторождений полезных ископаемых. В результате наложения указанных полей в массиве пород создается сложное неравномерное в пространстве и во времени результирующее поле напряжений, которое на отдельных участках реализуется в виде деформаций, разрушений и перемещений элементов общей системы массива пород.

4. Неоднородность результирующих полей напряжений взаимосвязана с неоднородностью (иерархичностью) структуры и свойств массива пород, и это определяет особенности деформирования и разрушения пород.

В первую очередь, это касается представлений о массиве горных пород как об изменяющейся динамической системе, в которой постоянно идут процессы изменения ее состояния: во-первых, в результате переупаковки структурных блоков, во-вторых, их деформирования и разрушения.

Об этом, в частности, свидетельствуют параметры сейсмической активности того или иного уровня, которые, по-видимому, отражают, главным образом, именно первый процесс — переупаковку структурных блоков.

5. Явления деформирования и разрушения в массивах пород носят пространственно дискретный характер. Внутренние части блоков деформируются сравни-

тельно однородно, в то время как на их границах наблюдаются концентрации деформаций. При этом, в зависимости от вида, мощности и области воздействий, процессы деформирования и разрушения проявляются на различных уровнях структурных неоднородностей массива и охватывают различные объемы массива.

Конкретный структурный уровень неоднородностей массива (уровень эффективных структурных неоднородностей), на котором, в первую очередь, возникают наиболее опасные для рассматриваемых объемов массива явления разрушения, определяется соотношением размеров области воздействия и размеров структурных блоков. Например, для стандартных капитальных горных выработок при типичных условиях их эксплуатации размеры области воздействия (т. е. области изменения естественного поля напряжений массива пород) составляют первые десятки метров. При этом разрушения наблюдаются, главным образом, на границах структурных блоков с поперечными размерами на порядок меньше размеров области воздействия, т. е. по контактам естественной крупноблоковой трещиноватости, образующей структурные блоки с поперечными размерами в первые единицы метров.

б. Пространственная дискретность развития процессов деформирования и разрушения массивов пород дополняется дискретностью развития их во времени. Сейчас установлено, что структурные неоднородности всех рангов и типов проявляют подвижность, которая носит направленный, достаточно постоянный (трендовый) характер и в то же время сопровождается существенными колебаниями. При этом указанные динамические движения могут иметь широкие диапазоны амплитуд и периодов.

Отмеченные общие закономерности деформирования и разрушения иерархически-блочных сред в полной мере справедливы для массива пород хибинских апатит-нефелиновых месторождений, типичного представителя скальных высокопрочных и высоконапряженных массивов. В соответствии с этими общими закономерностями выполнялись все работы по организации и выполнению геодезических измерений на специально оборудованных полигонах в подземных выработках и карьерах ОАО «Апатит».

К настоящему времени имеется информация по результатам наблюдений на отдельных полигонах более чем за 15-летний период, и это позволяет делать определенные выводы о закономерностях развития геомеханических процессов в массивах пород в конкретной горно-технической ситуации рудников ОАО «Апатит».

#### **5.4.2. Результаты геодезических измерений на полигонах рудников ОАО «Апатит»**

**Объединенный Кировский рудник.** В массиве пород, разрабатываемом Объединенным Кировским рудником, геодезические полигоны были оборудованы в подземных выработках гор. +252 и + 172 м и на поверхности в Саамском карьере для контроля напряженно-деформированного состояния массива пород в районе крупной тектонической структуры — Саамского разлома (рис. 5.21, см. вклейку).

Саамский разлом представляет собой зону шпреуштейнизированных пород, залегающую практически вертикально вкрест простирания рудного тела. Зона заполнена окисленными породами, имеющими малую прочность по сравнению с породами массива. Мощность зоны на разных участках колеблется от 1 до 136 м.



На гор. +252 м в 1990 г. был заложен нивелирный полигон из 47 пунктов (сейчас доступны 38 реперов), и в 1991 г. начаты регулярные прецизионные наблюдения методом повторных нивелирований, соответствующие наблюдениям на государственных сетях II класса. К настоящему времени выполнено 54 цикла наблюдений с частотой от 14 до 393 дней. При этом, поскольку, в соответствии с общими закономерностями деформирования блочных сред, наибольший интерес представляют перемещения вблизи контактов структурных блоков, часть наблюдений выполнялась по сокращенной программе — только на участках пересечения полигонами Саамского разлома.

Нивелирные наблюдения обеспечивают измерение перемещений только в одном направлении, для получения более полной картины изменения напряженно-деформированного состояния контролируемого массива пород нивелирные полигоны в подземных выработках в 1995 г. были дополнены измерительным светодальномерным полигоном из пяти пунктов в Саамском карьере.

В качестве основного метода наблюдений на поверхности был принят метод светодальномерной дальнометрии, при котором в пространственной сети пунктов периодически измеряются расстояния между пунктами. К 2000 г. один пункт вышел из строя, и ежегодные измерения до 2003 г. выполнялись по оставшимся четырём пунктам. В 2003 г. был выполнен последний 6-й цикл измерений, при доступных трех пунктах. Всего выполнено семь режимных циклов (1 раз в год), включая базисный и два внеочередных цикла. С 2004 г. измерения прекращены, так как в карьере нет доступа.

В 2003 г. на гор. +252 м непосредственно в районе Саамского разлома был заложен подземный светодальномерный полигон из семи пунктов. Выбор места заложения полигона определен по результатам нивелирных наблюдений на участке самого активного деформирования массива пород. К настоящему времени проведены 15 серий наблюдений.

В 1998 г. были начаты наблюдения на нивелирном полигоне гор. +172 м по 39 пунктам. Полигон пересекает по меньшей мере три блочные структуры, включая Саамский разлом, разделенные геологическими нарушениями с различными элементами залегания. Кроме того, на гор. +172 м удалось зафиксировать состояние массива до начала массовой отработки блоков (2001 г.). К настоящему времени выполнено 33 цикла измерений.

Современная конфигурация наблюдаемых полигонов Кировского рудника в районе Саамского разлома приведена на рис. 5.22.

Обработка наблюдений нивелирных измерений заключалась в вычислении превышений реперов, которые затем обрабатывались с помощью электронных таблиц. Это позволяло выполнять весь комплекс камеральной обработки на компьютере и представлять результаты в виде ведомостей относительных отметок и графиков относительных смещений реперов или их производных, например, скоростей смещений реперов по всему полигону в целом или для любого отдельно взятого репера на любой момент времени.

Проведенные на полигонах работы показали принципиальную возможность контроля состояния массива пород указанными геодезическими методами, позволили установить рациональную область их применения, отработать методику наблюдений и обработки результатов, оценить предельные погрешнос-

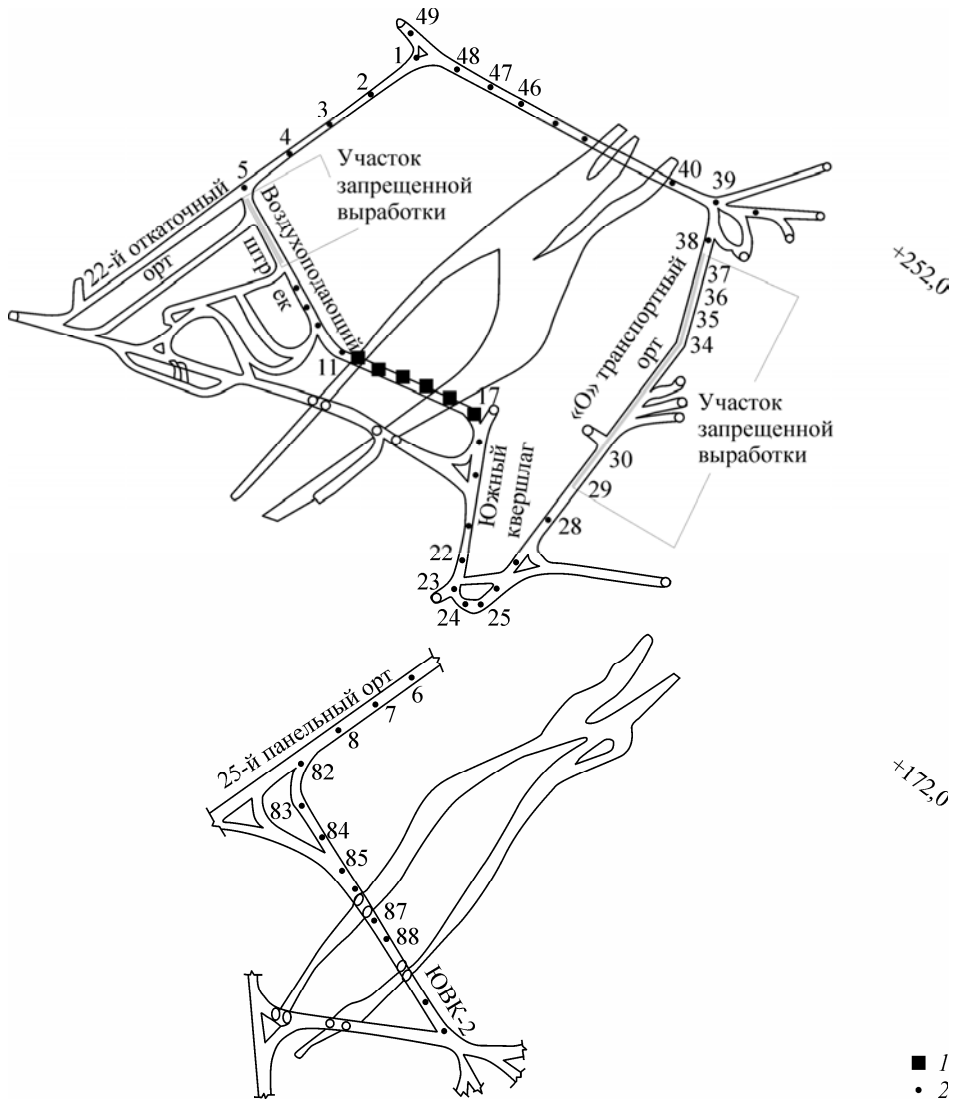


Рис. 5.22. Схема наблюдаемых подземных нивелирных и дальномерного полигонов в районе Саамского разлома.

1 — пункты дальномерного полигона на гор. +252 м; 2 — пункты подземных нивелирных полигонов.

ти измерений (для линейных смещений  $\delta = \pm 0,50$  мм; для вертикальных  $m = \pm 0,34$  мм).

Из графиков смещений реперов на полигоне гор.+252 м, зафиксированных за весь период наблюдений, начиная с 1991 г. (рис. 5.23, см. вклейку), следует, что вблизи Саамского разлома практически с самого начала наблюдений и до настоящего времени регистрируются поднятия реперов, которые тем больше, чем ближе репер находится к разлому. При этом величины смещений максимальны для репер-

ров 8—22 (см. рис. 5.23, *a*) и несколько меньше для реперов 39—46 (см. рис. 5.23, *б*), что, возможно, объясняется связью между величинами смещений и мощностью разлома в месте пересечения его полигоном.

По результатам наблюдений для наиболее активных реперов полигона гор. +252 м (рис. 5.24, см. вклейку) впервые удалось определить кинематические параметры Саамского разлома, в частности, скорости смещений (поднятий) материала-заполнения, которые оказались весьма стабильными и равными соответственно для восточной и западной ветвей полигона (0,04 и 0,06 мм/мес., или 0,48 и 0,72 мм/год). При этом необходимо особо подчеркнуть, что эти скорости являются относительными и характеризуют поднятия материала-заполнения разлома относительно вмещающих пород.

Вместе с тем, можно выделить и проанализировать техногенные и природные факторы, которые в той или иной степени могут определять параметры зафиксированных поднятий.

Прежде всего, необходимо принять во внимание, что, как следует из рис. 5.21, полигоны находятся в зоне влияния Саамского карьера, его наличие изменило напряженное состояние окружающего массива пород и, возможно, вызвало разгрузку массива непосредственно в районе Саамского разлома и полигонов. В свою очередь, разгрузка массива от напряжений могла обусловить эффекты поднятия ядра разлома и реперов, заложенных в нем.

При этом простой механизм выдавливания материала-заполнителя разлома не в полной мере подтверждается незначительными подвижками пород в поперечном направлении по отношению к разлому, что следует из данных подземных светодальномерных измерений на гор. +252 м (табл. 5.11).

Возможно, определенное влияние на интенсивность поднятий оказывает и отработка блоков на гор. +252 м и в меньшей степени — на гор. +172 м.

Остаются лишь природные причины и, в первую очередь, феномены общей тектонической напряженности массива пород, которая, как известно, весьма велика и повсеместно обнаруживается в виде специфических проявлений горного давления, сейсмической активности и удароопасности на всех рудниках ОАО «Апатит». Этот вывод подтверждается также и фактом зафиксированных поднятий на гор. +172 м, на котором и ниже которого горные работы пока развиты в незначительной степени.

Нельзя исключить и усиление тектонических процессов техногенными, в результате чего наблюдается постепенное увеличение скоростей поднятий ядра разлома по мере приближения к поверхности.

Во всяком случае, к настоящему времени совершенно ясно, что пока подобные поднятия не фиксировались в массиве апатит-нефелиновых рудников, а потому наблюдения необходимо продолжать, развивая и дополняя полученную информацию путем организации измерительных полигонов на аналогичных структурах по мере вскрытия их подземными горными выработками.

Анализируя графики смещений, можно видеть, что на фоне общих тенденций поднятий реперов в контролируемой области массива пород наблюдаются знакопеременные флуктуации смещений, которые намного превышают погрешности измерений. Еще более резко это можно проследить по графикам скоростей, например, графика изменения скоростей смещений наиболее активного репера 15 (гор. +252 м) в течение всего периода наблюдений (рис. 5.25, см. вклейку).

Таблица 5.11

Результаты светодальномерных измерений на гор. +252 м Кировского рудника ОАО «Апатит»

Дата	Номер цикла	Название линии									
		Rp 17 – Rp 16		Rp 17 – Rp 15		Rp 17 – Rp 14		Rp 17 – Rp 13		Rp 17 – Rp 12	
		S, м	Δ, мм	S, м	Δ, мм	S, м	Δ, мм	S, м	Δ, мм	S, м	Δ, мм
05.12.02		23,8746	0,00	47,7436	0,00	71,7020	0,00	95,5998	0,00	–	–
03.04.03	1	23,8755	0,83	47,7446	1,06	71,7027	0,69	95,6006	0,79	119,6076	0,00
23.05.03	2	23,8746	0,00	47,7439	0,35	71,7024	0,37	95,6000	0,20	119,6077	0,13
14.10.04	3	23,8745	–0,09	47,7450	1,46	71,7024	0,44	95,6007	0,83		
02.11.04	4	23,8748	0,15	47,7443	0,77	71,7026	0,67	95,6008	0,97		
17.02.05	5	23,8745	–0,16	47,7444	0,88	71,7024	0,42	95,6010	1,21		
17.03.05	6	23,8744	–0,19	47,7447	1,13	71,7025	0,54	95,6013	1,42		
14.04.05	7	23,8745	–0,17	47,7447	1,10	71,7025	0,54	95,6012	1,40		
17.06.05	8	23,8744	–0,21	47,7447	1,19	71,7025	0,48	95,6014	1,53	Нет видимости	
24.08.05	9	23,8744	–0,22	47,7444	0,81	71,7025	0,49	95,6010	1,19		
16.09.05	10	23,8744	–0,25	47,7447	1,10	71,7026	0,64	95,6013	1,46		
18.10.05	11	23,8748	0,19	47,7443	0,79	71,7028	0,86				
31.01.06	12	23,8745	–0,17	47,7443	0,74	71,7025	0,50	95,6009	1,03		
24.04.06	13	23,8747	0,03	47,7444	0,85	71,7029	0,89	95,6012	1,35	119,6087	1,13
27.06.06	14	23,8747	0,09	47,7444	0,88	71,7028	0,83	95,6014	1,58	119,6087	1,15

Примечание. S — расстояние между реперами; Δ — изменение расстояний.

Отмеченный знакопеременный характер колебаний смещений реперов (см. рис. 5.23—5.25) соответствует общим представлениям о закономерностях деформирования блочных структур. Вместе с тем, вне зависимости от знака перемещений (или скоростей перемещений) можно оценить изменения некоторого общего параметра состояния всей системы, отдаленно напоминающего общую энергию деформирования контролируемого участка массива, и по этим результатам в некоторой степени судить об изменении степени напряженности массива пород. С этой целью в каждом цикле для всех реперов вычислялись скорости смещений и определялась общая сумма их квадратов.

На рис. 5.26 (см. вклейку) приведены данные, иллюстрирующие изменение сумм квадратов скоростей смещений реперов нивелирного полигона от цикла к циклу. Наблюдаются достаточно резкие различия в характеристиках указанного ранее состояния наблюдаемого объема массива при общей тенденции к возрастанию. При этом спад значений параметра может свидетельствовать об аккумуляции энергии в контролируемом объеме массива. Может ли это привести к выделению накопленной энергии в виде динамических событий или это будет происходить в виде увеличения амплитуд смещений реперов, пока сказать трудно, так как после резкого спада энергии деформирования был зафиксирован только один случай сильного динамического события (11.05.2003 г. — техногенное землетрясение с магнитудой 3,2). По-видимому, дальнейшее накопление результатов наблюдений позволит как-то ответить на поставленный вопрос.

**Центральный рудник.** Объектом наблюдений в карьере рудника «Центральный» является крупный разлом (А—А) (рис. 5.27, см. вклейку), в пределах западного фланга карьера, вблизи которого осуществлялись крупномасштабные работы по перемещению пород в отвал и одновременно проводятся горные работы открытым и подземным способами в пределах стыковочной зоны между Расвумчоррским и Центральным рудниками.

На территории Центрального рудника в 1999 г. был заложен светодальномерный полигон, который к настоящему времени состоит из семи фундаментальных пунктов, три из которых располагаются по одну сторону наблюдаемого разлома (А—А), а четыре — по другую, т. е. в соседнем структурном блоке (см. рис. 5.27).

Кроме основной задачи определения степени подвижности структурных блоков по обе стороны от разлома А—А решались и практические задачи оценки устойчивости северо-западного борта карьера рудника «Центральный» при его подработке подземными работами Расвумчоррского рудника. С этой целью светодальномерные наблюдения выполнялись и на рабочих реперах на берме гор. + 880 м (восемь реперов и два репера дополнительно заложены в 2000 г.), а также на берме гор. + 850 м (пять реперов, заложённых в 2001 г.).

В ноябре 2002 г. был проведен массовый взрыв с целью сбойки подземных выработок с бортом карьера. Наблюдения по фундаментальным реперам и оставшимся после взрыва рабочим реперам продолжаются до настоящего времени. Всего проведено десять серий наблюдений, включая базисную. Наблюдения выполнялись с периодичностью 2 раза в год в течение 1999—2002 гг. и 1 раз в год после массового взрыва.

Анализ результатов измерений расстояний между фундаментальными реперами показал, что в целом наблюдается тенденция общего сжатия массива пород в направлении, нормальном разлому А—А (расстояния I—II, I—IV, I—III, II—IV, Смотровая—III, Смотровая—IIIа и Смотровая—IV устойчиво уменьшаются из цикла в цикл). Это направление совпадает с направлением действия максимальных тектонических напряжений естественного поля напряжений.

Вместе с тем на фоне этого процесса общего сжатия отчетливо фиксировался, вплоть до массового взрыва, процесс сдвижения пород, охватывающий значительную область массива, включающую не только рабочие реперы, но и, возможно, фундаментальный репер IV (об этом свидетельствует увеличение расстояния III—IV). Поскольку расстояние от рабочих реперов до репера IV составляет 300 м, область сдвижения простирается, по крайней мере, на 500 м к северу от нижнего контура карьера. На северо-западе область сдвижения пород, скорее всего, ограничивается поверхностью разлома А—А.

### **5.4.3. Результаты и анализ перспектив применения методов спутниковой геодезии для целей геомеханического мониторинга массива пород в условиях рудников ОАО «Апатит»**

Вследствие недостаточности публикаций о применении методов спутниковой геодезии для целей геодинамического мониторинга на малых и средних базах в условиях скальных массивов Горным институтом КНЦ РАН совместно со специа-

листами Института физики Земли РАН (г. Москва) были проведены пробные измерения с использованием GPS-технологий. Основными целями этих работ являлись оценка возможности работы аппаратуры и получение данных о реальной точности измерений в условиях высоких широт, характеризующихся активным состоянием ионосферы и при невыгодной конфигурации созвездий, особенно в условиях карьеров с ограниченным обзором небесного свода.

Кроме этого, весьма интересным представлялось сопоставление результатов GPS-измерений с прямыми высокоточными светодальномерными измерениями с помощью лазерного светодальномера «Мекометр-5000» на одних и тех же пунктах. При постановке измерений учитывалось, что принципиально для решения задач мониторинга, кроме обеспечения достаточной точности определяемых параметров (смещений пунктов), весьма существенно обеспечение стабильного уровня погрешностей измерений, сохраняемого от цикла к циклу. Вследствие этого, при измерениях стремились получить максимально высокую точность, и работы выполняли по методике относительных измерений.

В 2001—2005 гг. были выполнены несколько циклов измерений на пунктах, располагающихся в окрестности г. Апатиты, часть из этих пунктов располагалась вне зоны влияния горных разработок, а часть — была подвержена техногенным деформациям от воздействия горных работ. Конструкции большинства пунктов предполагали принудительное центрирование как антенн GPS-приемников, так и светодальномера с отражателями.

Кроме того, на крыше здания Горного института КИЦ РАН, т. е. вне зоны ведения горных работ, был оборудован стационарный пункт для установки приемника, работавшего непрерывно в течение всех периодов проведения измерений на пунктах геодинимических сетей. С октября 2005 г. стационарный пункт переведен в режим непрерывно действующей базовой станции (рис. 5.28, см. вклейку) с круглосуточной записью в компьютере данных для постобработки с интервалом в 30 с. Комплект аппаратуры, использованной для базовой станции, состоит из приемника JNS Lexon-GGD и антенны JNS Chock Ring CR3\_GGD, разработанных и произведенных фирмой Javad Navigation System.

Приемник Lexon-GGD расположен в одном из внутренних помещений Горного института, постоянно подключен к компьютеру. Кабель, соединяющий приемник и антенну, может быть до 30 м длиной. Если требуется большее расстояние, необходимо устанавливать по одному линейному усилителю на каждые дополнительные 30 м. Сигналы спутников обрабатываются приемником и сохраняются на жестком диске компьютера. Сохраненные данные доступны через локальную сеть института любому авторизованному пользователю.

Измерения проводились с помощью аппаратуры фирмы Trimble и Javad.

Обработка результатов GPS-измерений проводилась с помощью программных пакетов GAMIT/GLOBK (в 2001—2004 гг.), TGO и Pinnacle (в 2005 г.).

В результате вычислялись координаты измеряемых пунктов и среднеквадратические погрешности в различных системах координат: WGS 84 (широта и долгота в градусной мере, высота в метрах); системе криволинейных координат ( $N$ ,  $E$  — соответственно длины дуг меридианов до экватора и параллелей до нулевого меридиана в метрах,  $H$  — эллипсоидная высота в метрах); ITRF 2000 ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , где  $Z$  — по оси вращения Земли, в метрах).

В качестве примера в табл. 5.12 приведены результаты определения координат отдельных пунктов деформационного мониторинга в системе геоцентрических прямоугольных координат ITRF 2000 по данным GPS-измерений 2000—2005 гг. Как следует из данных таблицы, величины среднеквадратических погрешностей  $\sigma_i$  ( $i = x, y, z$ ) определения координат пунктов, не испытывающих влияния горных работ, по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  колеблются в пределах соответственно  $\pm 2,7 \div \pm 3,4$ ,  $\pm 2,0 \div \pm 2,7$  и  $\pm 4,7 \div \pm 7,1$  мм. Для пунктов, расположенных в зонах влияния горных работ, диапазон колебаний среднеквадратических погрешностей по указанным осям несколько больше и составляет соответственно  $\pm 2,7 \div \pm 7,2$ ,  $\pm 2,1 \div \pm 6,8$  и  $\pm 5,1 \div \pm 15,3$  мм. При этом обращает на себя внимание резкое увеличение погрешностей определения координат по оси  $Z$ , что, вообще говоря, свойственно GPS-измерениям. Также вполне объяснимо и возрастание погрешностей для пунктов в зонах влияния горных работ, что подтверждает принципиальную возможность применения GPS-методов для целей геомеханического мониторинга.

Представляет интерес сопоставление результатов определения длин базовых линий на основе GPS-измерений с результатами прямых светодальномерных измерений (табл. 5.13). Расхождения между ними колеблются от  $+0,2$  до  $-21,3$  мм. При этом отклонения в основном имеют знак минус, т. е. результаты светодальномерных измерений, как правило, больше.

Анализируя указанные расхождения, следует отметить, что все пункты, расстояния между которыми сравнивались, находятся в активной области сдвижения пород. Временной интервал между светодальномерными и GPS-измерениями составил 1,5 мес., естественно, что это могло внести некоторую погрешность. Кроме того, результаты определения длин по данным GPS-измерений в существенной степени зависят от применяемого программного обеспечения, и эти моменты еще не до конца исследованы.

Однако, несмотря на это, все приведенные данные свидетельствуют о принципиальной возможности применения GPS-измерений для целей геомеханического мониторинга состояния массива при обеспечении миллиметровой точности. Вместе с тем методики проведения GPS-измерений и обработки результатов измерений нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Все изложенное позволяет сформулировать предварительные выводы и наметить следующие направления дальнейшего совершенствования методики проведения GPS-измерений и обработки получаемых результатов:

1. Проведенные измерения показали принципиальную возможность применения GPS-методов для целей деформационного мониторинга. В нашем случае, несмотря на высокие географические широты расположения горных предприятий Кольского полуострова и весьма стесненные условия карьеров, в поле видимости находилось от пяти до девяти спутников. Преимуществами методов являются всепогодность, независимость от времени суток, необязательность прямой видимости между пунктами наблюдаемой сети, полная автоматизация полевых измерений и обработки результатов, небольшие трудоемкость и потребность в людских ресурсах. Недостатки — высокая стоимость аппаратуры и необходимость дальнейшего совершенствования методики измерений для повышения точности получаемых результатов.

Таблица 5.12

Результаты GPS-определений координат пунктов деформационного мониторинга в системе ITRF 2000

Год	$X_i$ , м	$\sigma_{x_i}$ , мм	$Y_i$ , м	$\sigma_{y_i}$ , мм	$Z_i$ , м	$\sigma_{z_i}$ , мм	$\Delta x_i$ , мм	$\Delta y_i$ , мм	$\Delta z_i$ , мм
<b>Пункты GPS вне зоны влияния горных работ</b>									
Горный институт, GOIN									
2001	7,6147	2,7	2,5395	2,0	9,6163	4,9			
2002	7,5809	2,8	2,5445	2,1	9,6281	5,0	+33,8	-5,0	-11,8
2003	7,5786	3,1	2,5436	2,2	9,6094	5,6	+36,1	-4,1	+6,9
2004	7,5578	2,7	2,5550	2,0	9,6197	4,7	+56,9	-15,5	-3,4
2005	7,5785	-	2,5444	-	9,6101	-	+3,62	-4,9	+6,2
Имандра, IMAN									
2001	9,1111	3,4	5,7812	2,7	3,5574	7,1			
2002	9,0694	2,9	5,7847	2,2	3,5657	5,3	+41,7	-3,5	-8,3
2003	9,0406	3,1	5,7643	2,3	3,4627	5,6	+70,5	+16,9	+94,7
2004	9,0523	2,7	5,7975	2,0	3,5719	4,7	+58,8	-16,3	-14,5
2005	9,1300		5,8274		3,7420		-18,9	-46,2	-184,6
<b>Пункты GPS в зоне влияния горных работ</b>									
Центральный рудник. Смотровая, CENS									
2000	6,5632	3,8	7,1726	3,4	6,8962	8,6			
2001	6,5367	3,0	7,1654	2,2	6,8240	6,1	+26,5	+7,2	+72,2
2002	6,5373	3,2	7,1920	2,6	6,9084	6,5	+25,9	-19,4	-12,2
2003	6,5298	3,2	7,1921	2,3	6,8587	6,0	+33,4	-19,5	+37,5
2004	6,5129	2,7	7,2013	2,1	6,9109	5,1	+50,3	-28,7	-14,7
2005	6,5680		7,2200		6,9949		-4,8	-47,4	-98,7
Пункт I, 0001									
2001	2,2657	3,6	2,7426	3,4	0,3726	7,7			
2002	2,2726	3,9	2,7756	3,4	0,5065	8,5	-6,9	-33,0	-133,9
2003	2,2642	3,4	2,7638	2,5	0,4742	6,7	+1,5	-21,2	-101,6
2004	2,2521	2,8	2,7840	2,1	0,5193	5,1	+13,6	-41,4	-146,7
2005	2,3006		2,7987		0,5913		-34,9	-56,1	-218,7
Саамский карьер. Виктория									
2000	7,5260	4,3	2,6933	4,0	0,3201	9,2			
2001	7,4674	3,6	2,6779	2,7	0,1848	8,1	+58,6	+15,4	+135,3
2002	7,4644	4,8	2,7165	3,8	0,2508	9,8	+61,6	-23,2	+69,3
2003	7,4728	3,6	2,7204	2,6	0,2534	7,5	+53,2	-27,1	+66,7
Пункт 1									
2000	7,0984	7,2	1,1521	6,8	5,9170	15,3			
2001	7,0358	6,0	1,1254	4,4	5,7305	14,0	+62,6	+26,7	+186,5
2002	7,0208	4,2	1,1571	3,5	5,7994	8,6	+77,6	-5,0	+117,6
2003	6,9852	3,4	1,1253	2,4	5,6833	6,4	+113,2	+26,8	+233,7

Примечание. В таблице приведены координаты в системе ITRF 2000, при этом для 2005 г. — результаты вычислений в первом приближении; координаты указываются только начиная со значений единиц метров и до четвертого знака после запятой;  $\Delta x = x_0 - x_i$ ;  $\Delta y = y_0 - y_i$ ;  $\Delta z = z_0 - z_i$ ;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  — величины среднеквадратических погрешностей.



Таблица 5.13

Сопоставление результатов определения длин базовых линий (GPS-измерения) с результатами светодальномерных измерений

Название линии	GPS-приемники		Дальномер ME-500	Расхождение между GPS- и светодальномерными измерениями	
	TGO(ИФЗ)	Pinnacle (ГоИ)		$\Delta_{\text{ИФЗ}}$ , мм	$\Delta_{\text{ГоИ}}$ , мм
Смотровая — P_3	2106,8324	2106,8259	2106,8424	-10,0	-16,5
Смотровая — P_4	1771,2878	1771,2736	1771,2909	-3,1	-17,3
P_1-P_2	779,7050	779,7042	779,7083	-3,3	-4,1
P_1-P_3	1796,7906	1796,7894	1796,7939	-3,3	-4,5
P_1-P_4	1860,3223	1860,3210	1860,3272	-4,9	-6,2
P_2-P_3	1700,2796	1700,2803	1700,3009	-21,03	-20,6
P_2-P_4	1943,0041	1943,0030	1943,0245	-20,4	-21,5
P_3-P_4	447,5828	447,5830	447,5826	0,2	0,4

2. Для получения необходимой точности GPS-измерения следует выполнять в режиме относительных измерений с оборудованием непрерывно действующей (хотя бы в период выполнения измерений) базовой станции. При проведении работ необходимо использовать комплект аппаратуры, включающий не менее трех двухчастотных двухкдовых многоканальных приемников с антеннами типа Choke Ring с двойным подавлением многолучевости и программного обеспечения для постобработки, позволяющего достигать миллиметровой точности.

3. Конструкция пунктов измерительных полигонов должна обеспечивать установку антенн с точностью, по крайней мере,  $\pm 0,1$  мм, что может быть достигнуто только с применением методов принудительного центрирования. Поскольку при дальнейших работах предполагается, по возможности, сопоставлять результаты GPS-измерений с данными прямых измерений длин (с использованием «Мекометра-5000»), целесообразно применять идентичные конструкции пунктов лазерных полигонов и полигонов спутниковых измерений. При этом необходимо максимально сближать проведение спутниковых и лазерных измерений во времени.

4. Учитывая специфические условия мониторинговых наблюдений, для достижения требуемой точности определения смещений пунктов следует обеспечивать максимально возможные однородные условия измерений, для чего целесообразно:

выбирать период наблюдений с учетом состояния ионосферы, тропосферы и атмосферы, используя прогнозы соответствующих организаций;

составлять календарный план появления спутников над местом наблюдений с целью выбора оптимальной конфигурации и наблюдений одних и тех же созвездий в течение всего периода мониторинга;

определять необходимое время и количество сессий наблюдений опытным путем индивидуально для каждого пункта, оптимизируя программу наблюдений исходя из необходимости получения приемлемой точности результатов;

выполнять наблюдения синхронно, одними и теми же приемниками, на тех же самых пунктах, которые, в свою очередь, должны составлять жесткую геодезическую фигуру.

5. Исследовать вопрос оптимального применения типа программного обеспечения обработки результатов GPS-измерений для целей геодинамического мониторинга.

#### **5.4.4. Развитие сети измерительных полигонов для контроля геомеханического состояния массива пород и совершенствование методики обработки получаемых результатов**

Решение проблемы прогноза динамических явлений невозможно без организации постоянного контроля геомеханического состояния массива пород в масштабах всей области геомеханического влияния горных работ.

В конкретных условиях разработки месторождений Хибинского массива с учетом постепенного смыкания зон геомеханического влияния отдельных рудников это означает необходимость организации геомеханического мониторинга в массиве пород по всей апатит-нефелиновой дуге — от Кировского рудника на западе до месторождений Олений ручей — на востоке.

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют в настоящее время говорить о реальности подобной постановки работ. В частности, вполне очевидно, что основным и единственно реальным методом выполнения наблюдений в указанной области и в предполагаемых объемах в настоящее время является метод GPS-измерений. Однако на участках, представляющих по результатам GPS-измерений наибольший интерес, необходимо предусмотреть возможность постановки и проведения высокоточных светодальномерных и нивелирных наблюдений. Также, при возможности, сеть наблюдений на поверхности необходимо дополнять полигонами, организуемыми в подземных выработках с целью получения количественных кинематических параметров на конкретных структурных неоднородностях, подвижность которых выявлена GPS-измерениями. В подземных выработках это, например, методы высокоточного нивелирования и светодальномерных наблюдений.

Методика обработки результатов геомеханического мониторинга блочной среды и основные принципы расположения поверхностных пунктов геодезического мониторинга

Результаты геодезических наблюдений отражают совокупное влияние указанных выше процессов переупаковки структурных блоков и их деформирования и разрушения, а традиционные — локальные методы их обработки не позволяют раздельно определять вклад этих процессов. В силу этого, основные усилия в совершенствовании методики обработки результатов были направлены на возможности вычисления параметров движений структурных блоков как жестких тел и их деформирования.

Исходными данными для получения указанной информации являются результаты периодического определения координат наблюдаемых пунктов какими-либо методами, в частности, методами спутниковой геодезии. При этом важнейшими определяемыми параметрами являются:

1) характер деформирования отдельных блоков и их напряженного состояния, вычисления деформаций в пределах рассматриваемых блоков и величин напряжений на их границах.

2) взаимное перемещение блоков друг относительно друга.

3) степень сплошности деформируемых блоков.

Для решения первой задачи известен методический подход, в соответствии с которым предполагается, что деформирование однородного блока происходит упругим и линейным образом [53, 54]. Перемещения точек блока  $u_i, v_i, w_i$  ( $i$  — номер точки, пункта наблюдения) в этом случае можно представить следующими аналитическими зависимостями:

$$\begin{aligned} u_i &= a_{11}x_i + a_{12}y_i + a_{13}z_i + a_{14}, \\ v_i &= a_{21}x_i + a_{22}y_i + a_{23}z_i + a_{24}, \\ w_i &= a_{31}x_i + a_{32}y_i + a_{33}z_i + a_{34}. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Эта система уравнений, содержащая 12 неизвестных величин  $a_{ij}$  при условии, что координаты точек  $x_i, y_i, z_i$  и перемещения  $u_i, v_i, w_i$  известны. Тогда для решения такого рода систем необходимо иметь четыре пункта, расположенных в блоке, координаты которых могут быть определены в любой момент времени. Если в (5.24) отказаться от последних слагаемых ( $a_{14}, a_{24}, a_{34}$ ), то для решения трех систем третьего порядка достаточно взять в блоке три пункта наблюдения.

В некоторый момент времени  $t_0$  (начало наблюдений) считаем блок условно недеформированным, т. е. координаты пунктов наблюдений фиксированными. Обозначим их  $x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). При этом можно вычислить шесть различных расстояний между пунктами наблюдений по формулам

$$\begin{aligned} r_{ij} &= \sqrt{(x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2 + (z_{i0} - z_{j0})^2}, \\ (i &= 1, 2, 3; \quad j = 2, 3, 4; \quad i < j). \end{aligned} \quad (5.25)$$

В момент времени  $t_1$  (первое наблюдение) координаты точек изменились. Назовем их  $x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}$ . Тогда перемещения (5.24) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_{i1} &= x_{i1} - x_{i0} = a_{11}x_{i0} + a_{12}y_{i0} + a_{13}z_{i0} + a_{14}, \\ v_{i1} &= y_{i1} - y_{i0} = a_{21}x_{i0} + a_{22}y_{i0} + a_{23}z_{i0} + a_{24}, \\ w_{i1} &= z_{i1} - z_{i0} = a_{31}x_{i0} + a_{32}y_{i0} + a_{33}z_{i0} + a_{34} \\ (i &= 1, 2, 3, 4). \end{aligned} \quad (5.26)$$

Решив систему этих уравнений, определим неизвестные  $a_{ij}$  как результат первого наблюдения. Вычислив новые расстояния между пунктами, можно определить взаимное перемещение пунктов друг относительно друга. В момент времени  $t_2$  (второе наблюдение) координаты точек будут другими (отличными от первых и исходных) Обозначим их  $x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}$ . Тогда перемещения точек наблюдения относительно условно недеформированного состояния блока можно записать так:

$$\begin{aligned} u_{i2} &= x_{i2} - x_{i0} = a_{11}x_{i0} + a_{12}y_{i0} + a_{13}z_{i0} + a_{14}, \\ v_{i2} &= y_{i2} - y_{i0} = a_{21}x_{i0} + a_{22}y_{i0} + a_{23}z_{i0} + a_{24}, \\ w_{i2} &= z_{i2} - z_{i0} = a_{31}x_{i0} + a_{32}y_{i0} + a_{33}z_{i0} + a_{34} \\ (i &= 1, 2, 3, 4). \end{aligned} \quad (5.27)$$

Решение системы этих уравнений снова дает величины  $a_{ij}$ . Они не обязаны совпадать с решениями системы (5.26). Затем вычисляем новые расстояния между пунктами наблюдений и определяем их взаимное перемещение относительно исходного и предыдущего состояний. И так — в течение нескольких наблюдений за определенный период времени (к примеру за 1 год). Далее, из накопившейся информации вычислим средние значения величин  $a_{ij}$ . Таким образом, имеем средние величины перемещений в нашем блоке:

$$\begin{aligned} u &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}, \\ v &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}, \\ w &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34}. \end{aligned} \quad (5.28)$$

В (5.26)  $u, v, w$  и  $x, y, z$  не индексированы, так как рассматриваем однородное деформирование блока. Помимо этого, вычисления расстояний между пунктами наблюдений на каждом этапе наблюдений позволяют установить картину взаимных перемещений пунктов друг относительно друга в течение всего периода.

Из (5.28) дифференцированием находим тензор производных от перемещений в блоке:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}. \quad (5.29)$$

Вообще говоря, это не симметричный тензор. Транспонируя его относительно главной диагонали, получим сопряженный тензор:

$$\varepsilon_c = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}. \quad (5.30)$$

Разделение симметричной и антисимметричной частей тензора  $\varepsilon$  осуществляется по формулам

$$\Sigma = \frac{\varepsilon + \varepsilon_c}{2}; \quad A = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{2}. \quad (5.31)$$

Симметричная часть  $\Sigma$  есть ни что иное, как тензор собственно деформаций блока, а антисимметричная  $A$  указывает на вращение блока как единого целого:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \frac{a_{12} + a_{21}}{2} & \frac{a_{13} + a_{31}}{2} \\ \frac{a_{12} + a_{21}}{2} & a_{22} & \frac{a_{23} + a_{32}}{2} \\ \frac{a_{13} + a_{31}}{2} & \frac{a_{23} + a_{32}}{2} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (5.32)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{a_{12} - a_{21}}{2} & \frac{a_{13} - a_{31}}{2} \\ \frac{a_{21} - a_{12}}{2} & 0 & \frac{a_{23} - a_{32}}{2} \\ \frac{a_{31} - a_{13}}{2} & \frac{a_{32} - a_{23}}{2} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_1 & \omega_2 \\ -\omega_1 & 0 & \omega_3 \\ -\omega_2 & -\omega_3 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.33)$$

Таким способом мы определяем дополнительные (относительно условно недеформированного состояния) средние деформации блока. Используя обобщенный закон Гука, по найденным в результате мониторинга средним дополнительным деформациям находим средние дополнительные напряжения блока, обусловленные природными и техногенными факторами.

Для определения компонент главных деформаций блока необходимо решить уравнение третьей степени:

$$\lambda^3 - I_1\lambda^2 + I_2\lambda - I_3 = 0. \quad (5.34)$$

Здесь  $I_1, I_2, I_3$  — инварианты тензора деформаций:

$$\begin{aligned} I_1 &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}, \\ I_2 &= \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}, \\ I_3 &= \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (5.35)$$

В главных осях тензор деформаций имеет вид

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}. \quad (5.36)$$

При решении второй задачи необходимо выполнить все вышеизложенные процедуры во втором блоке для пунктов наблюдения, расположенных в нем. Затем, анализируя перемещения в этих блоках, можно судить об их взаимном перемещении, дополнительных деформациях во втором блоке и его дополнительном напряженном состоянии.

Решение третьей задачи сопряжено с тем, что заранее неизвестно о целостности блока и поэтому требуется исследовать его деформации на предмет неразрывности, т. е. проверить выполняются ли условия Сен-Венана:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}, & \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z}, & \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x \partial z}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial y} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x \partial z}.$$

Уравнения (5.37) справедливы лишь в случае малых деформаций, что при наличии разрывов сплошности среды не всегда возможно. Увеличение числа неизвестных переменных в зависимостях типа (5.24), т. е. представление перемещений в виде нелинейных функций от координат, не приводит к желаемому результату, так как условия (5.37) в перемещениях превращаются в тождества, в чем нетрудно убедиться, подставив в (5.37) выражения деформаций через производные перемещений.

Эту трудность можно обойти путем увеличения числа пунктов наблюдения. В блоке, сплошность которого необходимо установить, оборудуем дополнительно 5-й пункт наблюдения. Выражения для перемещений пунктов наблюдений выбираем прежними (5.24). При этом в каждом случае наблюдений мы можем определить 10 расстояний между пунктами и по пять значений неизвестных коэффициентов  $a_{ij}$ , входящих в (5.24). Для этого необходимо решить соответствующие системы уравнений при различных сочетаниях пунктов, а именно: (1, 2, 3, 4); (1, 2, 3, 5); (1, 2, 4, 5); (1, 3, 4, 5); (2, 3, 4, 5).

По результатам каждого наблюдения можно судить о взаимных перемещениях пунктов и установить, при каких сочетаниях пунктов деформации различаются существенным образом. Может оказаться так, что все пункты наблюдений расположены по одну сторону искомого разрыва, тогда установить это нарушение сплошности не удастся.

Организация 6-го пункта позволяет вычислять 15 расстояний между ними и 15 значений каждого из коэффициентов  $a_{ij}$  для различных сочетаний из шести по четыре пункта. Далее осуществляется анализ результатов наблюдений.

Система из семи пунктов дает 21 расстояние между пунктами и по 35 значений коэффициентов  $a_{ij}$ .

Представленную методику определения сплошности блока можно проверить на примере соседних, заведомо разделенных разрывом, блоков, в которых имеется по четыре пункта наблюдений. В этом случае мы получаем 28 расстояний и по 70 значений коэффициентов  $a_{ij}$ . Такой информации достаточно для анализа взаимных перемещений блоков и их дополнительного напряженно-деформированного состояния.

Исходя из изложенного, следует, что на первом этапе необходимо в каждом структурном блоке закладывать как минимум четыре фундаментальных пункта, при этом принципиальная схема их расположения представлена на рис. 5.29.

Пространственное положение фундаментальных пунктов предполагается регулярно определять методами космической геодезии (GPS-технологии), а при необходимости дополнять наблюдениями традиционной геодезии (высокоточным нивелированием по программе I—II классов и светодальномерными измерениями).

В качестве примера использования вышеизложенных представлений проведения обработки GPS-измерений координат некоторых пунктов общей сети мониторинга, заведомо находящихся вне области влияния горных работ [55].

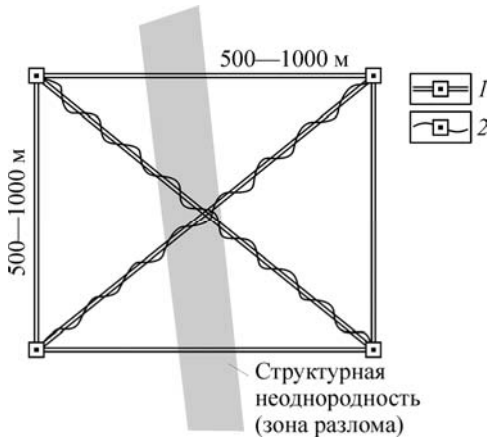


Рис. 5.29. Схема расположения фундаментальных пунктов геомеханического мониторинга в районе структурных неоднородностей (разломов).

1 — фундаментальный пункт; 2 — линия высокоточного нивелирования.

В табл. 5.14 представлены результаты расчетов тензоров дополнительных деформаций  $(\epsilon_1 - \epsilon_2) \cdot 10^4$  и тензоров дополнительных напряжений  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  для каждого из указанных моментов времени.

Изменения главных напряжений в рассматриваемые периоды характеризуются данными, представленными в табл. 5.15.

Анализ этих результатов свидетельствует о том, что массив горных пород испытывает сжимающие дополнительные напряжения и деформации, причем в течение всего контролируемого периода. При этом изменения напряжений весьма небольшие, что свидетельствует о достаточно стабильном состоянии контролируемой геологической среды.

Таблица 5.14

Тензоры дополнительных деформаций и напряжений при  $E = 1 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 0,25$

Период времени, годы	Тензор дополнительных деформаций, $\epsilon \cdot 10^4$	Тензор дополнительных напряжений $\sigma$ , МПа
2001—2002	-0,2865 -0,2227 -1,3347 -0,2227 -0,1630 -0,9238 -1,3347 -0,9238 -4,7582	-2,3122 -0,0891 -0,5339 -0,0891 -2,2135 -0,3695 -0,5339 -0,3695 -5,8896
2001—2003	-0,3164 -0,0407 -1,7568 -0,0407 -0,0646 -0,7031 -1,7568 0,7031 -6,5232	-2,9632 -0,0163 -0,7027 -0,0163 -2,6584 -0,2812 -0,7027 -0,2812 -7,9286
2001—2004	-0,4153 -0,2397 -1,6717 -0,2397 -0,1373 -0,9813 -1,6717 -0,9813 -5,6660	-2,8197 -0,0959 -0,6687 -0,0959 -2,5973 -0,3925 -0,6687 -0,3925 -7,0202
2001—2005	-0,0535 -0,0081 -0,9228 -0,0081 -0,0115 -0,5049 -0,9228 -0,5049 -4,2666	-1,7662 -0,0032 -0,3691 -0,0032 -1,7143 -0,2019 -0,3691 -0,2019 -5,1367

Таблица 5.15

Изменения главных напряжений в рассматриваемые периоды, МПа

Период	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
2001—2002 гг.	2,16	2,25	6,01
2001—2003 гг.	2,64	2,87	8,04
2001—2004 гг.	2,55	2,72	7,16
2001—2005 гг.	1,69	1,74	5,19

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные общие принципы позволяют для каждой конкретной горно-технической ситуации выделить группы первоочередных объектов геодезического контроля, обосновать многоуровневую (иерархичную) систему мониторинга, обоснованно выбрать измеряемые параметры, методы наблюдений, конструкции наблюдательных станций, режимы и программы наблюдений и обработки получаемых результатов.

2. При этом определение объемов массива пород, подлежащих контролю геомеханического состояния, в условиях иерархично-блочной структуры массивов производится на основе выделения «эффективного» типа структурных неоднородностей, который для каждого конкретного элемента системы разработки определяет условия деформирования и разрушения, а, в конечном итоге, его устойчивость.

3. В зависимости от размеров контролируемых объемов массива и элементов систем разработок выбираются методы наблюдений и сети расположения наблюдательных станций.

4. Усовершенствованная методика обработки результатов геодезических наблюдений позволяет получать раздельно параметры процессов переупаковки структурных блоков и их деформирования. При этом появляется возможность оценки степени изменения во времени накопленной упругой энергии структурными блоками, что важно для решения общей проблемы предупреждения динамических геомеханических явлений типа горных ударов и техногенных землетрясений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. *Панин В. И.* К прогнозу сейсмической опасности при разработке удароопасных месторождений // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. — Апатиты: КНЦ РАН, 1998.
2. *Каякин В. В.* Прогноз чрезвычайных ситуаций, связанных с техноприродными процессами, и обеспечением безопасности объектов // Геоэкология. — 1999. — № 2.
3. *Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А.* Актуальные проблемы управления эволюцией природно-технических систем при крупномасштабных горных работах // Сергеевские чтения. Вып. 2. — М.: ГЕОС, 2000.
4. *Методические* рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса. МР-41-06-079-86. — М.: ГЕОС, 1987.
5. *Техника* контроля напряжений и деформаций в горных породах / Отв. ред. В. В. Ржевский. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1978.
6. *Парабучев И. А.* Мониторинг процессов взаимодействия гидротехнических сооружений с геологической средой // Инженерная геология. — 1992. — № 2.
7. *Савич А. И.* Долговременные геофизические наблюдения на участках гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. — 1993. — № 3.
8. *Савич А. И., Марчук А. Н., Ильин М. М.* О службе геодинамических наблюдений электроэнергетической отрасли Минтопэнерго РФ // Гидротехническое строительство. — 1995. — № 11.
9. *Зверев А. Б., Гусаков П. Г., Волжанин Ю. С. и др.* О строительстве и эксплуатации сооружений первой отечественной подземной атомной станции // Горн. журнал. — 1995. — № 9.



10. Адушкин В. В., Сливак А. А., Овчинников В. М. и др. Геоэкологический контроль за геофизическими полями мегаполиса // Геоэкология. — 1995. — № 2.
11. Ильичев В. А., Коновалов П. А., Никифорова Н. С. Особенности геомониторинга при возведении подземных сооружений в условиях тесной городской застройки // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1999. — № 4.
12. Яровой Ю. И., Оржеховский Ю. Р., Суханов Д. Б. Геоинформационная система и мониторинг геодинамических процессов в зоне строительства метрополитена // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2001. — № 1.
13. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Панин В. И. Геодинамический полигон при крупномасштабных горных работах для прогноза и профилактики техногенных землетрясений и горно-тектонических ударов // Горный вестник. — 1995. — № 4.
14. Курленя М. В., Леонтьев А. В., Беляков В. Г. и др. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга. Ч 1. Введение в проблему и общие вопросы // ФТПРПИ. — 1996. — № 2; Ч. 2. Структура данных и моделей // ФТПРПИ. — 1996. — № 6.
15. Лукишев Б. Г., Багдасарян А. Г., Коновалов Б. Д. Обеспечение геодинамической безопасности крупномасштабных горно-технических сооружений // Горн. журнал. — 1999. — № 2.
16. Исаев Ю. С., Мулев С. Н. Опыт создания систем геодинамического мониторинга на горных предприятиях // Горн. журнал. — 1999. — № 10.
17. Власенко Б. В., Потапов В. П., Федорин В. А. Горный физико-технический мониторинг // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2001. — № 10.
18. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — М.: Наука, 1991.
19. Куксенко В. С., Инжеваткин И. Е., Манжиков Б. Ц. и др. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов // ФТПРПИ. — 1987. — № 1.
20. Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Аккуратов М. В. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. — Апатиты: КНЦ РАН, 1998.
21. Макаров В. И., Трапезников А. Ю. Изучение современных деформаций земной коры методами космической геодезии // Геоэкология. — 1996. — № 3.
22. Панжин А. А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS // Геомеханика в горном деле. — 2000. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000.
23. Алешин А. С., Галаганов О. Н. Методика и техника спутниковой геодезии для целей деформационного мониторинга // Геоэкология. — 2001. — № 1.
24. Каякин В. В., Мулина А. В. Социально-экологический мониторинг при гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. — 1993. — № 3.
25. Газиев Э. Г. Экспертная система диагностики и прогноза поведения плотин для обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. — 2000. — № 6.
26. Cichovicz A. Expert system for seismic hazard analysis // Mining Industry. 1993. — Section A. — V. 102.
27. Смирнов В. А., Шкодырев В. П. Интеллектуальные технологии и экспертные системы защитного мониторинга и прогнозирования горных ударов // Физика и механика разрушения горных пород применительно к прогнозу динамических явлений. — СПб.: ВНИМИ, 1995.

28. Васильев Ю. С., Добрынин С. Н., Масликов В. И. и др. Экспертно-информационная система «Экологическая безопасность ГЭС» // Гидротехническое строительство. — 2000. — № 3.
29. Марков Г. А., Савченко С. Н. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1984.
30. Савченко С. Н., Козырев А. А., Горбунов Ю. Г. Влияние кольцевых геологических структур Хибинской интрузии на напряженное состояние массивов горных пород // ФТПРПИ. — 1989. — № 3.
31. *Rock Mechanics, Supplementum 9, Tectonic Stress in the Alpine-Mediterranean Region* // Edited by A. E. Scheidegger. Wien, New York: Springer-Verlag, 1980.
32. Савченко С. Н., Козырев А. А., Мальцев В. А. Напряженное состояние пород блочного строения // ФТПРПИ. — 1994. — № 5.
33. Савченко С. Н., Козырев А. А., Мальцев В. А. Напряженное состояние пород блочного строения различных масштабных уровней // Там же. — 1994. — № 6.
34. Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н., Мальцев В. А. и др. Сейсмичность при горных работах. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002.
35. Kozurev A. A., Savchenko S. N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modeling // *Geocology and Computers* / S. A. Yufin ed. Rotterdam; Brookfield: Balkema, 2000.
36. Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Федотова Ю. В. Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород // Горное дело в Арктике. — СПб: Типография Иван Федоров, 2005.
37. *Rockburst and seismicity in Mines Proceedings*. — Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2005.
38. Кондратьев О. К. Прогноз землетрясений. Причины и пути решения проблемы // Оценка и управление природными рисками. Т. 1. — М.: РУДН, 2003.
39. Любушин А. А. Геодинамический мониторинг: шумы, сигналы, предвестники // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 2. — М.: Наука, 2003.
40. Simmons J. V. Geotechnical risk management in open pit coal mines // *Australian Centre for Geomechanics Newsletter*. — 2004. — V. 22.
41. Викторов С. Д., Иофис М. А., Одинцев В. Н. Разрушение горных пород и риск техногенных катастроф // Горный журнал. — 2005. — № 4.
42. Owen M. L. Calibrating a semi-quantitative seismic risk model using rockburst case studies from underground metalliferous mines // *Controlling seismic risk*. — Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2005.
43. Куликова Е. Ю. Основы стратегии управления риском в городском подземном строительстве / Горный инф.-аналит. бюлл. — 2006. — № 5.
44. Mora S., Keipi K. Disaster risk management in development projects: models and checklists // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. — 2006. — V. 65, N 2.
45. Бондарь В. А., Попов Ю. П. Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений // Безопасность труда в промышленности. — 1997. — № 10.
46. Осипов В. И. Управление природными рискам // Вестник РАН. — 2002. — Т. 72, № 8.
47. Катков Н. Н., Полуторный А. В. Затраты предприятия на один несчастный случай с летальным исходом на рудниках Норильска (по методике ВостНИИ) // Горный инф.-аналит. бюлл. — М.: МГУ, 2002. — № 7.
48. Яковлев В. П., Могилат В. П., Лобко В. П. Развитие методологии формирования информационных потоков в системе управления промышленной безопасности горнодобывающих предприятий / Там же. — 2006. — № 15.
49. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатитонефелиновые месторождения. Открытое акционерное общество «Апатит») / Коллектив авторов. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002.

50. *Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Федотова Ю. В.* Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах // Оценка и управление природными рисками, «Риск-2006». — М.: РУДН, 2006.
51. *Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Мальцев В. А. и др.* Опыт применения высокоточных геодезических наблюдений для контроля деформационных процессов в массиве горных пород при крупномасштабных техногенных воздействиях // Зап. Горного института. Маркшейдерское дело и геодезия. — 2001. — Т. 146.
52. *Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Мальцев В. А. и др.* Мониторинг деформационных процессов массива пород методом высокоточных геодезических наблюдений // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства северо-запада России. Ч. 3. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001.
53. *Иванов В. В., Сурунов Н. Ф., Бузук Р. В.* Оценка дополнительных напряжений блоков земной коры, обусловленных ее современными движениями // Вестник КузГТУ. — 2006. — № 3.
54. *Иванов В. В., Бузук Р. В., Сурунов Н. Ф.* Оценка главных компонент деформаций блоков земной коры по результатам геодезических измерений ее современных движений // Там же. — 2000. — № 4.
55. *Savchenko S., Kasparyan E.* The theoretical principles in geomechanical monitoring data processing for a block medium // Proceeding of the International Geomechanics Conference 11—15 June 2007. — Nessebar, Bulgaria, 2007. — V. 1—8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ К ТОМУ 1

Представленные выше результаты научных исследований и технические разработки коллективов ученых и специалистов из институтов Сибирского отделения РАН (ИГД, ИЛФ, ИНГГ, ИУУ, КТИ НП и филиал ИФП КТИ ПМ), Уральского отделения РАН (ГИ, ИГФ), Кольского научного центра РАН (ГоИ), Национальной Академии наук Украины (УкрНИМИ) с участием Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) и Сибирской государственной геодезической академии (СГГА), несомненно, являют собой крупный вклад в экспериментальные основы нелинейной геомеханики и создают технические и методические предпосылки для построения новых систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов на рудниках и шахтах России. Достигнуты важные результаты как в направлении разработки базовых принципов создания новых весьма перспективных систем комплексного сейсмодеформационного мониторинга природных и техногенных катастрофических событий (землетрясений, горно-тектонических и горных ударов), их технической и научно-методической реализации, а также апробации на сети опорных испытательных полигонов геофизиков и геомехаников Сибири, Урала, Кольского п-ова и Украины. К наиболее значимым результатам проведенных исследований и разработок 2006—2008 гг. можно отнести следующие.

**В направлении разработки приборных комплексов для натурных исследований сейсмодеформационных и электромагнитно-эмиссионных процессов в блочных массивах горных пород и на земной поверхности:**

Создан опытный образец многоканального скважинного приборного комплекса нового поколения для непрерывных измерений перемещений и деформаций в блочных структурах как бортов карьеров, так и подземных горных выработок в условиях рудников и шахт; проведены метрологические и натурные испытания, подтвердившие его работоспособность. Такой комплекс как основа создаваемой системы деформационного мониторинга имеет в своем составе все необходимые компоненты для построения измерительной сети: скважинный измерительный зонд, содержащий неподвижную штангу, базовую опору и комплект измерительных модулей; источник электропитания; аналого-цифровой преобразователь с устройством сбора данных; линию связи для дистанционной передачи цифровой информации в компьютер; модемы; блок электропитания; рабочее место оператора на поверхности земли.

В плане развития систем автоматизированного контроля деформаций горных пород разработана структура прецизионного лазерного дальномера с набором угловых отражателей для бесконтактных скважинных измерений перемещений геоблоков в массиве горных пород. Применяемый здесь метод точной лазерной дальнометрии основан на явлении самосмешивания, в настоящее время разрабатывается и пока не нашел практического применения (имеются лишь лабораторные образцы измерительных устройств), но обладает несомненной перспективой для создания надежных малогабаритных высокоточных датчиков перемещений скважинного типа.

Адаптирован для работы в подземных условиях рудников и позволяет обеспечить непрерывный контроль поперечных деформаций разгрузочных скважин деформометр на основе оптико-поляризационного датчика. В основу измерений величин механических напряжений, возникающих в горных породах, положен метод регистрации линейных изменений геометрических размеров разгрузочной скважины. Для определения величин и направления действия квазиглавных механических напряжений в плоскости поперечного сечения скважины необходимым является проведение измерений геометрических размеров скважины по трем направлениям, сдвинутым по окружности относительно друг друга на  $120^\circ$ . Элементная база зонда на основе трех оптико-поляризационных датчиков позволяет реализовать соответствующие конструкции для организации мониторинга в составе деформационной сети.

На основе скважинного приборного комплекса деформационных измерений, акселерометров и датчиков электромагнитной эмиссии созданы измерительные компоненты системы, обеспечивающие в режиме реального времени непрерывные измерения перемещений и деформаций геоблоков, сейсмоакустических колебаний и сигналов электромагнитного излучения в массиве пород через скважину в широком динамическом диапазоне частот с дистанционной передачей данных в компьютер. Реализован режим предварительного накопления аналоговых сигналов с последующей регистрацией и отображением осредненного значения за период дискретизации.

Создан прибор РЭМИ-3 для регистрации электромагнитных сигналов и контроля удароопасности на Таштагольском руднике, расширяющий возможности обработки сигналов электромагнитной эмиссии горных пород с возможностью определения средневыпрямленного значения сигнала, а также регистрации и сохранения в энергонезависимой памяти результатов дискретизации сигнала, усредняемого на интервале 5 мс. На его основе разработан совмещенный вариант многофункционального приборного комплекса деформационно-электромагнитных измерений, в котором используется электронный деформометр на основе датчика перемещений инкрементного типа с фотоэлектрическим сканированием штриховых растров, что обеспечивает выполнение синхронных измерений продольных перемещений геоблоков и регистрацию электромагнитной эмиссии на образцах горных пород при стендовых экспериментах.

Разработан, изготовлен и испытан в условиях рудников Талнахско-Октябрьского месторождения медно-никелевых руд скважинный зонд для визуального каротажа породных массивов вокруг подземных выработок с возможностью регистрации изображений, определения ориентации плоскостей ослабления массива (систем трещин) и их частотного распределения. При установке различной измерительной аппаратуры в скважинах знание показателей, характеризующих структуру (положение зон дезинтеграции, расстояние между ними, мощность породных слоев и т. д.) и учитывающих горно-геологическое строение данного участка горного массива, является необходимым условием достоверности и полноты регистрируемой информации. Видеокаротажный зонд является недорогим, достаточно простым и эффективным техническим устройством для кругового осмотра скважины и регистрации состояния породного массива, в том числе, в оперативном режиме.

Разработана серия улучшенных автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения (АРСС) «Байкал-АСН», предназначенная для построения локальных сетей сейсмического мониторинга за состоянием земной коры, неразрушающего контроля инженерных сооружений, исследования взрывов, источников промышленных и бытовых вибраций и естественной сейсмической активности. Внутренний генератор АРСС синхронизируется к времени UTC от встроенного модуля GPS с точность 1 мкс. Высокая стабильность генератора позволяет регистратору длительное время работать при отключении канала GPS.

Создан многоканальный мобильный сейсмологический комплекс ИСК-3, предназначенный для приема сейсмических колебаний, их преобразования в цифровой вид и регистрации с привязкой к единому времени. Структура комплекса включает следующие основные устройства: регистрирующий модуль, выполненный на базе портативного компьютера Notebook; комплект усилителей, фильтров и преобразователей АЦП—ЦАП; комплект сейсмических датчиков СМЗ-КВ; кабельные линии связи с выносными распределителями; GPS-приемник; блок автономного электропитания и блок калибровки. Набор аппаратуры позволяет реализовать идеологию комплексной многоканальной системы сейсмического мониторинга.

Разработан автономный полевой регистратор «Регистр», обеспечивающий непрерывную трехкомпонентную регистрацию сейсмических сигналов, запись ближних и удаленных (до тысячи километров) землетрясений для оценки сейсмической опасности участков земной коры, в том числе техногенного характера, изучения геологических структур, расположенных на глубинах до десятков километров. Регистратор спроектирован для работы в комплекте с 3-компонентным сейсмическим датчиком электродинамического типа, подключается к компьютеру для управления и обработки сейсмической информации, обеспечивает оперативное вычисление величины энергии сейсмического поля в точке наблюдения. Основой для построения сейсмического мониторинга по площади с использованием системы регистраторов в виде сетевого «куста» и единым центром сбора данных служит динамическая карта исследуемого геобъекта (например, горной выработки), на которой в реальном времени отображаются изменения энергетических уровней регистрируемого сейсмического поля. Метод и аппаратура апробированы при локальных сейсмологических наблюдениях, проведенных на руднике Таштагольский ОАО «Евразруда» (Кемеровская область).

Представлен модернизированный приборный комплекс МОЭД-1п, обеспечивающий искробезопасность и взрывозащиту при измерении деформаций и перемещений геоблоков в массиве горных пород в подземных условиях рудников и шахт, опасных по пыли и газу, с возможностью подключения и передачи данных по длинной линии связи при ограничении электропитания с передающей стороны. Для реализации деформационного мониторинга, кроме выбора первичных измерительных преобразователей, решен ряд проблем, связанных как с минимизацией электропитания, так и с обеспечением достоверной передачи информации на большие расстояния по тупиковой линии связи с высоким уровнем помех, первичной обработки и анализа данных.

Разработана измерительно-информационная система «ЛАВА-СМ», позволяющая вести одновременную регистрацию геофизической информации в двух суще-

ственно различных частотных диапазонах. Многолетние попытки поиска надежных прогностических признаков землетрясений и горных ударов показали исключительную сложность такой задачи и необходимость комплексного применения всех доступных геофизических методов. К этой проблеме тесно примыкает сравнительно недавно поставленная задача изучения так называемых медленных движений. Отличительная особенность системы состоит в том, что она одновременно выполняет функции пассивного измерения и управления зондирующими сигналами активного мониторинга, например, вибросейсмического, геоакустического, электромагнитного. С помощью этой системы можно непрерывно регистрировать низкочастотные сигналы сейсмометров и периодически выполнять высокочастотные просвечивания геосреды с использованием относительно низкочастотных (до 20 Гц) электромеханических или высокочастотных (1 кГц) пьезокерамических вибраторов.

Решались вопросы разработки лазерных средств высокоточного измерения виброакустических механических возмущений в широком спектре частот. Для создания эффективных систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов необходимо знать процессы деформирования и хрупкого разрушения горных пород. В связи с этим разработан стенд для исследования упругопластического деформирования малых образцов горных пород в допредельной и запредельной областях одноосного нагружения в составе лазерного деформографа и нагружающего пресса.

Создан комплект измерительных приборов и аппаратуры для построения гео-мониторинга природно-технических систем в условиях Хибинских месторождений Кольского полуострова. Для локальной оценки деформирования массива пород разработан и прошел промышленные испытания прибор «КРВ-Лазер», основанный на лазерном сканировании сечений горных выработок в условиях действия высоких тектонических напряжений на апатитовых подземных рудниках. Прибор позволяет определять расстояния от точки установки до стенки выработки в произвольно заданной плоскости, что повышает точность измерений на порядок, упрощает и ускоряет процедуру обработки информации.

Разработан и испытан прибор видеосъемки скважин КТКС «Таис-Апатиты». Работа выполнена совместно с Московским государственным горным университетом. В состав комплекса входят: скважинный гидроизолированный зонд, блок управления, жидкокристаллический монитор, микрофон, набор секций досылочных штанг, центраторы, угломеры, кабель, видеомагнитофон, аккумуляторы, зарядное устройство, дополнительные осветители. Комплекс обеспечивает визуальный осмотр контрольных, взрывных и разведочных скважин, пробуренных из подземных выработок, в том числе на нижележащие горизонты. Осмотр позволяет оценить трещиноватость и другие формы нарушенности в породном массиве, прогнозировать снижение устойчивости и возможность обрушения бортов выработок.

Разработаны и испытаны: комплекс «Ультразвук», предназначенный для экспериментального изучения упругих свойств, трещиноватости и напряженного состояния горных пород в массиве с использованием ультразвуковых колебаний; метод и аппаратура контроля разрушения скважин (КРС) на основе профилемера; комплекс кварцевых деформометров и наклономеров КД—КН для мониторинга деформирования сейсмоактивных участков массивов горных пород при отработке

рудных месторождений. Комплекс «Ультразвук» позволяет производить ультразвуковой каротаж горного массива в подземных условиях для оценки удароопасности с использованием шпуров и скважин. В качестве выходных параметров ультразвуковых измерений используют пространственные распределения и временные изменения скоростей продольных и поперечных волн ( $V_p$ ,  $V_s$ , км/с) и амплитуд сигналов  $A_{отн}$ ,  $A_б$ , скоростей продольных и поперечных волн ( $V_{po}$ ,  $V_{so}$ ) в образцах, а также их статистическое распределение. В качестве параметра оценки состояния пород выступает отношение скоростей упругих волн в массиве и в образцах.

Использование этих разработок при проведении геомеханических исследований карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» позволило сделать следующие важные выводы:

1) напряженно-деформированное состояние пород бортов карьера относится к гравитационно-тектоническому типу, что предполагает действие в массиве горизонтальных напряжений, превышающих вертикальные на сравнительно неглубоких карьерах;

2) мощность нарушенной зоны борта карьера в большинстве случаев превышает 3 м, что свидетельствует о недостаточной устойчивости уступов, но при формировании вертикальных уступов с применением специальной технологии ведения взрывных работ, снижающих динамическое воздействие на законтурный массив, мощность нарушенной зоны имеет тенденцию к снижению до 1 м и менее;

3) действующие в породном массиве напряжения, а также снижение мощности нарушенной зоны вследствие совершенствования буровзрывных работ на конечном контуре карьера повышают вероятность динамических проявлений горного давления, что требует разработки соответствующих методов и средств контроля геомеханического состояния бортов карьера, совершенствования порядка ведения горных работ, проведения профилактических мероприятий.

#### **В направлении развития основ электромагнитно-эмиссионных методов диагностики состояний критичности горных пород:**

Разработана методика для совместного измерения механических нагрузений, деформационных характеристик и сигналов электромагнитного излучения породных образцов. Разработан и изготовлен приборный блок, позволяющий проводить синхронные измерения уровня нагружения, изменения деформационных параметров и характеристик электромагнитного излучения. Это позволяет осуществить бесконтактный контроль деформирования пород на основе регистрации электромагнитного излучения при их нагружении.

На основе анализа осциллограмм электромагнитной эмиссии, записанных в условиях подземных горных выработок Таштагольского рудника перед динамическим проявлением горного давления в форме горного удара, установлено, что до начала динамического проявления уровень и количество сигналов ЭМИ существенно (до 10 крат) увеличивается. Происходит изменение структуры сигналов ЭМИ с возникновением квазирезонансных автоколебательных периодических процессов, предшествующих нарушению сплошности горных пород.

Экспериментально для образцов мрамора установлено, что: величины амплитуд сигналов ЭМИ в момент разрушения образцов существенно (на 1—3 порядка) превышают уровень этих значений на промежуточной стадии их нагружения; наи-



большие амплитудные значения сигналов ЭМИ наблюдались у образцов со средней зернистостью, а наименьшие — у крупнозернистых; напряжения в образце на стадии нарушения сплошности в нем зависят от структурно-текстурных его особенностей и увеличиваются пропорционально объему образца.

При нагружении образцов пород до разрушения сопутствующие сигналы ЭМИ, регистрируемые последовательно, возникают со все возрастающей частотой и, соответственно, уменьшающимся временным интервалом их следования на критической стадии. При этом весь процесс разрушения можно представить как трехстадийный с неуклонно увеличивающимся количеством электромагнитных импульсов, уменьшением периода их следования и соответствующим увеличением скорости нагружения образцов.

Разработан алгоритм обнаружения электромагнитного сигнала в нестационарном пуассоновском потоке импульсов неизвестной интенсивности, который обладает следующими практически важными свойствами: вероятность ложной тревоги  $\alpha$  не превосходит наперед заданного значения при любых фактических значениях интенсивности компоненты, содержащей сигнальную составляющую. Алгоритм автоматически подстраивается под характеристики регистрируемого процесса; структура решающих функций алгоритма не зависит от фактических значений интенсивности процесса  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  (структурная устойчивость). Вероятность правильного обнаружения алгоритмов максимальна в классе всех несмещенных алгоритмов при любых значениях отношения сигнал—помеха  $q$ . Результаты практического применения разработанного алгоритма показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, и, следовательно, он может быть использован при анализе обнаружения сигнальной составляющей в нестационарном пуассоновском потоке импульсов неизвестной интенсивности.

Экспериментальные исследования электромагнитного излучения массива горных пород в условиях карьера строительного камня позволили установить, что: под влиянием массовых взрывов по отбойке горной массы изменяется интенсивность фонового ЭМИ в скважинах, пробуренных в борт карьера; имеет место зональное распределение интенсивности фонового ЭМИ в придонной части, что связано, в частности, с зональной структурой поверхности дна карьера, формирующейся под воздействием напряжений, возникающих в массиве в процессе массовых взрывов; ЭМИ в зоне отвала отбитой массовым взрывом горной породы всегда превышает фоновое ЭМИ на дне карьера. Наиболее интенсивное ЭМИ наблюдается в первые часы после массового взрыва. В последующем его интенсивность постепенно снижается до уровня начального фонового ЭМИ.

**В направлении развития основ сейсмического мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород на примере отработки угольных месторождений Украины:**

Разработаны методические основы активного сейсмического мониторинга геосреды, подверженной деформационным и энергообменным процессам в области очистных работ, предложена концепция формирования опасной геодинамической ситуации в области краевой части обрабатываемого пласта. С учетом роли поведения консольной части основной кровли в создании зон повышенных напряжений в угольном пласте и в механизме образования условий и развития динамических явлений, разработан метод пассивного сейсмического мониторинга для

диагностики с земной поверхности геодинамического состояния породного массива по изменению спектральных и энергетических параметров собственных изгибных колебаний консольной части основной кровли.

Разработан способ обработки сейсмической информации по активным и пассивным методам сейсмического мониторинга на основе исследования энергетических, спектральных и кинематических параметров сейсмических сигналов с учетом площадной схемы наблюдений при активном и пассивном мониторинге. Выявлены возможности установления диагностических критериев временных тенденций поведения абсолютных и относительных энергетических и спектральных параметров сейсмических сигналов и разработаны технические требования на цифровую аппаратуру регистрации низкочастотных сейсмических явлений, позволяющую фиксировать эти явления в нескольких пунктах с синхронизацией по времени и регистрировать сигналы, превышающие предварительно задаваемое пороговое значение амплитуды сигнала, с регулируемой по длительности записью.

**В направлении разработки методологических основ и геoinформационного обеспечения систем геомеханико-геодинамического мониторинга:**

Дан анализ методам дистанционного зондирования применительно к задачам крупного горно-промышленного региона Кузбасса, выделены актуальные области их применения. Сформулированы основные цели и задачи создания системы контроля за угольными месторождениями Кузбасса на основе данных дистанционного зондирования и определены современные программные комплексы их сопровождения и обработки: ENVI 4.0, ERDAS IMAGINE +LPS (8.0 и 9.0) (Leica Geosystems), ER Mapper v.7.0, Geomatica v.9.0 и 10.0, IDRISI v.2.02 и IDRISI 15 Andes Stand-Alone. Выбран базовый комплекс обработки спутниковых данных для Кузнецкого бассейна — ERDAS IMAGINE + LPS 9.0 фирмы Leica Geosystems. Выполнена корректировка электронной геолого-промышленной карты Кузбасса масштаба 1 : 100 000 на основе спутниковых данных систем Google Earth и Nasa World и начата разработка интегрированной геолого-промышленной базы данных для соответствующих объектов угольной промышленности, включающей в себя спутниковые снимки.

Разработана автоматизированная система непрерывного сейсмического мониторинга и контроля состояния массива горных пород на базе сейсмостанции «Таштагол», что позволило объединить сейсмические комплексы Таштагольского и Шерегешевского месторождений по сетевому принципу и получить качественно новые возможности по сейсмическому контролю потенциально опасных зон в подземных выработках. Система позволяет давать оценку поля векторных скоростей распространения сейсмических колебаний в массиве горных пород шахтного поля месторождения и с помощью методов кластерного анализа выделять области концентрации сейсмических событий при проведении промышленных взрывов в подземных условиях.

Представлены работы по созданию информационной динамической модели геомеханического пространства, которая позволит отображать динамику наиболее существенных факторов, определяющих развитие катастрофических процессов в массиве горных пород.

Итогом разработки информационной геодинамической модели являются следующие результаты:

1) обоснована методология моделирования динамики геомеханического пространства, ориентированная на использование информационных технологий и распределенных баз данных, предложена общая структура информационной геодинамической модели породного массива;

2) отработана технология обработки первичных документов, содержащих геомеханическую, геологическую, геофизическую, геотехнологическую и иную информацию о моделируемом геомеханическом пространстве;

3) разработаны методы плоской и объемной триангуляции по опорным точкам на основе планов горизонтов, с учетом топологии сечения моделируемого геомеханического объекта;

4) создана структура базы данных информационной геодинамической модели, которая предполагает использование объектно-ориентированных технологий и распределенных вычислений.

На примере Таштагольского месторождения проведено опытное моделирование рудного тела, результаты которого позволяют говорить о возможностях реализации разработанных принципов и методов в практике горно-рудных предприятий для оценки геомеханического состояния массива горных пород, а в перспективе — для анализа наблюдаемых геодинамических явлений и прогнозных расчетов.

Разработан метод наземного лазерного сканирования для получения метрических характеристик блочных массивов горных пород. Готовая цифровая модель объекта позволяет представить линейные промеры геоблоков горного массива с необходимым уровнем точности без проведения работ в полевых условиях. Объемную цифровую модель вертикального борта карьера, в частности, можно использовать для решения таких задач, как: получение метрических характеристик (линейных и угловых) элементов объекта, построение планов, сечений и профилей, определение площадей и объемов и их изменения. Преимущества данного метода (дистанционный метод измерения, высокая скорость, точность и полнота получения данных) позволяют считать эту технологию полноценной альтернативой традиционным методам теодолитной съемки, а также расширить круг задач, решаемых по цифровой модели.

В условиях масштабного недропользования и концентрации на небольших территориях множества шахт и разрезов необходимо создание региональной системы мониторинга в связи с формированием опасного по геодинамическим проявлениям геомеханического пространства. Представлена структура информационного обеспечения такой системы, включающая информационные модели геологической среды и базы данных инструментальных наблюдений за деформационными процессами. Концентрация угледобывающих предприятий в территориально небольших регионах Кузнецкого бассейна, при интенсивном ведении горных работ, формирует региональное геомеханическое пространство. Поэтому возникшие геодинамические явления на одном предприятии могут индуцировать аналогичные явления на других, находящихся в общей зоне влияния. В таких условиях методология контроля и предупреждения геодинамических процессов должна быть ориентирована на создание региональных мониторинговых систем с аналитическими центрами обработки и анализа информации.

В настоящее время создание мониторинговых систем связано с проблемами сбора, хранения и анализа информации, характеризующей как общее состояние

геомеханического пространства, так и протекающих в нем процессов в результате разработки месторождений полезных ископаемых. Для формализованного их описания используются аналитические и численные математические модели, в том числе модели прогнозирования принципиально значимых показателей структуры и свойств геоматериалов и массивов горных пород, предназначенных для значительного уменьшения объемов подготавливаемой информации и сокращения размеров пространства наблюдаемых факторов, число которых достаточно велико, а также для определения наиболее влияющих на выбор конкретных технологических систем.

**В направлении создания методолого-методических основ развития мониторинговой системы геомеханической безопасности на Хибинском месторождении:**

Сформулированы принципы и методология построения геодинамического мониторинга состояния геологической среды для горно-промышленной природно-технической системы «Хибины» (на Хибинских апатитовых рудниках) и Ковдорского железорудного карьера. Разработана численная модель Хибинского массива с целью детального исследования его напряженного состояния и выделения зон повышенной энергонасыщенности. Разработана методология управления геодинамическими рисками, отличающаяся тем, что осуществляются прогноз и профилактика опасного по динамическим проявлениям участка геологической среды. Это делает надежным прогноз и более обоснованными — превентивные мероприятия. Методология реализуется на апатитовых рудниках. Предложен алгоритм управления геомеханическими процессами при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород для снижения геодинамических рисков, реализуемый при обосновании и планировании горных работ на рудниках и карьерах Кольского полуострова.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	
<b>В ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ</b> .....	8
1.1. Приборный комплекс для натуральных исследований деформаций бортов карьера (В. Н. Опарин, Ю. В. Чугуй, А. К. Поташиников, С. В. Плотников) ...	–
1.2. Лазерный дальномер для контроля деформаций горных пород (Ю. В. Чугуй, А. К. Поташиников, С. В. Плотников) .....	12
1.3. Тензометрические средства измерения для исследования поперечных деформаций скважин (В. Н. Опарин, В. Н. Федоринин, В. И. Сидоров) .....	13
1.4. Приборный комплекс для совместной регистрации электромагнитной эмиссии и деформаций в породном массиве (В. Н. Опарин, Г. И. Кулаков, Ю. В. Чугуй, А. К. Поташиников, С. В. Плотников) .....	17
1.5. Аппаратура регистрации электромагнитных сигналов в условиях горизонтальных выработок Таштагольского рудника (В. Н. Опарин, Г. Е. Яковицкая, А. Г. Вострецов, А. В. Кривецкий) .....	19
1.6. Двухканальный контроллер инкрементальных датчиков перемещения типа MS30 (А. Г. Вострецов, А. В. Кривецкий, А. А. Бизяев) .....	21
1.7. Видеокаротажный зонд (В. Н. Опарин, В. И. Востриков) .....	22
1.8. Аппаратура контроля виброакустических возмущений «Байкал-АС» (В. М. Семибаламут) .....	27
1.9. Многоканальный мобильный сейсмологический комплекс ИСК-3 для сейсмического мониторинга (А. А. Маловичко, Р. А. Дягилев) .....	28
1.10. Создание средств оперативной регистрации и интерпретации данных сейсмического мониторинга (Л. Н. Сенин) .....	29
1.11. Создание системы деформационного мониторинга техногенных землетрясений, горных ударов и взрывов для рудников Талнаха (В. Н. Опарин, В. И. Востриков) .....	32
1.12. Измерительно-управляющий комплекс «ЛАВА» для комплексного мониторинга физических параметров горного массива и методика измерения «медленных движений» (Н. И. Геза, В. И. Юшин) .....	36
1.13. Лазерная система измерения малых виброакустических колебаний при деформировании образцов горных пород (С. Н. Багаев, В. А. Орлов) .....	40
1.14. Измерительные приборы, системы и методы геомониторинга в условиях Хибинских месторождений Кольского полуострова (А. А. Козырев, В. И. Панин, С. Н. Савченко, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова) .....	43
1.14.1. Оценка удароопасности массива по контролю разрушения выработок .....	44
1.14.2. Телевизионная съемка скважин .....	48
1.14.3. Скважинный комплекс ультразвуковых измерений .....	50

1.14.4. Оценка удароопасности по данным контроля разрушения скважин .....	54
1.14.5. Техника контроля техногенных деформаций .....	56
1.14.6. Результаты геомониторинга напряженно-деформированного состояния пород в бортах карьера .....	57
1.14.7. Ретроспективный анализ сейсмичности Хибинского и Ловозерского массивов .....	64
Список литературы к главе 1 .....	67

## ГЛАВА 2

### РАЗВИТИЕ ОСНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ЭМИССИОННЫХ МЕТОДОВ

<b>ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ КРИТИЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД</b> .....	71
2.1. Исследование параметров сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов горных пород (Г. Е. Яковицкая, А. Г. Вострецов) .....	–
2.1.1. Методика и стенд для проведения экспериментальных исследований .....	72
2.1.2. Регистрация и анализ синхронных записей сигналов ЭМИ и нагрузки ..	73
2.1.3. Структурные особенности сигналов ЭМИ при многостадийном падении нагрузки в процессе разрушения образцов горных пород .....	80
2.1.4. Амплитудные характеристики сигналов электромагнитного излучения в моменты нарушения сплошности образцов мрамора .....	85
2.1.5. Трехстадийность процесса разрушения образцов горных пород на основании регистрации сигналов электромагнитного излучения ...	90
2.2. Обнаружение изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов неизвестной интенсивности (Г. Е. Яковицкая, А. Г. Вострецов, А. А. Бизяев) .....	95
2.2.1. Формулирование задачи обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов .....	96
2.2.2. Синтез алгоритма обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов .....	97
2.2.3. Пример реализации алгоритма обнаружения изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов .....	99
2.3. Особенности электромагнитного излучения массива горных пород в карьере «Ложок» и в отбитой массовым взрывом горной породе (Г. И. Кулаков) .....	101
Список литературы к главе 2 .....	107

## ГЛАВА 3

### РАЗВИТИЕ ОСНОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

#### ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

#### ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УКРАИНЫ

(А. В. Анциферов, М. Г. Тиркель, А. А. Глухов, А. С. Трифонов, В. В. Туманов) .....	111
3.1. Сейсмоопасность в Украине, методы и средства прогнозирования и мониторинга сейсмических явлений .....	112
3.2. Горные удары, газодинамические и сопутствующие явления, вызванные процессами отработки полезных ископаемых. ....	117
3.3. Основные методы прогноза горных ударов и газодинамических явлений .....	125

3.4. Моделирование характеристик сейсмических полей в углеродном массиве с учетом зон аномального горного давления . . . . .	131
3.5. Разработка методических основ диагностического сейсмического мониторинга геодинамического состояния горного массива над очистными работами при отработке угольных пластов . . . . .	160
3.5.1. Экспериментальные исследования по активному сейсмическому мониторингу горного массива над очистными работами . . . . .	161
3.5.2. Экспериментальное исследование пассивных сейсмических полей над очистными работами . . . . .	169
3.5.3. Экспериментально-методические основы диагностического сейсмического мониторинга горного массива над очистными работами . . . . .	171
Список литературы к главе 3 . . . . .	173

#### ГЛАВА 4

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА . . . . .

4.1. Характеристика объекта геомониторинга (А. В. Леонтьев, Н. А. Мирошниченко) . . . . .	–
4.2. Информационная модель геосреды (А. В. Леонтьев, Н. А. Мирошниченко) . . . . .	180
4.3. Триангуляция как основной метод построения информационной модели (А. В. Леонтьев, Н. А. Мирошниченко) . . . . .	182
4.3.1. Алгоритмы иерархической триангуляции . . . . .	183
4.3.2. Оценка качества триангуляции . . . . .	185
4.4. База данных информационной модели (А. В. Леонтьев, Н. А. Мирошниченко) . . . . .	186
4.4.1. Структура базы данных информационной модели . . . . .	187
4.4.2. Технология обработки первичной информации и ввода ее в базу данных информационной модели . . . . .	188
4.5. Реализация информационной модели на примере Таштагольского месторождения (А. В. Леонтьев, Н. А. Мирошниченко) . . . . .	190
4.6. Методика формирования информационной геомеханической модели строения бортов карьера (В. Н. Опарин, В. А. Середович, А. В. Иванов) . . . . .	191
4.6.1. Методика применения наземного лазерного сканирования для получения метрических характеристик блочных массивов горных пород . . . . .	193
4.6.2. Структурирование геоблоков по разломам, выделяемым в поверхностных слоях, и результаты выделения блочности . . . . .	200
4.7. Геоинформационное обеспечение системы сейсмодеформационного мониторинга (В. Н. Опарин, В. П. Потапов, А. С. Танайно) . . . . .	202
4.7.1. Условия формирования геомеханического пространства при разработке угольных месторождений Кузбасса . . . . .	203
4.7.2. Принципы создания систем геодинамического мониторинга . . . . .	209
4.7.3. Информационные аспекты регионального мониторинга геодинамических явлений . . . . .	210
4.7.4. Хранилище данных по угольной промышленности Кузбасса . . . . .	211

4.7.5. 3D модели и их реализация в задачах сейсмодиформационного мониторинга .....	219
4.7.6. Технология формирования виртуальных моделей .....	220
4.7.7. Проблемы создания информационного обеспечения системы сейсмодиформационного мониторинга .....	221
4.8. Методика прогнозирования свойств горных пород (В. Н. Опарин, В. П. Потапов, А. С. Танайно).....	222
Список литературы к главе 4 .....	230

## ГЛАВА 5

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И УПРАВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ НА РУДНИКАХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА (А. А. Козырев, В. И. Панин, С. Н. Савченко, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова) .....

Ю. В. Федотова) .....	234
5.1. Мониторинг геологической среды в природно-технических системах .....	–
5.2. Естественное напряженное состояние Хибинского массива горных пород и энергонасыщенность его блоков .....	238
5.3. Управление геодинамическими рисками при разработке удароопасных месторождений .....	243
5.3.1. Общие принципы управления геодинамическим риском .....	244
5.3.2. Модель эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горнорудной природно-технической системе .....	248
5.3.3. Экспертная система оценки геомеханической ситуации в руднике для выбора способов управления горным давлением при разработке апатитовых месторождений .....	250
5.3.4. Пространственно-временные закономерности развития техногенной сейсмичности при отработке Хибинских апатитовых месторождений .....	254
5.3.5. Оценка геодинамической опасности по комплексному критерию .....	262
5.4. Экспериментальные исследования процессов формирования и миграции энергонасыщенных зон при ведении горных работ .....	269
5.4.1. Общее состояние и современные представления о характерных особенностях и геомеханическом состоянии массива горных пород как среды функционирования горнорудных предприятий .....	–
5.4.2. Результаты геодезических измерений на полигонах рудников ОАО «Апатит» .....	271
5.4.3. Результаты и анализ перспектив применения методов спутниковой геодезии для целей геомеханического мониторинга массива пород в условиях рудников ОАО «Апатит» .....	276
5.4.4. Развитие сети измерительных полигонов для контроля геомеханического состояния массива пород и совершенствование методики обработки получаемых результатов .....	281
Список литературы к главе 5 .....	287
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	291





Рис. 1.2. Измерительный модуль скважинного прибора в сборе.

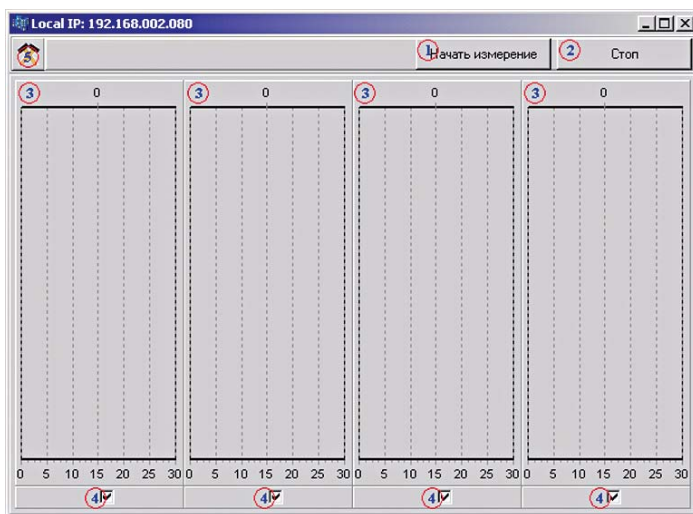


Рис. 1.4. Интерфейс управляющей программы.

Пяси. см. в тексте.

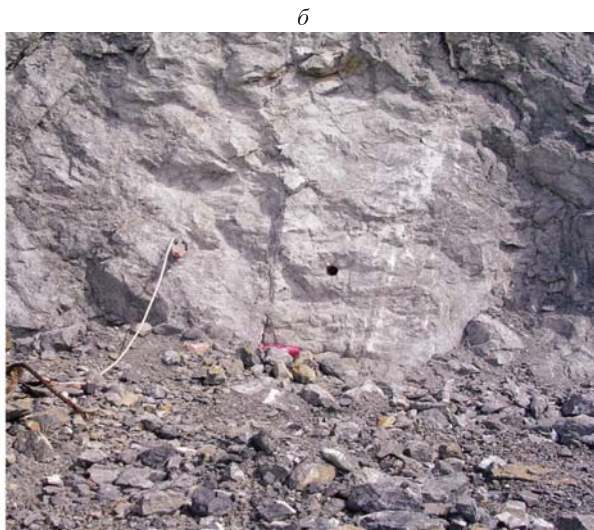


Рис. 1.5. Общий вид приборного комплекса после сборки в цехе (а) и размещение измерительного зонда в скважине (б) с присоединением кабеля для подключения к АЦП.

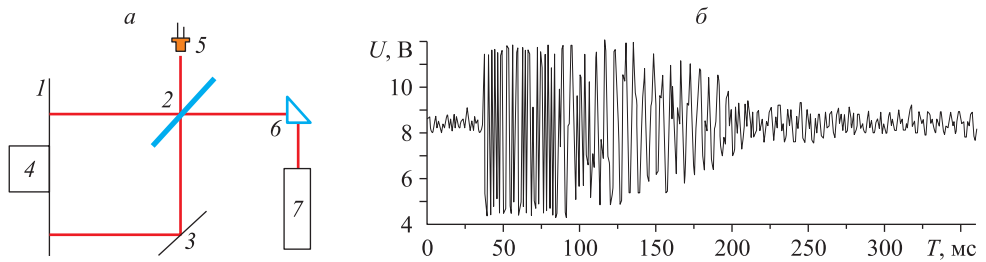


Рис. 1.7. Схема установки (а) на базе модифицированного интерферометра Майкельсона и вид сигнала (б), зарегистрированного с помощью лазерного микрофона.

1 — образец поверхности; 2 — светоделительная пластина; 3 — опорное зеркало; 4 — пьезокерамический излучатель; 5 — фотодетектор; 6 — отражатель; 7 — лазер.

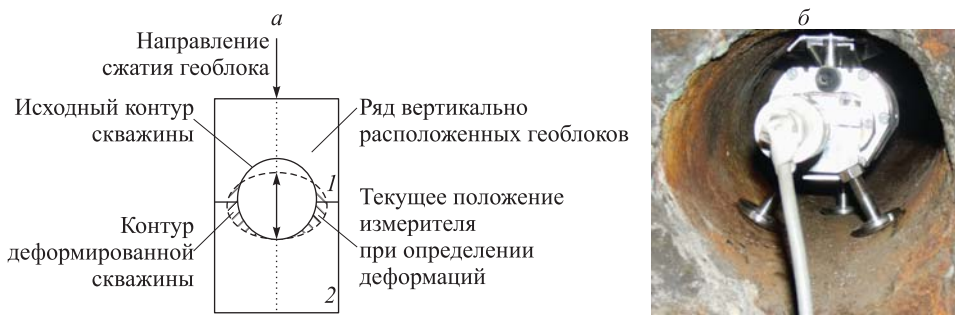


Рис. 1.8. Схема измерения поперечных деформаций в скважине при помощи деформометра с оптико-поляризационным датчиком (а) и размещение деформометра в скважине (б).

1, 2 — блоки геосреды.

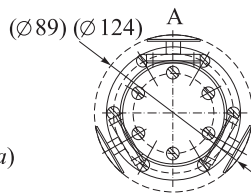
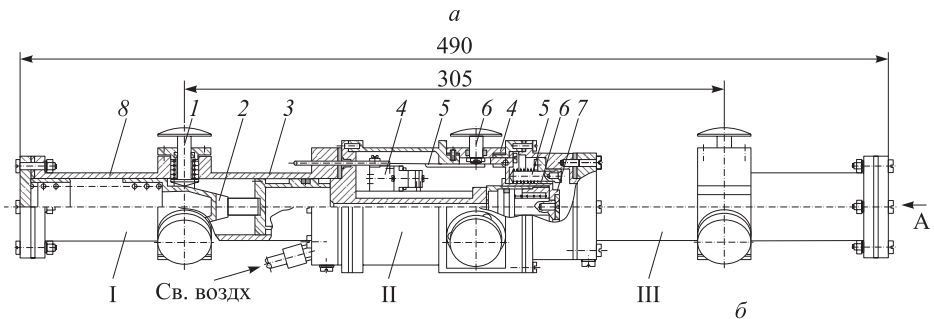


Рис. 1.10. Конструкция (а) внешний вид (б) зонда.

Поясн. см. в тексте.

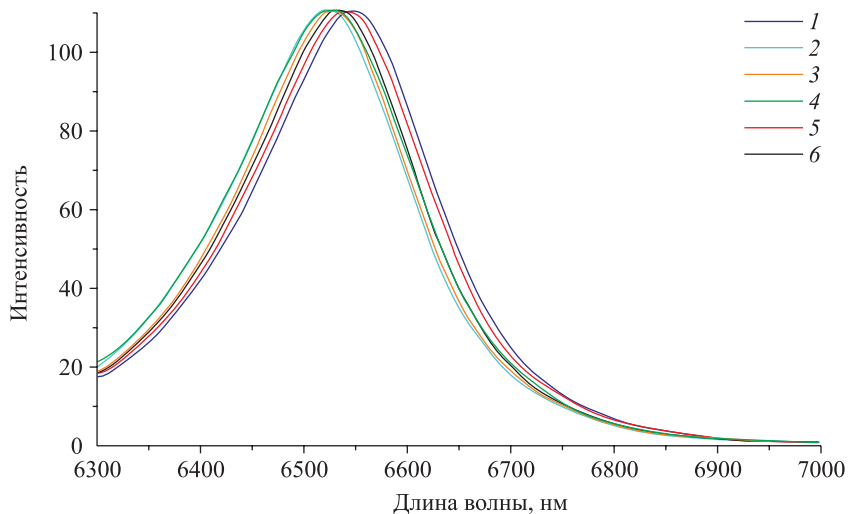


Рис. 1.11. Результаты испытаний датчика с изменением длины волны светодиода.  
 $T, ^\circ\text{C}$ : 20,50 (1), 20,83 (2), 21,58 (3), 24,08 (4), 26,83 (5), 29,58 (6).

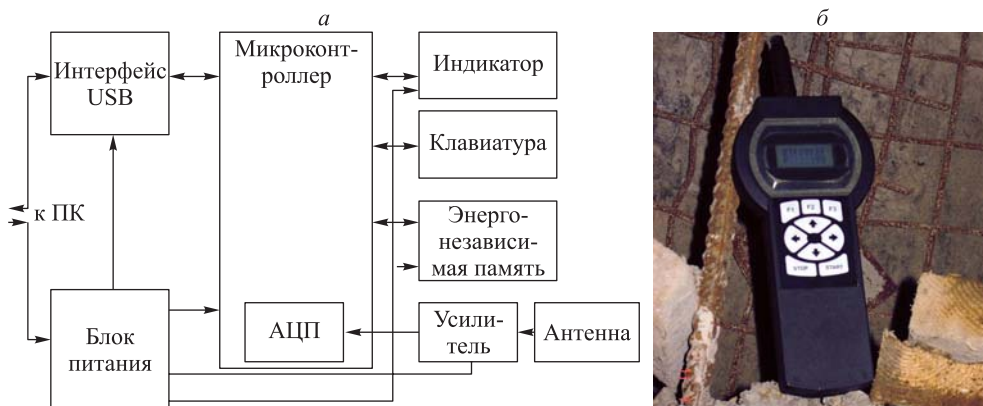


Рис. 1.17. Структурная схема (а) и внешний вид (б) прибора РЭМИ-3.

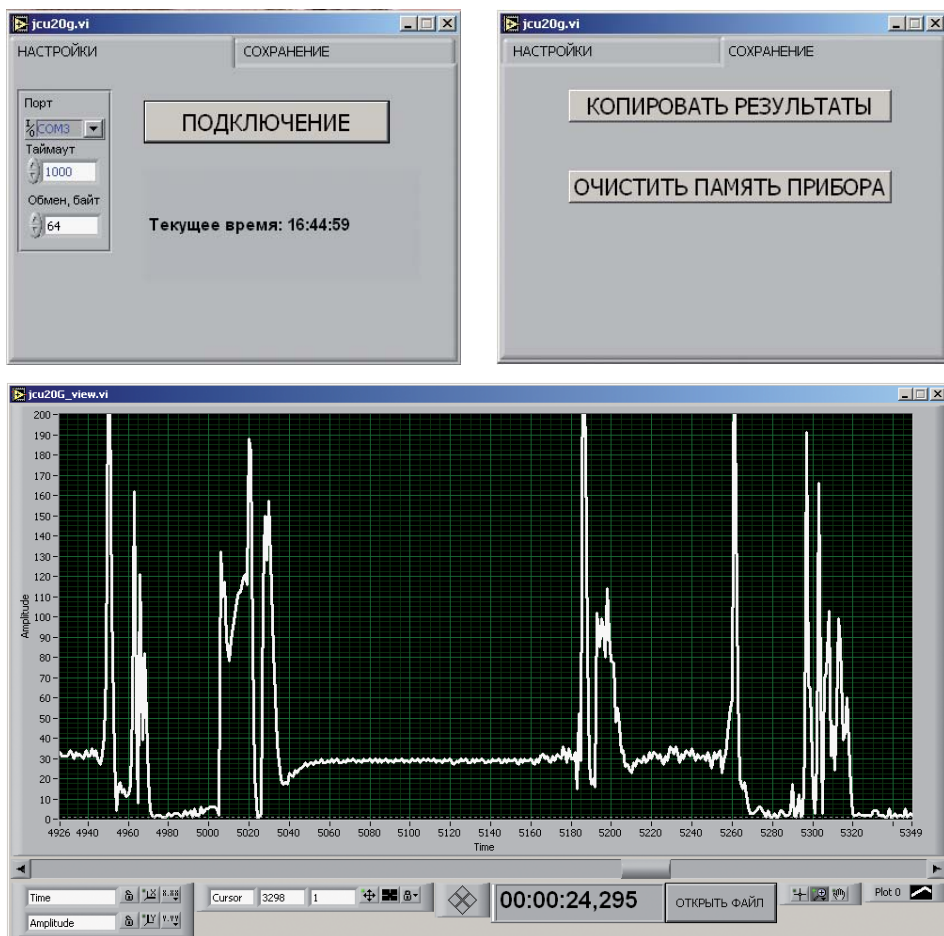


Рис. 1.18. Интерфейс программного обеспечения.



Рис. 1.22. Внешний вид прибора с контроллером и датчиком перемещения.

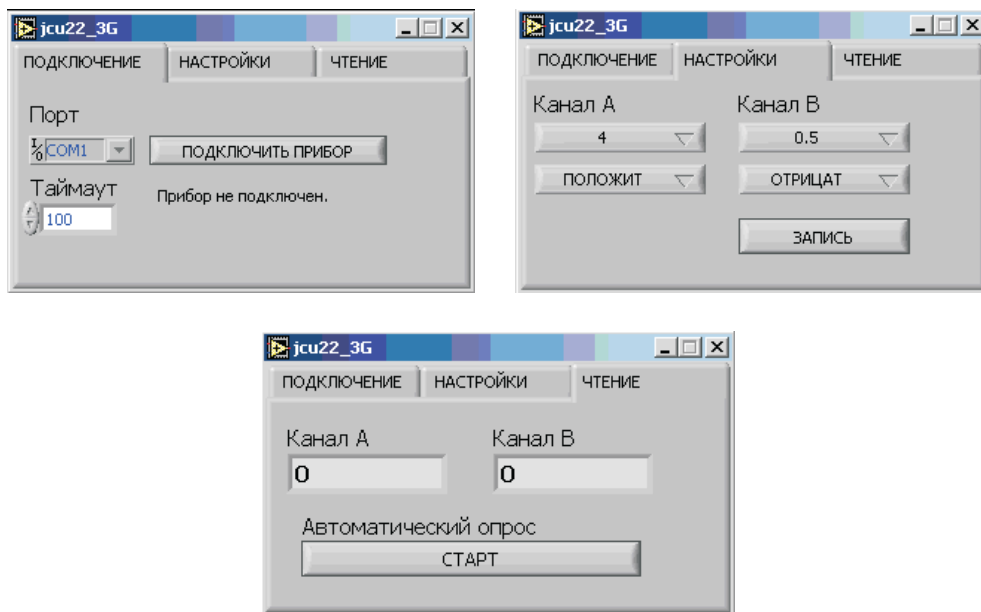


Рис. 1.23. Интерфейс программного обеспечения.

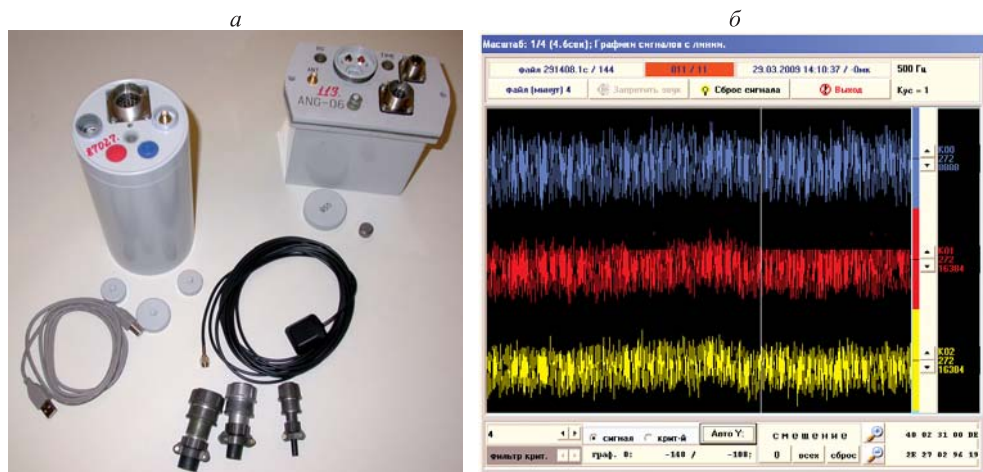


Рис. 1.28. Серия автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения «Байкал-АСН» (а) и режим прямой трансляции сейсмосигнала (б).



Рис. 1.30. Мобильные сейсмологические комплексы ИСК-3 с комплектами датчиков СМЗ-КВ.

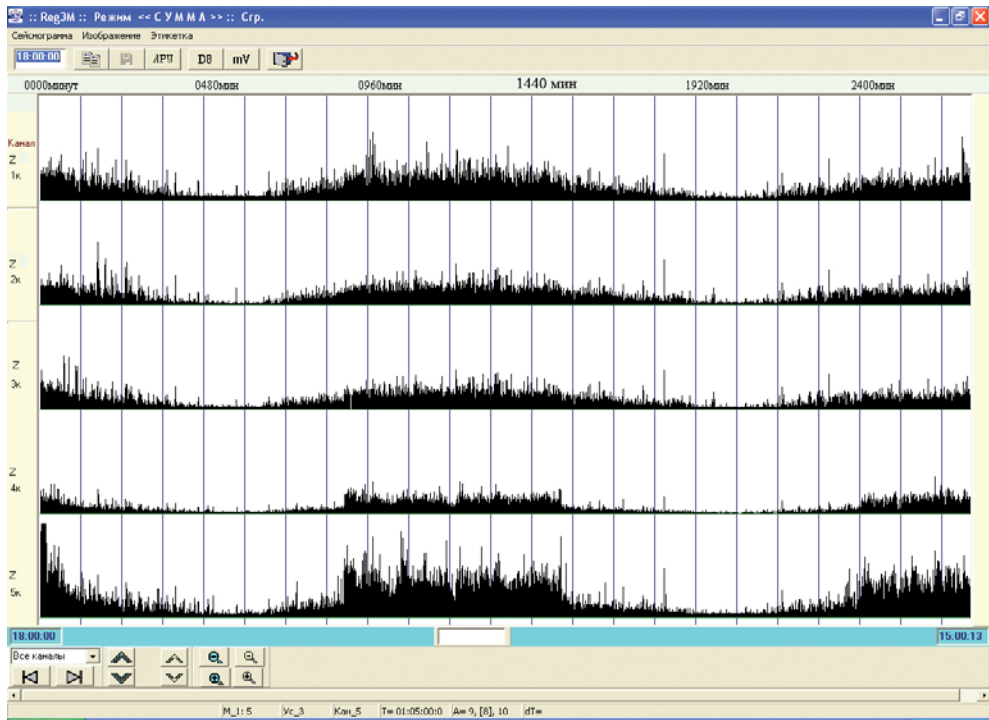


Рис. 1.32. Гистограммы энергии Z-компоненты сейсмического сигнала в пяти точках наблюдения, равномерно распределенных по площади.

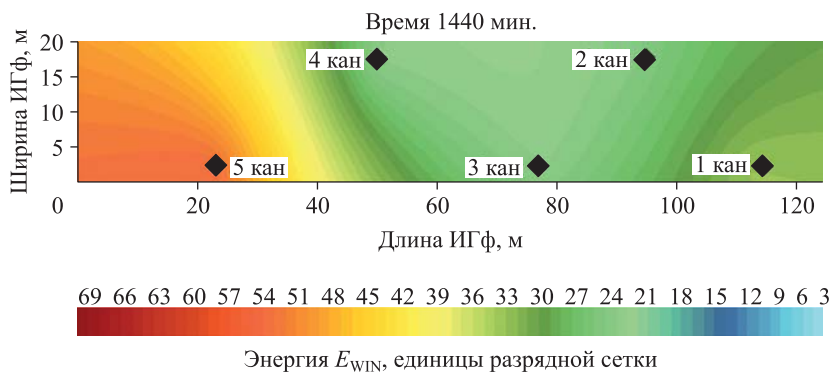


Рис. 1.33. Карта распределения энергии  $E_{WIN}$  Z-компоненты сейсмического сигнала для временной отметки 1440 мин. (черными ромбами отмечены точки размещения сейсмических регистраторов по площади).

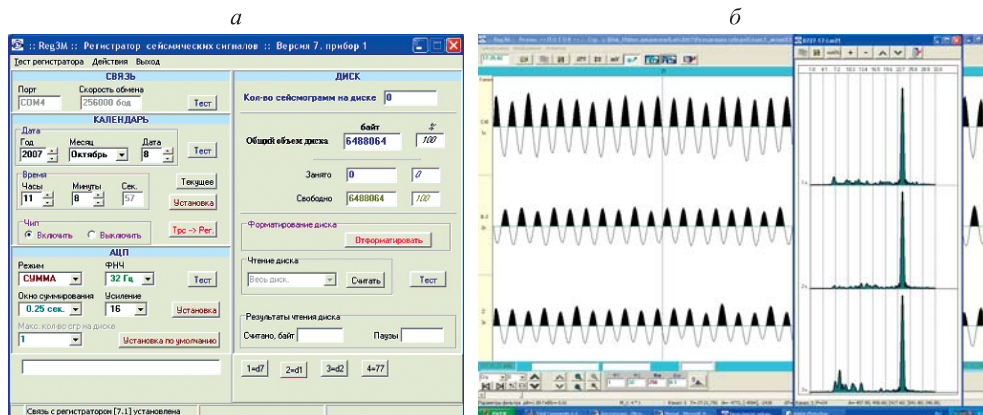


Рис. 1.34. Окно пользовательского интерфейса компьютерной программы регистратора «Регистр» (а) и виброграмма сигнала частотой 24 Гц с выделенным спектром в интервале окна визуализации (б).

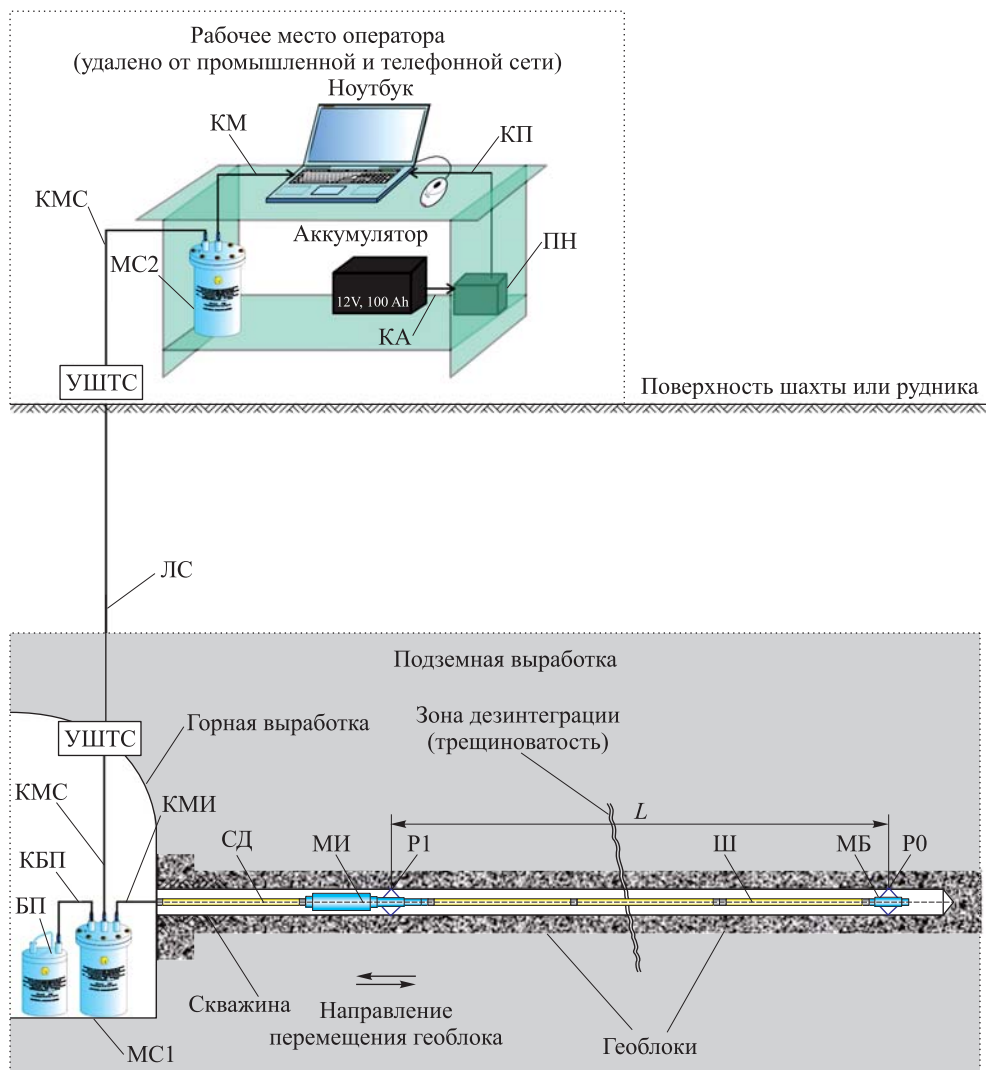


Рис. 1.35. Общая схема компоновки системы на базе приборного комплекса МОЭД-1п.

МБ — модуль базовый; Ш — штанга измерительная; МИ — модуль измерительный; СД — секция досылочной штанги; КМИ — кабель измерительного модуля; МС1 — модуль согласования измерительного модуля с линией связи; УШТС — коробка распределительная шахтная типа УШТС; БП — блок питания; КБП — кабель блока питания; ЛС — линия связи; МС2 — модуль согласования компьютера с линией связи; ПН — преобразователь напряжения; КМС — кабели соединительные для модулей согласования МС1 и МС2; КМ — кабель модема; КП — кабель преобразователя напряжения; КА — кабель аккумулятора; P0, P1 — точки реперная и контрольная;  $L$  — расстояние между точками P0 и P1.





Рис. 1.38. Состав и общий вид макета вибротсейсмического комплекса «ЛАВА».

Д1, Д2 — двигатели вибромодуля, мощность от 0,3 до 500 кВт (здесь 1,5 кВт). Ост. поясн. см. в тексте.

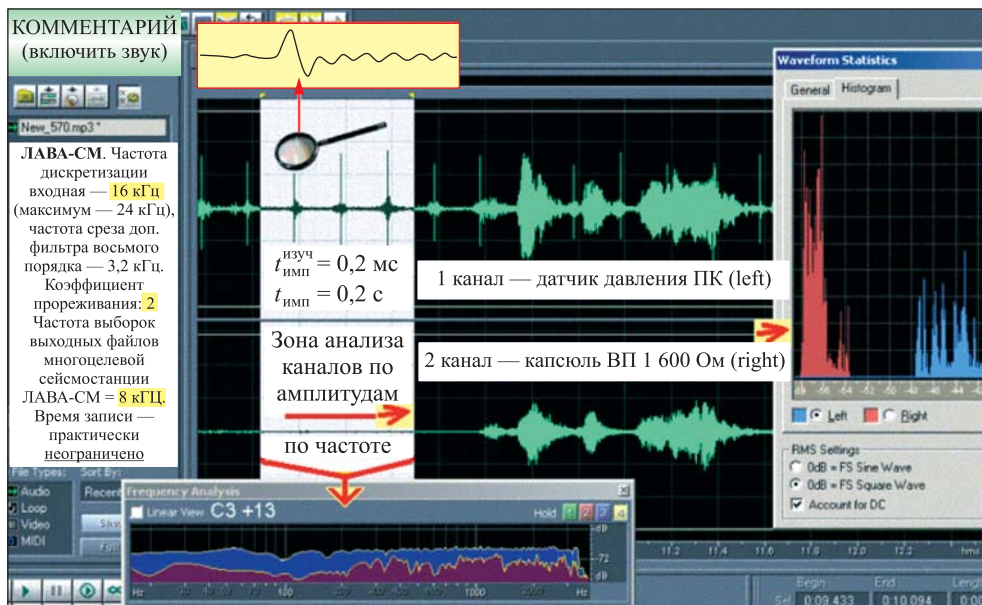


Рис. 1.39. Результат и условия тестирования «эмиссионного» режима.

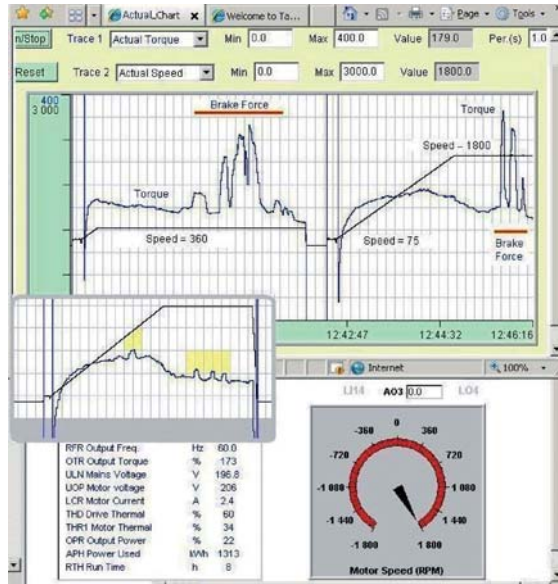


Рис. 1.40. Фрагмент панели дистанционного управления комплексом.

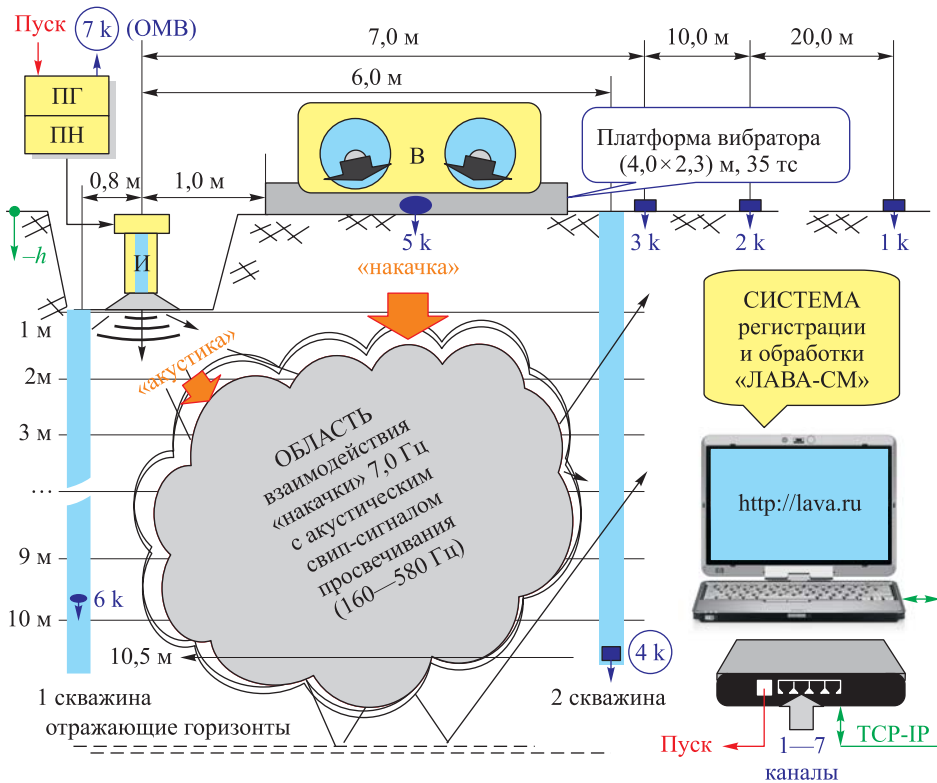


Рис. 1.41. Схема полевого эксперимента.

Поясн. см. в тексте.

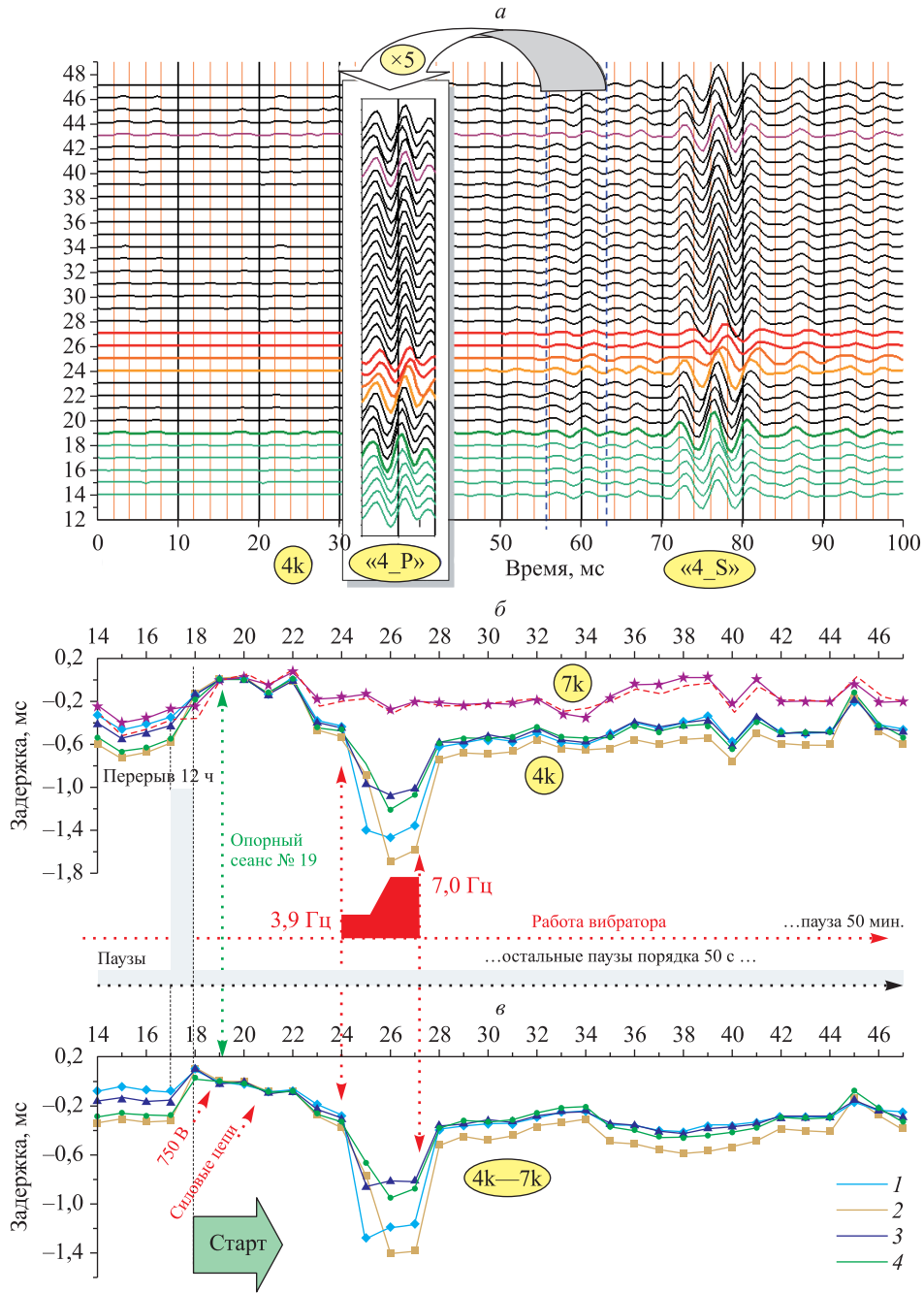


Рис. 1.42. Результаты эксперимента.

Поясн. см. в тексте.

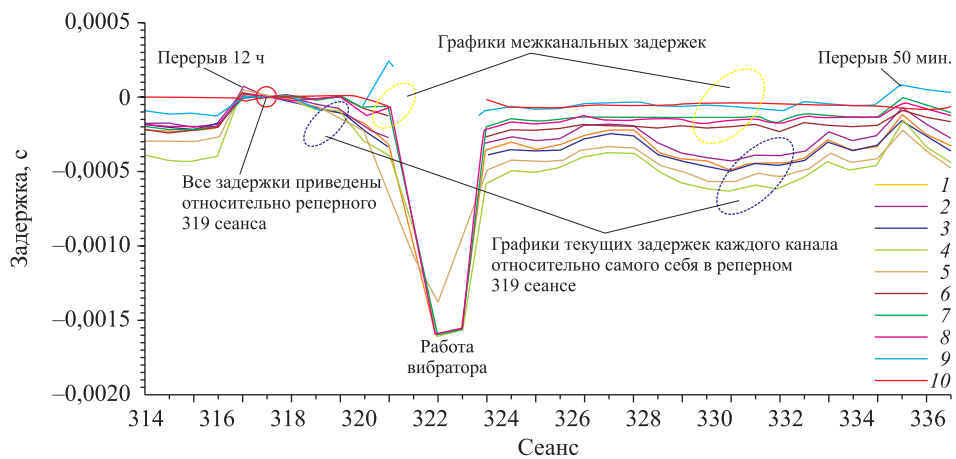


Рис. 1.43. Анализ разностных времен.

1 — канал 1, 2 — канал 2, 3 — канал 3, 4 — канал 4, 5 — канал 5, 6 — разность канал 4 – канал 2, 7 — канал 4 – 3, 8 — канал 4 – 1, 9 — канал 4 – 5, 10 — канал 3 – 2.

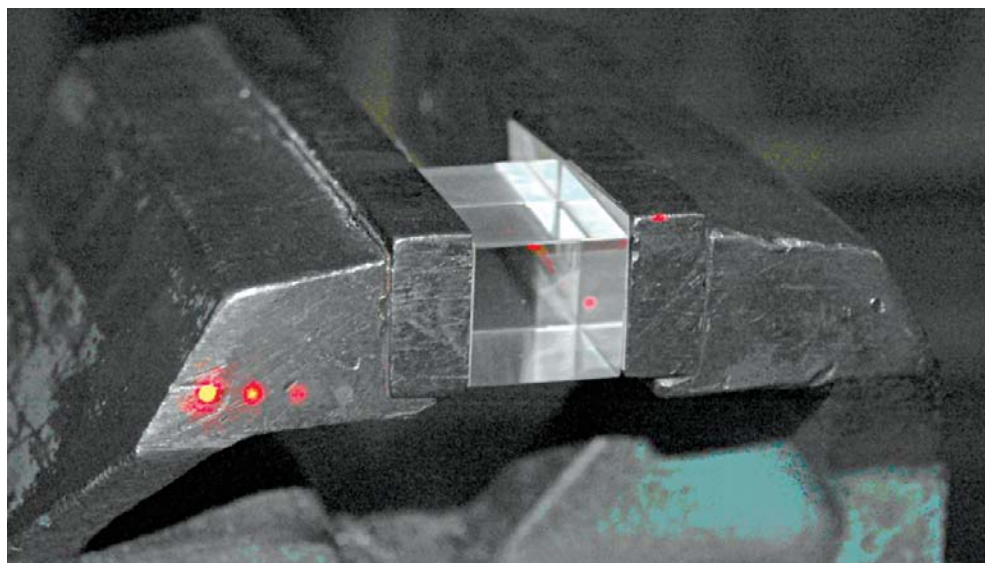


Рис. 1.46. Одноосное нагружение образца из органического стекла с регистрацией процесса деформирования.

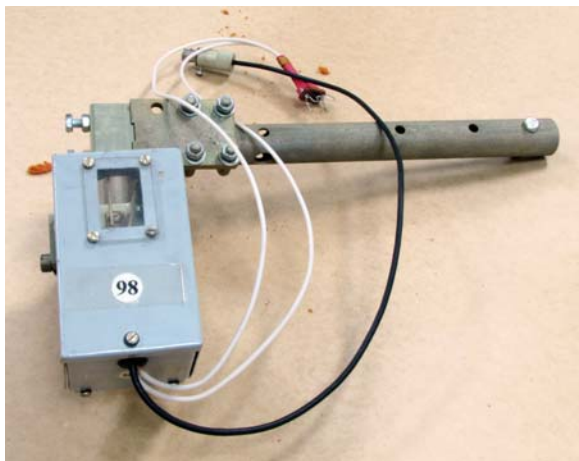


Рис. 1.66. Кварцевый наклонмер КН (справа) и датчик кварцевого деформометра КД (слева).

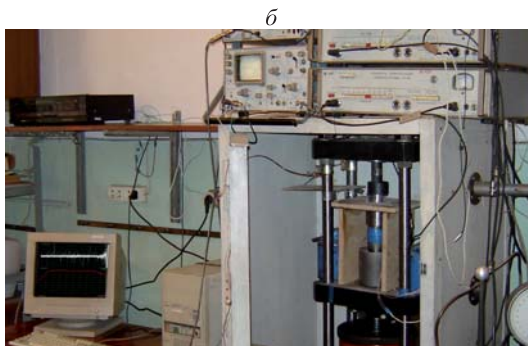
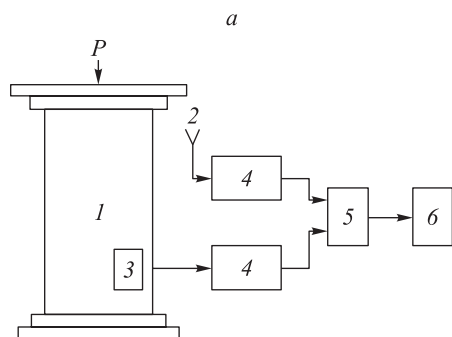


Рис. 2.1. Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований на образцах горных пород (а) и внешний вид стенда для синхронной регистрации сигналов ЭМИ и нагрузки (б).

Поясн. см. в тексте.

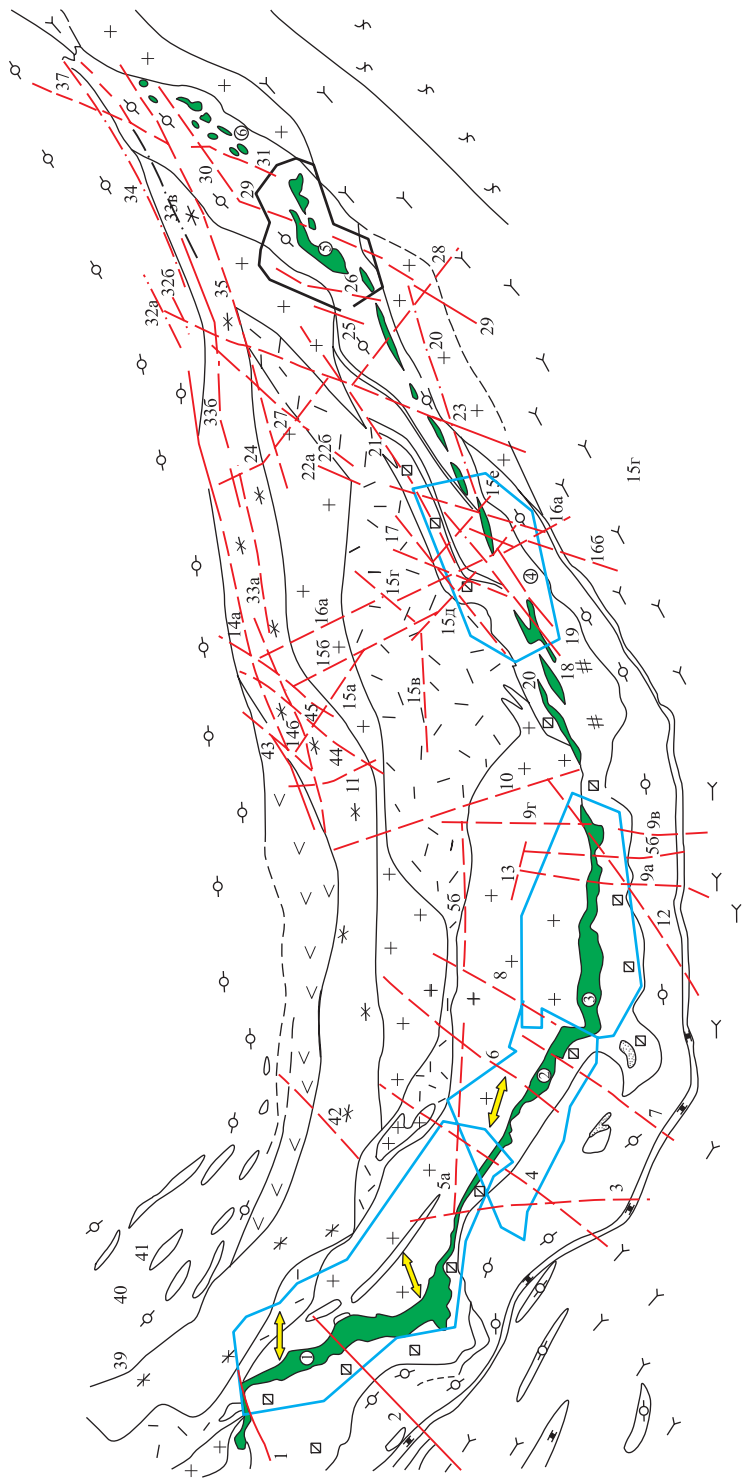


Рис. 1.75. Тектоноструктурная схема хибинских апатит-нефелиновых месторождений.

Зеленым цветом выделены рудные зоны, красным — разломы 3—4-го ранга, синим — границы горных отвалов карьеров и подземных рудников, желтые стрелки — направления горизонтальных напряжений в массиве.

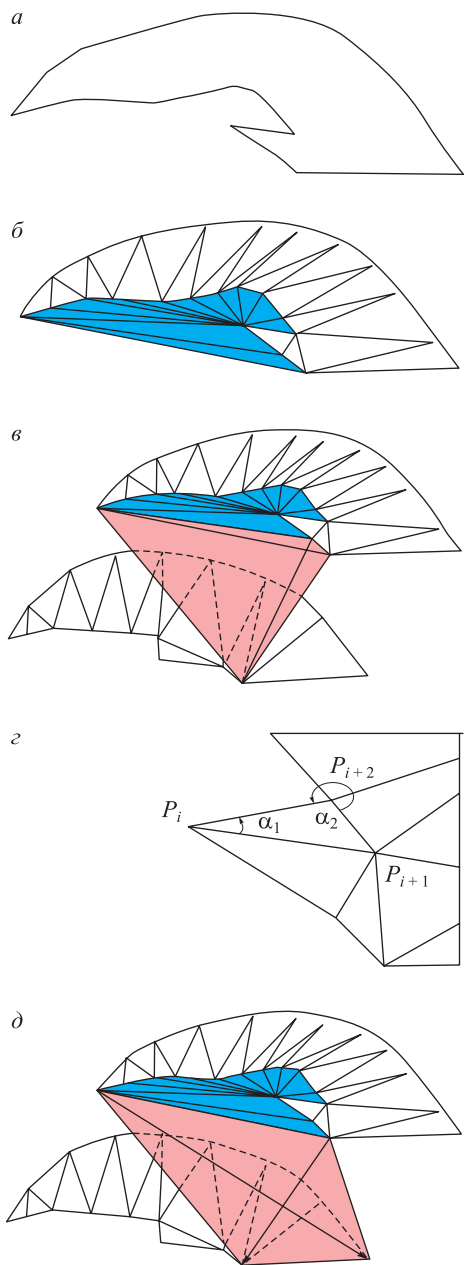


Рис. 4.2. Схема алгоритма объемной триангуляции.  
Поясн. см. в тексте.

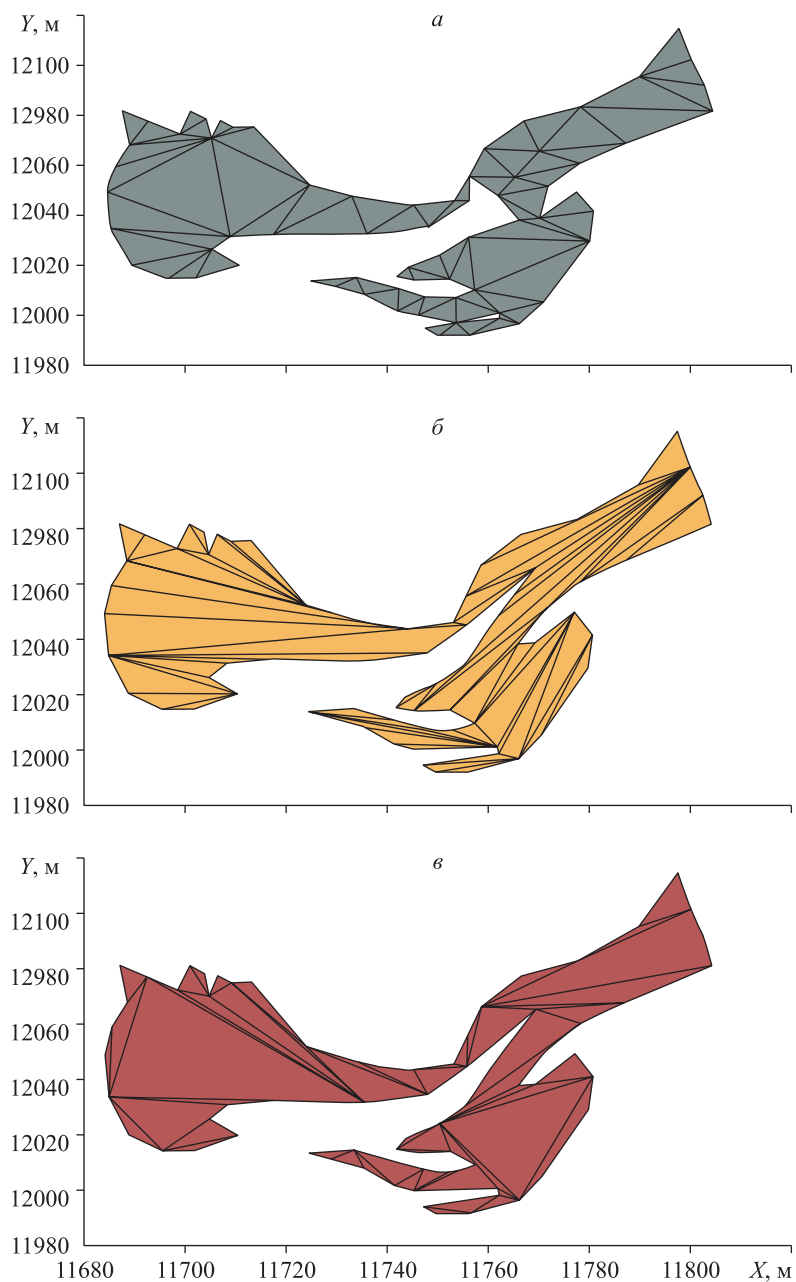


Рис. 4.4. Триангуляция сечений фрагмента рудного тела на основе критериев:  
*a* — Делоне; *б* — максимального периметра треугольников; *в* — максимальной площади треугольников.



Научное издание

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ  
СЕЙСМОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА  
ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ГОРНЫХ УДАРОВ  
Том 1**

Интеграционные проекты СО РАН  
Вып. 24

Редактор *Н. А. Лившиц*  
Технический редактор *Н. В. Бутакова*  
Корректор *Н. В. Счастлива*

---

Подписано в печать с оригинал-макета 3.03.2010  
Уч.-изд. л. 27. Усл. печ. л. 27,05. Формат 70×100/16  
Тираж 500 экз. Заказ № 66

---

Издательство СО РАН  
630090, Новосибирск, Морской просп., 2  
E-mail: [psb@ad-sbras.nsc.ru](mailto:psb@ad-sbras.nsc.ru)  
тел. (383) 330-80-50  
Интернет-магазин Издательства СО РАН  
<http://www.sibran.ru>