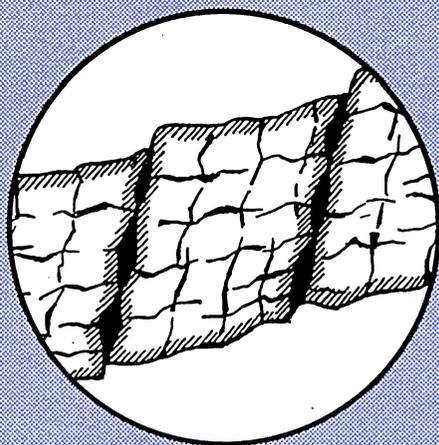
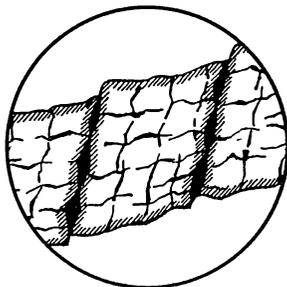


И.М.Петухов
И.М.Батугина



И.М.Петухов
И.М.Батугина

ГЕОДИНАМИКА НЕДР



**2-е издание,
переработанное и дополненное**

Москва
«НЕДРА КОММЮНИКЕЙШЕНС ЛТД»
1999

УДК 622.83
ПЗ1

ПЕТУХОВ Игнатий Макарович, БАТУГИНА Ида Михайловна

ГЕОДИНАМИКА НЕДР

Научное издание

2-е издание, переработанное и дополненное

Петухов И.М., Батугина И.М.

ПЗ1 Геодинамика недр. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Недра коммуни케이션с ЛТД», 1999. – 256 с.: ил.

ISBN 5-85723-013-6

Изложены научные основы геодинамики недр и методы геодинамического районирования применительно к разработке твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых. Рассмотрены перспективы развития этой новой науки о Земле для решения задач повышения геодинамической безопасности и эффективности освоения недр и земной поверхности. Во втором издании (1-е изд. – 1996) отражена методика геодинамического районирования океанического дна, уточнена природа горизонтальных сил в земной коре с использованием теории литосферных плит, сформулированы перспективы решения задач геодинамики недр.

Для научных, инженерно-технических работников горнодобывающей промышленности. Может быть полезна студентам горных вузов и факультетов.

Табл. 17, илл. 125, список лит. – 58 назв.

УДК 622.83

ISBN 5-85723-013-6

© И.М.Петухов, И.М.Батугина, 1996, 1999.

© Оформление. SPSL, 1999.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Предмет и содержание геодинамики недр	9
Глава 2. О теории литосферных плит	13
2.1. Общие понятия	13
2.2. Об основах тектоники литосферных плит	14
2.3. Границы литосферных плит	17
2.4. Внутриплитные тектонические процессы	22
2.5. Замечания к приведенному выше обзору	22
Глава 3. Предельно напряженное состояние массива горных пород	27
3.1. Особенности поведения массива горных пород в зонах предельно напряженного состояния	27
3.2. Разнообразие условий возникновения в массиве горных пород зон предельно напряженного состояния	40
3.3. Некоторые обобщения	55
Глава 4. Природа и величина горизонтальных сил в литосфере	58
4.1. О геодинамике земной коры и литосферы	58
4.2. Природа горизонтальных сил в литосфере	63
4.3. Величина горизонтальных сил	69
4.4. Влияние планетарных сил на состояние земной коры	74
Глава 5. Оценка величин главных напряжений в литосфере	87
5.1. Формулирование граничных условий	87
5.2. Схемы расчета главных напряжений	89
5.3. К оценке напряженного состояния в литосфере	95
5.4. Возможность использования и совершенствования разработанных методов оценки напряженного состояния в литосфере	108
Глава 6. Паспорт прочности массива горных пород по глубине литосферы	110
6.1. Построение паспорта прочности на сдвиг	110
6.2. Исследование свойств горных пород в условиях, приближенных к натурным	112
Глава 7. Геодинамическое районирование недр	117
7.1. Методологические основы и содержание метода геодинамического районирования недр	117
7.2. Выделение блочной структуры массива горных пород	125
7.3. Выявление динамического взаимодействия блоков	133
7.4. Классификация участков земной коры по напряженности и геодинамической опасности	138
7.5. Оценка напряженного и газогидродинамического состояния массива горных пород	149

7.6. Опыт применения метода геодинамического районирования недр	155
Глава 8. Особенности геодинамического районирования дна океана	181
8.1. Особенности методических подходов применительно к Тихому океану	181
8.2. Геодинамическое районирование в целях изучения металлогении Мирового океана	190
Глава 9. Природа и классификация геодинамических явлений	200
9.1. Природа и энергетические особенности геодинамических явлений	200
9.2. Классификация геодинамических явлений	209
Глава 10. Управление геодинамическим состоянием массива горных пород при освоении недр и земной поверхности	215
10.1. Постановка вопроса	215
10.2. При разработке твердых полезных ископаемых	216
10.3. При разработке нефтяных и газовых месторождений	235
10.4. При проектировании и эксплуатации трубопроводов, железных дорог и других линейных объектов	242
10.5. При строительстве и эксплуатации ответственных сооружений и городов	243
10.6. При бурении глубоких и сверхглубоких скважин	244
10.7. Опыт применения микросейсмического метода для оценки напряженного состояния массива горных пород	247
Глава 11. К управлению геодинамической безопасностью в районах, подверженных землетрясениям	254
11.1. Постановка вопроса	254
11.2. Некоторые сведения о состоянии обеспечения безопасности в сейсмически активных регионах	256
11.3. Опыт решения проблемы горных ударов на угольных шахтах	264
11.4. Разработка дополнительных мер безопасности в районах, подверженных землетрясениям	265
Глава 12. Предпосылки к созданию общей теории толчкообразного деформирования массива горных пород	271
12.1. Концепция о предельно напряженном состоянии земной коры	271
12.2. Оценка и прогноз состояния массива горных пород на основе метода геодинамического районирования	274
12.3. Энергетически-силовая теория и классификация динамических явлений	276
12.4. Отдельные показатели поведения массива горных пород в зонах предельно напряженного состояния	277
Глава 13. Направления и перспективы развития геодинамики недр	279
Заключение	282
Список литературы	284

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблемы геодинамической безопасности при освоении недр и земной поверхности решаются в настоящее время в России на основе новой отрасли наук о Земле – геодинамики недр, представляющей собой взаимодействие двух систем: природной и техногенной [42].

Начиная с 1996 г. под руководством Академии горных наук и Госгортехнадзора России начала выполняться Межотраслевая координационная программа «Геодинамическая безопасность», включающая в себя двадцать пять крупных проблем, касающихся разных отраслей, занимающихся освоением недр и земной поверхности в условиях, опасных по таким геодинамическим явлениям, как горные удары, выбросы угля, породы и газа, горно-тектонические удары и выбросы, техногенные землетрясения, явления, возникающие при взаимодействии элементов блочной структуры, прорывы воды и др. В выполнении программы участвуют многие академические, отраслевые и учебные институты (головной институт ВНИМИ), соответствующие производственные организации и органы Госгортехнадзора.

К решению такой обширной «Программы», не имеющей аналогов в мировой науке и практике, российские ученые и производственники смогли прийти, имея на протяжении последних пятидесяти лет богатый опыт успешного решения ряда важнейших проблем, в первую очередь, применительно к безопасности ведения горных работ в угольной и горнорудной промышленности.

Одной из характерных особенностей последних пятидесяти лет в угольной промышленности явилось возрастание глубины разработки в 3 раза. Это, прежде всего, обострило решение проблем горных ударов и выбросов, проблем, до сих пор не достаточно решенных в мировой практике. В начале пятидесятых годов только на трех шахтах Кизеловского угольного бассейна происходило до 80 крупных горных ударов в год, часто с тяжелыми последствиями. Минуглепром СССР поручил

решение этой проблемы институту ВНИМИ. В последующие годы была разработана энергетическая теория горных ударов, создан и внедрен комплекс эффективных мер их предотвращения и, в первую очередь, осуществлен переход на безцеликовую отработку угольных пластов. В результате, несмотря на то, что количество опасных шахт с увеличением глубины разработки в странах СНГ возросло до 200, горные удары стали единичными явлениями, возникающими лишь в случаях нарушения установленных требований ведения работ.

Остро стояла проблема с выбросами угля, породы и газа, особенно для Донецкого, Кузнецкого, Карагандинского бассейнов: в шестидесятые годы происходило до 100 опасных выбросов в год. Решением проблемы занимались институты ИГД им. А.А.Скочинского (головной), ВНИМИ, МакНИИ, ВостНИИ, ИГТМ, ряд институтов РАН. Была разработана энергетически-силовая теория выбросов, комплекс мер предотвращения выбросов, в том числе таких мер регионального характера, как опережающая отработка защитных пластов, дегазация и увлажнение опасных пластов в разгруженных зонах, ведение работ без целиков и др. К 1990 г. количество опасных выбросов угля и газа на шахтах стран СНГ удалось сократить в 5 раз, прекратились выбросы породы и газа.

В настоящее время заканчивается создание «Единой инструкции по предотвращению горных ударов и выбросов на угольных шахтах на базе разработанных во ВНИМИ основ общей теории этих явлений».

Начиная с 1974 г. работы по борьбе с горными ударами на рудниках велись в соответствии с комплексной программой, утвержденной ГКНТ Миннауки. В работах участвовали многие институты (головной институт ВНИМИ). Контроль осуществлялся Госгортехнадзором страны. Достигнуто снижение количества горных ударов на рудниках в 6 раз несмотря на значительное увеличение глубины работы рудника за прошедшие четверть века. В 1996–1998 гг. опасных горных ударов на рудниках не происходило. Отдельные случаи горно-тектонических ударов, вызываемых массовыми взрывами по отбойке руды, например на Таштагольском руднике, опасности не представляют, если, конечно соблюдается установленный режим ведения работ.

В последние годы участились геодинамические явления при разработке нефтяных и газовых месторождений, при эксплуатации железных дорог, протяженных трубопроводов, подземных и наземных сооружений; необходимо осуществление контроля геодинамической безопасности на атомных станциях, в местах захоронения вредных отходов.

Решение крупных проблем по прогнозу и предотвращению динамических явлений в шахтах заставило ВНИМИ и другие институты заниматься многими нестандартными научными подходами и мет

дами. В последние двадцать лет это вылилось в создание новой отрасли наук о Земле – геодинамики недр [42]. Основной ее комплексный метод – метод геодинамического районирования недр, позволяющий изучать блочное строение горного массива, его естественное напряженное состояние и вписывать влияние техногенной деятельности в существующее природное состояние массива. Таким образом, геодинамика недр – это единство природной и техногенной систем, рассматриваемое с позиций обеспечения максимальной геодинамической безопасности при освоении недр и земной поверхности.

Указанное, в конечном счете, привело к созданию Межотраслевой координационной программы «Геодинамическая безопасность», упоминавшейся выше. Программа предусматривает выполнение научно-исследовательских, проектно-конструкторских и горно-экспериментальных работ по развитию теории, разработке и освоению комплекса мер безопасной и эффективной эксплуатации угольных, рудных, нерудных, нефтяных и газовых месторождений, других объектов освоения недр, склонных к геодинамическим явлениям.

Большие задачи перед геодинамикой недр стоят в области поддержания выработанных пространств, в том числе при их последующем использовании для хранения веществ и материалов, захоронения вредных отходов, обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов и других объектов освоения земной поверхности.

Существенные возможности имеются при решении вопросов безопасного использования энергии горного давления при добыче полезных ископаемых и бурении скважин, в том числе сверхглубоких на основе открытия № 337* и изучения условий разрушения пород на специальных стендах, в том числе на шавильной установке «Гео-энергия», имитирующей натурные (соответствующие глубинам до 12–15 км) термодинамические условия при испытаниях крупногабаритных образцов.

Основная задача геодинамики недр – создание теории толчкообразного деформирования массива горных пород на базе уже имеющихся разработок и предпосылок. Эта теория будет основой решения вопросов прогноза и предотвращения геодинамических явлений, включая горнотектонические удары и выбросы, техногенные землетрясения при разработке месторождений полезных ископаемых всех видов, а также будет полезной в совершенствовании подходов при повышении безопасности в сейсмически активных регионах земной коры.

* Закономерность разрушения горных пород в подземных условиях. / И.М.Петухов, В.П.Кузнецов, А.Н.Зорин и др. Диплом на открытие № 337. Приоритет от 18 апреля 1968 г.

Решение проблемы управления геодинамическим состоянием массива горных пород должно сопровождаться созданием автоматизированной экспертной системы, предусматривающей программное обеспечение оценки естественного и техногенного состояний массива, технологических решений и контроля за состоянием массива в процессе их практического осуществления.

Характерной особенностью решения проблем геодинамической безопасности в последние 40–50 лет в нашей стране является то, что органы Госгортехнадзора активно участвуют в разработке и реализации научных программ, что способствует своевременной постановке и решению вопросов безопасного освоения недр и земной поверхности.

Постановка проблемы управления геодинамическим состоянием, кардинального повышения эффективности, безопасности и экологической чистоты освоения недр и земной поверхности не имеет аналогов в мировой горной науке и практике.

ПРЕДМЕТ И СОДЕРЖАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ НЕДР

Земная кора за 4–5-миллиардный период своего формирования претерпевала сложнейшие изменения, обусловленные воздействием многочисленных внутренних и внешних сил и процессов. Чрезвычайная сложность ее строения, многообразие физико-механических свойств слагающих ее пород, многие нераскрытые или еще недостаточно раскрытые закономерности поведения земной коры в целом и в ее отдельных участках ставят крупные и не всегда посильные задачи перед науками о Земле.

Как известно, в науку геодинамика Земли вкладывается понятие о движении, силовом взаимодействии структурных элементов, составляющих земную кору, о землетрясениях, их энергии и прогнозе, о горообразовании и других событиях, связанных с земной корой в ее естественном состоянии. В области изучения строения, напряженного состояния земной коры и изменения их во времени и в пространстве в последние десятилетия сделано много [11, 12, 14, 19, 47, 49, 52, 57 и др.].

В работе [14] достаточно четко определены имеющиеся подходы в области геодинамики. Выдвинутая А.Вегенером концепция о тектонике плит, в 1960-е годы превратилась в новую теорию тектоники литосферных плит. Формирование главнейших структур земной коры и литосферы Земли в целом определяется горизонтальным движением и взаимодействием сравнительно немногих пластин литосферы, которые наращиваются в одних зонах и поглощаются, уходя в мантию, в других. Конвективные течения материала материи Земли являются при этом наиболее вероятным движущим механизмом. Геодинамика вследствие этого включает в себя тектонику литосферных плит и глубинные динамические процессы, т.е. крупные перемещения масс веществ и энергии в земных недрах [14].

Аналогичные взгляды на эти главные вопросы геодинамики высказываются в работах [11, 32, 49]. Однако некоторые ученые не признают теорию тектоники плит. Наиболее определенно об этом говорится, например, в работе [19], в которой основное внимание в поисках закономерностей развития Земли уделяется концепции ее расширения.

В настоящей работе теория тектоники плит принимается за основу, как наиболее полно отражающая процессы и явления геодинамики, однако с некоторыми изменениями и дополнениями, высказанными ранее в работах [40–43].

Геодинамика Земли изучает поведение и взаимодействие литосферных плит и их отдельных участков в естественном состоянии. При освоении же и эксплуатации недр приходится рассматривать не только процессы и явления, происходящие в земной коре в ее естественном состоянии, но и процессы, явления и закономерности, обязанные своим существованием техногенной деятельности человека. Чтобы осваивать и эксплуатировать недра безопасно, экологически чисто и экономически выгодно, необходимо знать их строение, особенности, напряженное и газогидродинамическое состояние на данный момент и прогнозировать это состояние на определенное время вперед с учетом степени и характера техногенного воздействия на массив горных пород и земную поверхность. Многие элементы геодинамики получили разработку применительно к техногенному воздействию при освоении недр, особенно при разработке месторождений полезных ископаемых. Сюда прежде всего относятся проблемы горных ударов и выбросов, при решении которых в последние сорок лет разработаны энергетическая теория горных ударов и энергетически силовая теория выбросов, разрабатывается общая теория этих явлений, создан и широко внедряется комплекс мер по профилактике их в шахтах и рудниках горнодобывающих стран мира. Разработаны способы управления горным давлением в очистных, капитальных и подготовительных выработках при подземной эксплуатации угольных, рудных и нерудных месторождений. Много сделано в вопросах изучения сдвижения горных пород при подземных и открытых разработках полезных ископаемых, включая прогнозные расчеты параметров сдвижения; имеются серьезные разработки в вопросах прогноза и профилактики техногенных землетрясений.

На основе использования достижений наук о Земле, включая и упомянутые достижения геомеханики массива горных пород, в последние пятнадцать лет в России были сформулированы концепция, задачи и методы исследований новой отрасли наук о Земле – *геодинамика недр* [4, 42]. Геодинамика недр рассматривает вопросы безопасного и эффективного освоения недр и земной поверхности с учетом характера

и интенсивности техногенного воздействия на массив горных пород, современного геодинамического состояния литосферы.

Геодинамика как новая отрасль наук о Земле отражает единство и взаимодействие природной и техногенной систем в системе горного массива земной коры. При этом имеется в виду, что:

природная система представляет собой объективное единство и взаимодействие элементов блочной структуры земной коры, ее напряженно-деформированного и газогидродинамического состояния, находящихся в определенных связях;

техногенная система – единство и взаимодействие элементов, явлений и процессов при техногенной деятельности в земной коре, находящихся в определенных связях, устанавливаемых по воле человека.

Эта новая постановка вопроса предполагает анализ и развитие существующих представлений и понятий о природной и техногенной системах, с последующим изысканием их взаимодействия в целях обеспечения безопасного и эффективного освоения недр земли и земной поверхности.

Геодинамика недр, используя разработанный метод геодинамического районирования [4], позволяет выделять блочное строение земной коры, активные разломы и тектонически напряженные зоны, производить расчеты напряжений, проницаемости и влагогазоемкости пород и разрабатывать на этой основе профилактические меры для обеспечения безопасности и эффективности освоения и эксплуатации недр.

Земная кора и литосфера в целом состоит из двух десятков плит, постоянно взаимодействующих друг с другом. На этих плитах «плавают» континенты и океаны. Силовое взаимодействие плит приводит к дроблению их на мегаблоки, блоки различных размеров и конфигурации вплоть до макроструктуры пород, обнаруживаемой при ведении горных работ и строительстве подземных сооружений. Если учесть чрезвычайное многообразие литологических разностей пород, их слоистость, насыщенность жидкостью и газами, различие физических, фазовых и химических пород, их постоянное силовое и химическое взаимодействие, изменение этих свойств в зависимости от напряженного состояния и температуры, то можно в известной мере представить себе всю сложность строения и свойств земной коры и литосферы в целом, изменяющихся в пространстве и времени.

Постоянное движение плит в литосфере, их силовое взаимодействие, взаимовлияние оболочек Земли и околоземного пространства, влияние лунно-солнечных приливов (отливов) и других планетарных сил и процессов, колебание силы и направленности действия магнетизма и электрических полей Земли приводит к крайней нестабильности строения и поведения земной коры, их изменчивости. Одна часть этих

сил и процессов представляется известными как по направлению их действия, так и в некоторых случаях по периодичности их изменения. Другая часть еще мало изучена или совсем не изучена. Имеются даже высказывания отдельных специалистов, что единую концепцию разработать нельзя.

Невозможность учета всего многообразия форм, размеров и элементов массива горных пород, их свойств, взаимодействующих процессов при решении конкретных вопросов техногенной деятельности человека заставляет искать феноменологические подходы и методы. Такой обобщенный подход должен базироваться на раскрытии закономерностей распределения напряженного состояния в земной коре в целом и в отдельных ее участках с учетом усредненных физико-механических и химико-биологических свойств массива горных пород и его температуры, рассматривая массив в качестве *сплошной среды* [42].

Указанный подход существенно облегчит рассмотрение влияния и таких факторов, действие которых сказывается постоянно, но с интенсивностью, изменяющейся периодически по определенным законам (например, лунно-солнечные приливы). Интересно отметить, что наибольшее влияние таких факторов, например, на число горных ударов регионального типа сказывается в периоды максимальной *нестабильности* состояния массива горных пород [37]. Это положение имеет большое значение для понимания многих процессов, имеющих место в земной коре.

В настоящей работе делается попытка рассмотреть вопрос о напряженном состоянии земной коры и литосферы в целом на основе концепции о том, что литосфера, как система, и ее отдельные участки находятся в специальном предельно напряженном состоянии, а внутри этих участков напряженное состояние является крайне дискретным как по интенсивности, так и по виду [40].

Целью работы является рассмотрение состояния решения отдельных вопросов геодинамики недр, научное обоснование программы дальнейшего развития этой отрасли наук о Земле, ее приложений к освоению недр и земной поверхности.

О ТЕОРИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

В настоящей главе делается попытка обзора современных представлений о тектонических процессах и явлениях, имеющих место в литосфере и астеносфере, определяющих, в конечном счете, состояние и поведение земной коры, в которой сосредоточена основная техногенная деятельность человека.

Главные источники тектонических движений и деформаций лежат не в самой литосфере, а в более глубоких недрах Земли и прежде всего в непосредственно подстилающем литосферу более пластичном и подвижном слое верхней мантии – астеносфере [52]. Отсюда в литературе используется объединенное понятие литосферы и астеносферы в виде *тектоносферы* как главной области проявления тектонических процессов. При этом понимается, что область интересов геотектоники распространяется, конечно, и на Землю в целом. В работе отмечается, что в последнее время возрос интерес к геодинамике как новому направлению, родившемуся «на стыке тектоники, петрологии, геохимии и геофизики» [52].

Авторы настоящей книги при осуществлении обзора в значительной степени и с благодарностью пользовались сведениями, содержащимися в работе [52], а так же, конечно, использовали и более ранние работы многих отечественных и иностранных авторов [2, 6, 11–14, 19, 26, 32, 35, 36, 47, 49, 57 и др.].

Остановимся ниже на имеющихся в научно-технической литературе данных об основных положениях теории литосферных плит, завоевавшей в последние десятилетия широкое признание в науках о Земле, о современных характеристиках и понятиях, относящихся к границам литосферных плит, о внутриплитных тектонических процессах. Такого рода обзор позволит, во-первых, опираться на него при дальнейшем

рассмотрении интересующих нас вопросов и, во-вторых, излагать собственную позицию, если она в отдельных случаях отличается, ссылаясь на соответствующие положения выполненного обзора.

2.2. ОБ ОСНОВАХ ТЕКТОНИКИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Основные обобщенные положения тектоники литосферных плит по состоянию на 1968 г., когда теория была впервые достаточно полно сформулирована, и их развитие с учетом последних достижений наук о Земле, даны в табл. 2.1 [52].

Таблица 2.1

Сравнение основных положений классической и современной тектоники плит

Классическая тектоника плит (1968)	Современная тектоника плит (1993)
1	2
1. Верхняя часть твердой Земли разделяется на хрупкую литосферу и пластическую астеносферу.	1. Верхняя часть твердой Земли разделяется на литосферу и астеносферу, но литосфера не столь монолитна, как предполагалось, и подвержена расслаиванию, а астеносфера существенно изменяет свою мощность и вязкость в латеральном направлении.
2. Литосфера разделена по латерали на ограниченное число крупных и средних по размерам плит.	2. Литосфера разделена по латерали на крупные, средние и малые плиты. Между крупными плитами расположены пояса, состоящие из мозаики малых плит, а сами крупные плиты неоднородны как в вертикальном, так и в горизонтальном сечении.
3. Литосферные плиты находятся в постоянном относительном движении по поверхности астеносферы.	3. Литосферные плиты находятся в постоянном относительном движении по поверхности астеносферы.

ры, а основная тектоническая, сейсмическая и магматическая активность сосредоточена на их границах.

ры и основная тектоническая, сейсмическая и магматическая активность сосредоточена на их границах, однако хотя и в меньшем масштабе, проявляется и во внутренних частях плит.

4. Горизонтальные перемещения литосферных плит поддаются описанию, исходя из теоремы Эйлера.

4. Горизонтальные перемещения крупных и средних плит поддаются описанию, исходя из теоремы Эйлера, но малые плиты могут испытывать более сложные перемещения.

5. Наблюдаются три основных типа относительных перемещений плит:

1) расхождение (дивергенция), выраженное рифтингом и спредингом;

2) схождение (конвергенция), выраженное субдукцией и коллизией;

3) сдвиговые перемещения по трансформным разломам.

5. Наблюдаются три основных типа относительных перемещений плит:

1) расхождение (дивергенция), выраженное рифтингом и спредингом;

2) схождение (конвергенция), выраженное субдукцией, обдукцией, эдукцией, коллизией, выжиманием масс горных пород в латеральном направлении, в том числе по сдвигам;

3) сдвиговые перемещения по трансформным разломам, нередко сочетающиеся со сжатием (транспрессия) или растяжением (транстенсия).

6. Спрединг в океанах автоматически компенсируется субдукцией и коллизией по их периферии и благодаря этому радиус и объем Земли остаются постоянными.

6. Спрединг в океанах компенсируется не только субдукцией и коллизией, но и другими процессами, связанными с конвергенцией плит (обдукция, эдукция, сдвиги и пр.), причем все эти процессы не находятся в постоянном количествен-

ном соответствии. Поэтому радиус и объем Земли могут испытывать пульсацию, хотя и в ограниченных размерах. Кроме того, весьма вероятно вековое уменьшение радиуса и объема Земли вследствие ее общего охлаждения.

7. Перемещения литосферных плит относительно астеносферы обязаны их волочению под действием конвективных течений в астеносфере.

7. Перемещения литосферных плит относительно астеносферы обязаны не только их волочению конвективными течениями, но и отодвиганию от осей срединно-океанских хребтов (ridge push)* и затягиванию в зоны субдукции (slab pull)**.

8. Главным «мотором» тектоники плит служит конвекция, которая является общемантийной и имеет чисто тепловое происхождение.

8. Главным «мотором» тектоники плит служит конвекция в мантии, но она проявляется в гораздо более сложной форме, различной на разных уровнях, многослойной и является не чисто термической, но и химической.

9. Ряд важных тектонических и вообще геодинамических процессов остался вне рассмотрения в классической тектонике плит, а такие основные процессы, как рифтинг, спрединг, субдукция, перемещения по трансформным разломам рассматривались весьма упрощенно.

9. При создании более общей геодинамической концепции необходимо учитывать более широкий круг процессов, включая внутриплитные деформации и магматизм, периодические изменения эндогенной активности Земли, а также сложность движения на границах плит, их изменчивость в пространстве и времени.

* Под влиянием гравитации (превышение хребтов над абиссальными равнинами).

** Океанская плита более тяжелая вследствие охлаждения.

В качестве пояснения к п.7 желательно привести следующее высказывание составителей табл. 2.1: непосредственное увлечение литосферных плит астеносферными течениями не считается в настоящее время единственной и даже главной движущей силой. Значительно большая роль отводится двум другим силам – отталкиванию плит от осей срединных хребтов под влиянием гравитации из-за их значительного превышения над абиссальными равнинами и их затягиванию в зоны субдукции вследствие того, что в результате охлаждения океанская плита оказывается более тяжелой, чем астеносфера, и утрачивает благодаря этому свою плавучесть.

Из анализа табл. 2.1 следует, что теория тектоники литосферных плит успешно развивается. Более того, наличие этой теории способствует и будет способствовать в будущем проведению дальнейших научных изысканий и экспериментальных исследований и надо надеяться, что уже в ближайшие десятилетия можно ожидать крупных достижений в этой области.

Нам представляется, что первоочередным и наиболее результативным в дальнейших изысканиях должно стать направление, касающееся природы и величины горизонтальных сил, обеспечивающих дрейф и взаимодействие литосферных плит. Эти вопросы будут нами рассмотрены ниже с учетом данных табл. 2.1 и на основе положений, сформулированных в работах [40–43].

2.3. ГРАНИЦЫ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Границы литосферных плит подразделяются на дивергентные, представленные рифтовыми зонами, конвергентные, представленные зонами субдукции, обдукции и коллизии, сдвиговые по трансформным разломам.

В *рифтовых зонах* имеет место наращивание плит (спрединг). Большинство рифтовых зон связаны между собой, образуя глобальную систему, протянувшуюся через континенты и океаны (рис. 2.1). Именно это обстоятельство привело к тому, что исследователи пришли к необходимости выработки общего подхода в виде «новой глобальной тектоники», как в конце 60-х годов называли концепцию тектоники литосферных плит [52].

В глобальной системе рифтовых зон большую часть составляют рифтовые зоны океанов (около 60 тыс. км из общей их протяженности около 90 тыс. км), выраженные срединно-океанскими хребтами. Хребты продолжают один другой, а в ряде мест связаны между собой «тройными сочленениями» (рис. 2.1). Пересекая границу с пассивными

континентальными окраинами океанские рифты продолжают континентальными. Там, где срединно-океанские хребты подходят к активной континентальной окраине, они поглощаются в зоне субдукции.

Система рифтовых зон определенным образом ориентирована относительно оси вращения геоида (рис. 2.2). Рифтовые зоны образуют почти полное кольцо вокруг южного полюса на широтах 40–60° и отходят от этого кольца меридионально с интервалом около 90° тремя затухающими к северу поясами: Восточно-Тихоокеанским, Атлантическим и Индоокеанским. По свидетельству Е.Е.Милановского и А.М.Никишина (1988 г.) намечается и четвертый, Западно-Тихоокеанский пояс. Правильность в размещении рифтовых зон сочетается с глобальной асимметрией как между полярными областями, так и относительно Тихоокеанского полушария [52]. Отмечается, что вне глобальной системы находятся лишь немногие из крупных рифтов: система Западной Европы (включая Рейнский грабен), а также системы Байкальская и Фэнвей Шанси, активность которых поддерживается коллизией континентальных плит Евразии и Индостана.

Рис. 2.1. Глобальная система современных континентальных и океанских рифтов, главные зоны субдукции и коллизии, пассивные (внутриплитные) континентальные окраины.

Рифтовые зоны: Срединно-Атлантическая (СА), Американо-Антарктическая (Ам-А), Африкано-Антарктическая (Аф-А), Юго-Западная Индоокеанская (ЮЗИ), Аравийско-Индийская (А-И), Восточно-Африканская (ВА), Красноморская (Кр), Юго-Восточная Индоокеанская (ЮВИ), Австрало-Антарктическая (Ав-А), Южно-Тихоокеанская (ЮТ), Восточно-Тихоокеанская (ВТ), Западно-Чилийская (ЗЧ), Галапагосская (Г), Калифорнийская (Кл), Рио-Гранде – Бассейнов и Хребтов (БХ), Горда–Хуан-де-Фука (ХФ), Нансена–Гаккеля (Н-Г), Момская (М), Байкальская (Б), Рейнская (Р).

Зоны субдукции: 1 – Тонга–Кермадек; 2 – Новогейбридская; 3 – Соломон; 4 – Новобританская; 5 – Зондская; 6 – Манильская; 7 – Филиппинская; 8 – Рюкю; 9 – Марианская; 10 – Идзу-Бонинская; 11 – Японская; 12 – Курило-Камчатская; 13 – Алеутская; 14 – Каскадных гор; 15 – Центральноамериканская; 16 – Малых Антиль; 17 – Андская; 18 – Южных Антиль (Скоттия); 19 – Эоловая (Калабрийская); 20 – Эгейская (Критская); 21 – Мекран.

a – океанские рифты (зоны спрединга) и трансформные разломы; *б* – континентальные рифты; *в* – зоны субдукции: островодужные и окраинно-материковые (двойная линия); *г* – зоны коллизии; *д* – пассивные континентальные окраины; *е* – трансформные континентальные окраины (в том числе пассивные); *ж* – векторы относительных движений литосферных плит, по Дж.Минстеру, Т.Джордану (1978) и К.Чейзу (1978), с дополнениями; в зонах спрединга – до 15–18 см/год в каждую сторону; в зонах субдукции – до 12 см/год

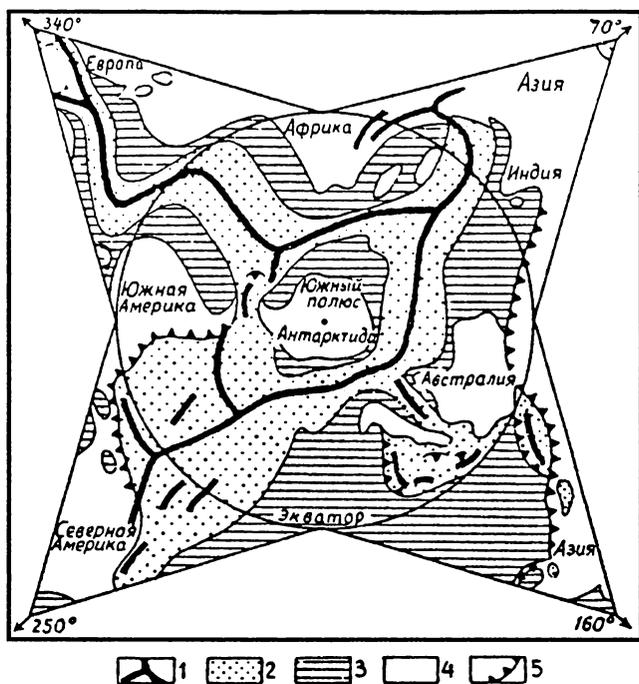


Рис. 2.2. Геометрическая правильность размещения глобальной системы современных рифтов относительно оси вращения Земли по Е.Е.Ми-лановскому, А.М.Никишину (1988):

1 – кайнозойские оси рифтинга главным образом активные; 2 – океан-ская литосфера кайнозойского возраста; 3 – то же, мезозойского возраста; 4 – области с континентальной литосферой; 5 – конвергентные границы

Большинство исследователей исходит из того, что обусловленное конвективными процессами утонение литосферы и ее последующий разрыв до земной поверхности (дна океана) приводит к последующему достаточно пассивному наращиванию плит за счет истока магмы. Магматизму при этом отводится пассивная роль.

Вместе с тем имеются взгляды на образование рифтовых зон в соответствии с механизмом гидравлического расклинивания пород литосферы поднимающейся базальтовой магмой, в том числе в виде линейных даек. Интересно, что количественное обоснование механизма внедрения дайки стало возможным в связи с разработкой теории гидроразрыва горных пород при добыче нефти (М. Хабберт, Д. Уиллис, А.Д. Пэк и В.С. Попов). Этот эффект подтверждается наличием даек и трещинных излияний в рифтовых зонах, расположившихся вертикаль-

но по простиранию зон, оказавших расклинивающее действие на породы литосферы [52].

Системы базальтовых даек берут начало на больших глубинах в результате активного внедрения посредством гидроразрыва пород с последующим раздвиганием стенок трещины. Активный способ заложения рифтовых зон имеет, по-видимому, подчиненное значение [52]. Считается, что проявление таких условий наиболее вероятно над зонами субдукции. Для развития гидроразрыва достаточно, чтобы давление жидкости в 1,2 раза превышало сжимающее напряжение в породе. Согласно сейсмологическим наблюдениям В.М.Горельчика и других, в период трещинного извержения Толбачика на Камчатке базальтовый клин подымался там со скоростью 100–150 м/с.

Трансформные разломы представляют собой разрывы со сдвиговым смещением. Трансформные разломы рифтовых зон соответствуют типу «хребет–хребет», т.е. снимают горизонтальные напряжения между двумя отрезками рифтовой зоны. На некоторых участках Срединно-Атлантического хребта они следуют через каждый 10–50 км и даже чаще. Накопление напряжений между сегментами срединно-океанского хребта связано с неравномерностью спрединга. Трансформные разломы вторичны по отношению к рифтогенному раздвигу [52].

Зоны субдукции и коллизии представляют собой характер взаимодействия литосферных плит при встречном движении. Субдукция возникает там, где на конвергентной границе сходятся континентальная и океанская плиты, либо океанская с океанской. При их встречном движении более тяжелая литосферная плита (всегда океанская) уходит под другую, а затем и погружается в мантию. Коллизия, т.е. столкновение литосферных плит, развивается там, где континентальная литосфера сходится с континентальной: их дальнейшее встречное движение компенсируется деформацией литосферы, ее утолщением и «скупчиванием» в складчатых горных сооружениях. Очень редко и на короткое время при конвергенции возникают условия для надвигания на край континентальной плиты фрагментов океанской литосферы: происходит обдукция [52]. При общей протяженности современных конвергентных границ около 57 тыс. км на субдукционные приходится 45 тыс. км, остальные – на коллизионные.

В зонах коллизии породные массивы вступают в активное взаимодействие на протяжении многих тысяч километров вдоль Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса с проявлением активной сейсмичности. Некоторые исследователи (А.Балли) рассматривают этот режим как особый вид субдукции – альпинотипную субдукцию (А-субдукцию). Коллизия наиболее сильно проявляется там, где Евразии противостоят выступы плит Индостана и Аравии, а также

активно смещающаяся на север Адриатическая плита. На Закавказской микроплите, пододвигающейся под Большой Кавказ, срыв и «счешуивание» вероятно охватывают только ее осадочный чехол. Встречное суммарное движение Индостана и Евразии сначала действия коллизии достигает 2000 км, что привело к утолщению и воздыманию высочайшего в мире горного сооружения и отжиманию горных масс складчатого пояса в западном и восточном направлениях.

Наблюдаются иногда переходы от зон коллизии к зонам субдукции.

2.4. ВНУТРИПЛИТНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Проявления внутриплитной тектонической и магматической активности весьма разнообразны: вертикальные движения земной коры (первые миллиметры в год), относительные горизонтальные подвижки (сантиметры). Внутренние части плит повсеместно испытывают напряжения сжатия (векторы их направлены либо перпендикулярно зонам спрединга, либо – к простиранию зон коллизий). Внутренние зоны обладают сейсмичностью и вулканизмом, особенно в рифтовых зонах, однако более слабыми по сравнению с зонами, прилегающими к границам плит. Внутриплитный вулканизм более активно проявляется в океанских бассейнах (возможно связано с активностью магнитных струй).

Таким образом внутренние части литосферных плит не лишены современных движений, сейсмичности и вулканизма, хотя масштабы этих проявлений много меньше, чем в районах, приуроченных к границам плит. Только иногда эти проявления носят катастрофический характер.

Среди основных типов внутриплитных дислокаций выделяются: планетарная трещиноватость, глубинные разломы, зоны складчатых дислокаций. Особое место занимают так называемые кольцевые структуры, в т.ч. метеоритовые кратеры и астроблемы (рис. 2.3) [52].

Все типы внутриплитных дислокаций выявляются на базе геологических, геофизических, морфологических данных, а также с использованием аэро- и космических снимков.

2.5. ЗАМЕЧАНИЯ К ПРИВЕДЕННОМУ ВЫШЕ ОБЗОРУ

Следует констатировать, что в развитии основ теории литосферных плит, особенно отдельных ее положений, за последние годы произошли существенные сдвиги, закрепившие за этой теорией ее лидирующее положение (см. табл. 2.1).

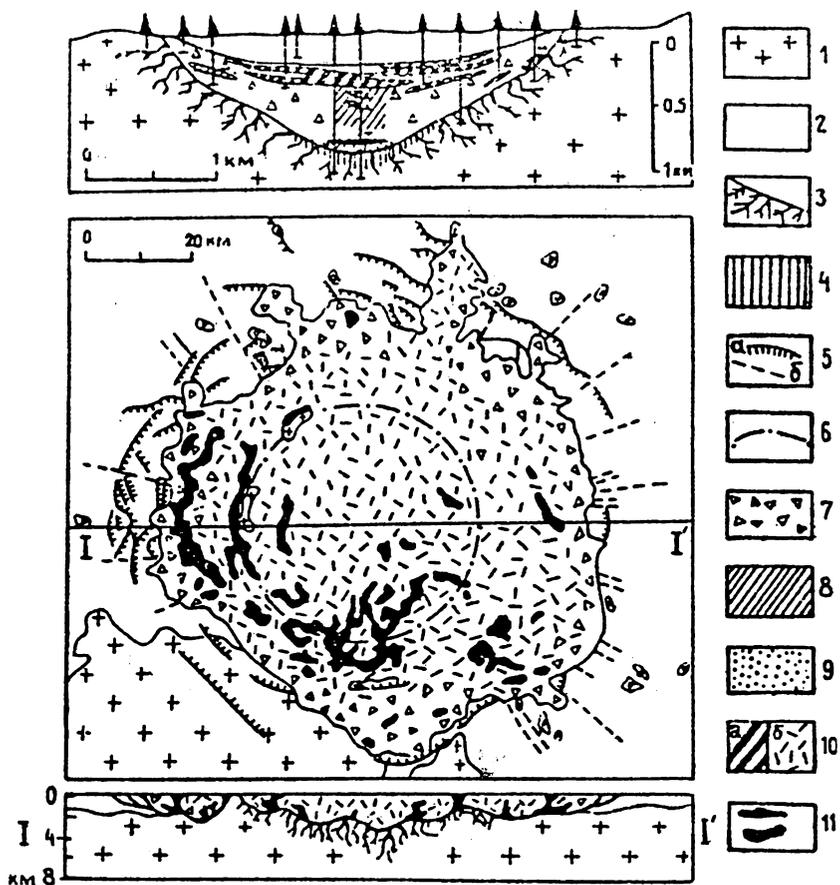


Рис. 2.3. Геологическое строение астроблем. Вверху – разрез палеозойского (414 ± 20 млн лет) ударного кратера Брент на Канадском щите (по Р.Гриве и др., 1977, упрощено), внизу – карта и схематический разрез кайнозойского (39 млн лет) Полигайского ударного кратера на Анабарском щите (по В.Л.Масайтису и др., 1975). $I-I'$ – линия разреза.

1 – кристаллические породы докембрия; 2 – докайнозойский осадочный чехол Анабарского щита и осадочное заполнение кратера Брент; 3 – брекчирование и катаклаз; 4 – ударно-метаморфизованные гнейсы; 5 – центробежные надвиги (а) и радиальные разрывы (б); б – ось кольцевого поднятия; 7 – аллогенные брекчии; 8 – то же, с признаками ударного метаморфизма; 9 – базальный горизонт аллогенных брекчий; 10 – зювиты астроблемы Брент (а) и Полигайской (б); 11 – застывшие импактные расплавы, в том числе тагамиты

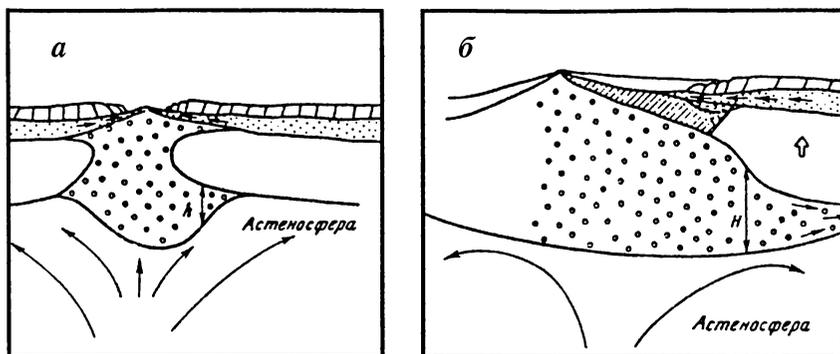


Рис. 2.4. Активная спрединговая стадия развития пассивной континентальной окраины фазы процесса: а – начальная; б – зрелая

Прежде всего наметилось, как нам кажется, более определенное продвижение в вопросе, касающемся силового взаимодействия литосферных плит, причин их перемещения.

Десяток лет назад, когда авторы настоящей книги начинали делать свои попытки в решении этого вопроса почти общепринятым и незыблемым был тезис о том, что движение плит связано с конвективными движениями (процессами) в мантии. Имевшиеся к тому времени отдельные высказывания о возможном влиянии раздвига плит в рифтовых зонах за счет расклинивающего воздействия внедряющейся из мантии магмы, не получали существенной поддержки. К настоящему времени гидроразрыву литосферы и распирающему воздействию магмы при раздвиге литосферных плит придается уже несколько большее значение: допускается, что в отдельных случаях это может иметь место, например, при активном рифтогенезе (рис. 2.4) [52].

Указанный поворот представлений в рассматриваемом вопросе придает оптимизм и уверенность в дальнейшем развитии предложенной в работах [40–43] идее о механизме и силовых особенностях спрединга литосферных плит в океанских рифтовых зонах за счет поступления (прорыва) магмы из астеносферы.

Развивая прежние идеи и, принимая во внимание, что система рифтов в океанах и на континентах является единой [52], можно предположить ее рассмотрение в качестве единой и в силовом выражении, т. е. как определяющую перемещение литосферных плит, их взаимодействие, внутриплитные тектонические процессы. В этом плане единая система литосфера-астеносфера может рассматриваться, как в известном смысле замкнутая система, имеющая достаточное энергетическое обеспечение: круговорот пород в ней совершается за

счет притока энергии из магмы, имеющей на стадии поступления в рифтовую зону гидростатическое напряженное состояние, равное γH_f , где H_f – толщина литосферы в районе рифтовой зоны, как это следует из работ [40, 41 и 42]. Величины H_f для разных рифтовых зон исследователями определены, хотя может быть еще и не достаточно точно в силу того, что для их установления используются не прямые, а косвенные методы измерений. Подробные результаты приводятся, например, на рис. 2.5 из работы [26].

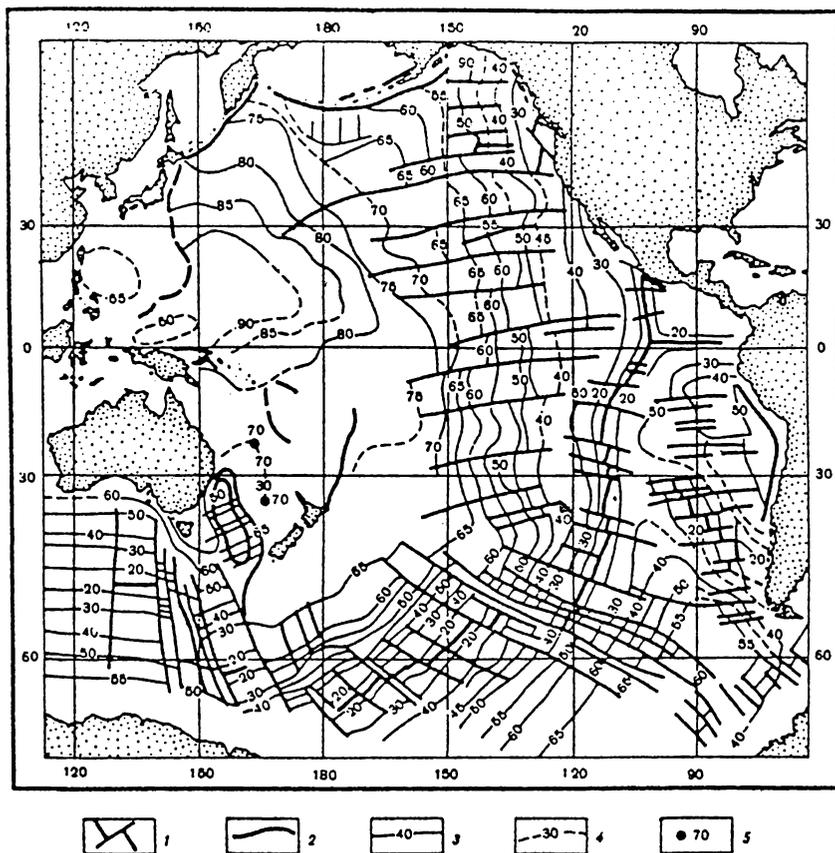


Рис. 2.5. Карта расчетной мощности литосферы Тихого океана:

1 – рифтовые зоны и трансформные разломы; 2 – глубоководные желоба; 3, 4 – изопакты расчетной мощности литосферы: 3 – достоверные, 4 – предполагаемые; 5 – расчетная мощность литосферы (в км) в точках глубоководного бурения

Исходя из изложенного, авторы считают возможным поставить задачу создания единой системы, обеспечивающей понимание и силовую интерпретацию движения и взаимодействия литосферных плит, т.е. подвести *математическую основу* под особо нуждающуюся в этом теорию литосферных плит, в т.ч. можно подойти к расчету величины работы, необходимой для перемещения литосферных плит и сопоставить ее объем с силовыми возможностями, имеющими место в рифтовых зонах.

Вторым направлением развития теории литосферных плит является, по-нашему мнению, дальнейшее изучение геодинамического состояния земной коры и литосферы в целом на основе метода геодинамического районирования недр, созданного авторами работ [4, 10, 42].

Применяя основной принцип геодинамического районирования «от общего к частному» представляется возможным последовательно установить:

- геодинамическое состояние земной коры и литосферы в целом;
- геодинамическое состояние литосферных плит и динамику их перемещения и взаимодействия;

- границы и взаимодействие элементов блочной структуры литосферных плит (мегаблоков I–III рангов и блоков I–V рангов).

Проведение работ в перечисленных направлениях существенно продвинет развитие теории литосферных плит и будет способствовать дальнейшему развитию и уточнению существующих методов оценки напряжений, плотности пород, их проницаемости и влагогазоемкости в горном массиве земной коры в любых регионах [42].

Получая результаты расчетов напряженного и газогидродинамического состояния в блочной структуре любого участка земной коры, можно с вполне достаточной достоверностью получить сведения о степени активности выделенных разломов, местах концентрации напряжений и, в конечном счете – местах риска, в которых при техногенном освоении недр и земной поверхности могут встречаться опасные условия.

Ограничившись пока этими предварительными суждениями, обратимся к более системному изложению этой новой концепции математической интерпретации отдельных сторон теории литосферных плит с учетом полученных результатов изысканий в работах [40, 41, 42].

ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

3.1. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ЗОНАХ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Пределно напряженное состояние в массиве горных пород может возникнуть в условиях действия естественного поля напряжений, существующего в земной коре, и в результате техногенного воздействия на него. Образование зон с пределно напряженным состоянием в массиве горных пород, видоизменение их границ, напряженности, исчезновения и возрождения этих зон в новых условиях является важнейшей проблемой геодинамики недр.

Рассмотрим этот вопрос на примере отработки угольных месторождений.

Еще в 1940-е годы В.Д.Слесаревым была высказана мысль о наличии впереди очистного забоя разрушенной части пласта угля, прилегающей к выработанному пространству и обуславливающей перемещение максимума зоны опорного давления в глубь угольного массива.

Более определенно, на основе большого объема инструментальных наблюдений этот вопрос был сформулирован в работах по решению проблемы горных ударов на угольных шахтах Кизеловского бассейна [37]. Именно здесь стали говорить о зоне с пределно напряженным состоянием, о пределном ее насыщении потенциальной энергией. Эта зона понималась не как зона разрушенного горным давлением угля, а как зона, в которой напряжения распределяются в зависимости от степени устойчивости краевой части пласта, возрастающей при удалении от края пласта. Малейшие изменения в устойчивости краевой части пласта, внедрение в краевую часть бара машины, взрыва и другие воздействия вызывают немедленные изменения в зоне пределно напряженного состояния, перераспределение нагрузок в этой зоне, передачу их в глубь массива.

Угольный пласт в рассматриваемой зоне сохраняет способность накапливать потенциальную энергию упругого сжатия, запасы которой пропорциональны квадрату величин действующих напряжений. Вот это положение, положение о предельном насыщении потенциальной энергией составляет существо новых представлений о зоне предельно напряженного состояния [37].

3.1.1. Зона предельно напряженного состояния впереди очистного забоя

Более подробно рассмотрим поведение угольного пласта впереди очистного забоя. Ширина зоны опорного давления впереди очистного забоя может быть установлена с помощью зависимостей, приведенных на рис. 3.1 [18]. На расстоянии до $0,3-0,5l$ (где l – ширина зоны опорного давления впереди очистного забоя) дальнейшее подвигание забоя приводит к увеличению скоростей деформаций угля и сближения боковых пород.

Это обусловливается перераспределением нагрузок на пласт, вызванным взаимодействием двух зон опорного давления: зоны, установившейся впереди очистного забоя в целом, и зоны, вызванной влиянием подвигающегося уступа. При этом следует иметь в виду, что до появления уступа впереди очистного забоя в угольном пласте существовало предельно напряженное состояние и предельное насыщение

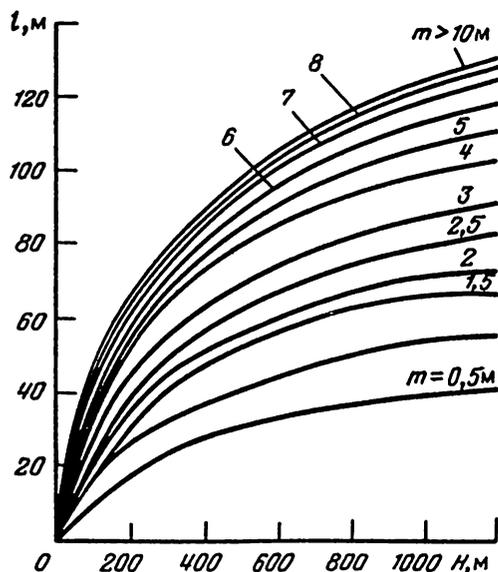
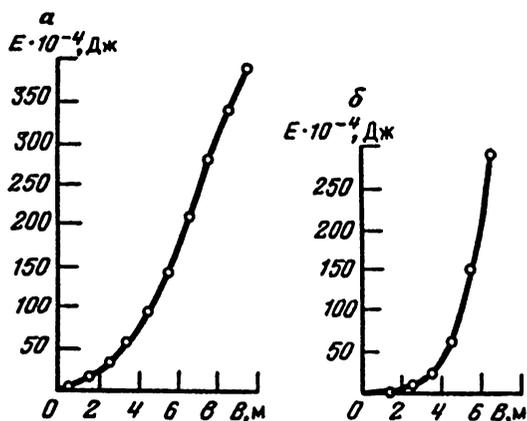


Рис. 3.1. Номограмма для определения ширины зоны опорного давления l :

H – глубина разработки;
 m – мощность угольного пласта или вынимаемого слоя

Рис. 3.2. Зависимость энергии E , высвобождающейся при внедрении комбайна в угольный пласт, от ширины захвата B :

a и b – из пласта и боковых пород соответственно



потенциальной энергией упругого сжатия. Появление зоны опорного давления впереди уступа создает условия неустойчивости, при которых впереди забоя формируется общая зона предельно напряженного состояния. Характер этого процесса зависит от соотношения скорости продвижения комбайна и возможной скорости передачи нагрузок в глубь угольного пласта в результате его релаксации и псевдопластического деформирования. Скорость выхода пласта, опасного по горным ударам, из-под нагрузки часто оказывается недостаточной, что приводит к хрупкому разрушению угля в виде толчков, микроударов и собственно горных ударов. Требуется замедление скорости подачи комбайна, чтобы избежать или, по крайней мере, снизить интенсивность этих проявлений.

Влияние процесса выемки угольного пласта на выдавливание угля и сближение боковых пород тем больше, чем шире вынимаемая лента угля и чем больше скорость ее выемки. Это положение отражено на рис. 3.2 и 3.3 и послужило основой для открытия № 337, формула которого излагается в следующем виде: экспериментально установлена неизвестная ранее закономерность разрушения горных пород в подземных условиях, заключающаяся в том, что при возрастании скорости перемещения поверхности обнажения породного массива повышается интенсивность хрупкого разрушения пород в призабойной области, обусловленная концентрацией и локализацией сил горного давления в этой области. Применение указанной закономерности позволяет при ведении горных работ за счет управления напряженным состоянием массива угля (пород) снизить энергоемкость и металлоемкость забойных и проходческих машин, повысить безопасность ведения горных работ.

При проведении наблюдений с помощью нескольких индикаторных стоек, одновременно фиксирующих сближение кровли и почвы

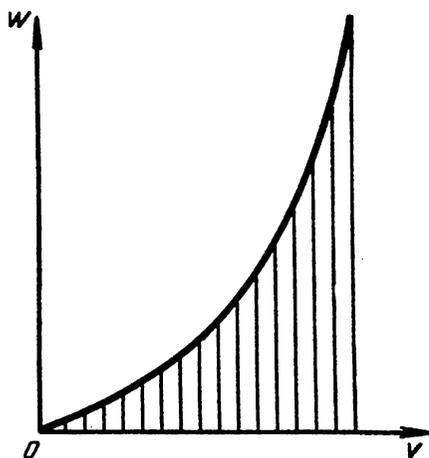


Рис. 3.3. Зависимость энергии W , участвующей в хрупком разрушении угольного пласта, от скорости V подачи комбайна

пласта и выдавливание угля из забоя при работе комбайнов, установлено следующее:

в момент толчка или микроудара происходит мгновенное сближение кровли и почвы и мгновенная подвижка угля из забоя; величины подвижек при толчках составляют от 0,01–0,05 мм до нескольких миллиметров;

толчки (микроудары) появляются сразу же впереди бара машины при средних скоростях сближения боковых пород от 15–18 до 25 мм/ч;

при толчках, которые происходят выше или ниже работающего комбайна, мгновенные подвижки угля и кровли появляются на фоне средних скоростей сближения пород, не превышающих, как правило, 5–6 мм/ч;

перед очередным толчком (микроударом) обычно имеет место замедление скоростей сближения пород и выдавливания угля;

соотношение скоростей сближения боковых пород и выдавливания угля довольно резко меняется в зависимости от расстояния до работающего комбайна: при работе комбайна на расстоянии менее 10 м от точки наблюдений скорость выдавливания угля, как правило, больше скорости сближения пород. Наиболее часто это проявляется с расстояния 7–8 м, когда скорость выдавливания угля в два–три раза превышает скорость сближения пород, а в отдельные моменты – в пять–шесть и более раз. В моменты остановки комбайна, особенно на длительный период, скорости выдавливания угля из забоя, как правило, равны скорости сближения кровли и почвы, а иногда бывают и менее ее. Таким образом, в период работы комбайна в данном районе развиваются силы, достаточные для деформирования более широкой полосы угля, прилегающей к очистному забою, и способствующие ее толчкообразному

выдавливанию главным образом в форме толчков и микроударов. В неработающем забое в условиях установившегося горного давления деформированию подвергается в основном кромка угольного забоя, в результате чего создаются условия для защемления забоя сближающимися породами.

Следовательно, ширина зоны предельно напряженного состояния впереди очистного забоя изменяется, существенно возрастая в районе подвигающегося уступа впереди бара комбайна.

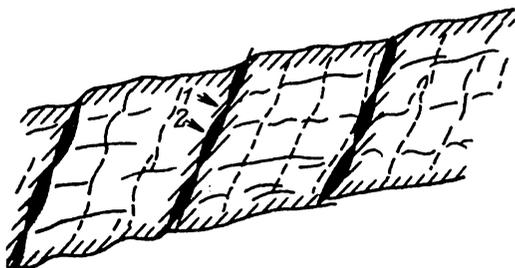
3.1.2. Дискретность распределения напряжений

Следующее важное свойство зоны предельно напряженного состояния пласта угля – дискретность распределения напряжений в ней. Большие (до 5–10%) деформации угольного пласта происходят в основном по плоскостям природной трещиноватости и слоистости. При этом подвижки, совершаясь по неровным поверхностям, приводят к существенному разуплотнению пласта (до 5–20%) и образованию участков с большой концентрацией напряжений и участков в значительной степени разгруженных (рис. 3.4). Обнаруженный эффект разуплотнения в результате подвижек по неровным поверхностям присущ не только угольным пластам, но и вообще деформированию массива горных пород [5].

В местах концентрации напряжений возможно «оплывание» острых граней макроструктурных элементов пласта угля. При этом, если в условиях псевдопластического состояния, в котором находится пласт перед началом разрушения в форме горного удара, возможно «оплывание» элементов угольного пласта в местах повышенной концентрации напряжений и, следовательно, выравнивание напряжений, то в момент разрушения пласт работает, как упругое тело. Поэтому увеличение объема из-за подвижек по неровным поверхностям происходит интенсивно и способствует толчкообразному выталкиванию краевой части пласта.

Рис. 3.4. Схема подвижек в пласте угля по неровным поверхностям природной трещиноватости и слоистости [26]:

1 и 2 – места соответственно повышенной и пониженной концентрации напряжений



Эффекты разуплотнения пласта и дискретности распределения напряжений в наибольшей степени проявляются вблизи обнажения (края) пласта, постепенно снижаясь при приближении к максимуму зоны опорного давления, т. е. к границе предельно напряженного состояния пласта. При этом кроме процесса релаксации напряжений участвуют также пластические деформации материала и подвижки по структурным элементам угля (пород).

Более того, необходимо иметь в виду, что по мере приближения к пределу прочности скорость деформации породы (угля) возрастает и тем больше, чем ближе к пределу прочности. Это явление было установлено при испытании образцов удароопасного угля Кизеловского бассейна на рычажном прессе (И.М.Петухов, П.А.Власов, 1952 г.). Отдельные результаты испытаний приведены в табл. 3.1. При длительном выдерживании образца угля под нагрузкой, близкой к разрушающей, но не достигающей ее, деформирование образца угля удавалось довести до 10–11 % его высоты. При этом максимальные скорости деформирования достигали 10–13 мм/ч (перед разрушением образца). Тем более установленный эффект должен проявляться при деформировании угольного пласта в целом [37].

Обнаруженное явление в работах А.М.Линькова и И.М.Петухова получило название «акселерация разрушения».

Таблица 3.1

Результаты испытаний образцов угля из удароопасного пласта Кизеловского бассейна

№ образца	Предел прочности при сжатии, МПа	Время протекания пластической деформации, мин		Скорость пластической деформации, мм/ч		Характеристика образца
		с начальн. скоростью	с конечной скоростью	V ₁	V ₂	
7	34,6	12	–	2,12	Нагрузка снята	С включением пирита
	24,8	30	25	0,37		10,43
23	36,9	–	15	–	7,3	Однородный
35	36,7	17	11	0	6,13	То же

Примечания: 1. При нагрузке до 84% разрушающей остаточной деформации не наблюдалось; 2. При повторном испытании образец № 7 был загружен лишь до 70% предыдущей максимальной нагрузки, стал деформироваться пластически и через 55 мин разрушился.

Установленное явление акселерации заполняет пробел в анализе процессов, происходящих между обычными медленными деформациями ползучести и мгновенной потерей устойчивости – горным ударом. Она представляет собой элемент количественной теории горных ударов – описание очень быстрых (с ускорением) деформаций при подходе достаточно близко к потере устойчивости.

3.1.3. Поведение угля в целиках

Целики угля, находящиеся в предельно напряженном состоянии, деформируются постадийно.

На шахте им. Урицкого в Кизеловском бассейне с помощью глубинных реперов были выполнены наблюдения за деформированием целика угля, образовавшегося при остановке очистного забоя у ската №127 (рис. 3.5). Ширина целика 11 м, мощность пласта 1,3–1,4 м, глубина работ 600 м.

При бурении шпуров для закладки реперов длиной до 4 м имели место сильные толчки и зажатия штанг, свидетельствующие об удароопасности целика угля. Из проведенных инструментальных наблюдений следует, что целик толчкообразно деформируется этапами: деформируются края, затем середина и снова края. В направлении плоскости пласта угля пластические деформации достигали 4 см. Тем не менее целик остался удароопасным и 12.08.52 г. произошло раздавливание его в форме горного удара с выбросом 7 т угля [37].

Из этого и ряда других наблюдений устанавливается, что целик угля, находящийся в предельно напряженном состоянии, толчкообразно деформируется в результате последовательного нарушения и восстановления равновесия между высоким давлением ядра и сопротивлением

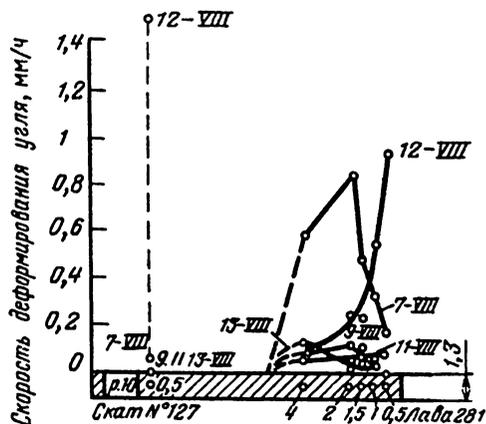


Рис. 3.5. Изменение деформаций в целике угля в период с 7 по 13 августа [26]:

0,5; ... 4 – глубина заложения реперов от бока выработки

этому давлению периферийной части целика за счет трения пласта по кровле и почве, защемления его боковыми породами. Коэффициент трения при движении меньше коэффициента трения при покое, поэтому каждая подвижка совершается несколько дальше, чем нужно для установления равновесия, что и вызывает вторую стадию толчкообразного деформирования. С этих же позиций в работе [37] описано поведение краевой части пласта угля, расположенной впереди очистного забоя.

Интересные результаты получены с помощью гидроподушек по оценке потенциальной удароопасности угольных пластов. Не касаясь этих результатов в части оценки удароопасности пластов, остановимся на тех из них, которые позволяют судить о характере деформирования пласта в условиях предельно напряженного состояния (рис. 3.6).

Гидроподушка была заложена в заранее подготовленную щель в средней части пласта угля. Нагружение с помощью гидроподушки сопровождалось наряду с упругими значительными неупругими деформациями. При достижении 10,5 МПа произошел толчок (микроудар), после которого давление в гидросистеме снизилось до 6 МПа в условиях дальнейшего нарастания деформаций. При повторных стадиях нагружения произошло еще несколько толчков, но значительно меньшей силы и при давлениях ниже 8 МПа.

Этими опытами еще раз подтверждается, что пласт угля, находясь в условиях предельно напряженного состояния, несмотря на значительное неупругое деформирование, сохраняет способность к накоплению упругой энергии и к многократному проявлению хрупкого разрушения в виде толчков (микроударов).

Анализируя результаты испытания свойств угольных пластов с помощью гидроподушек, необходимо обратить внимание на изменчивость модуля пропорциональности напряжение–деформация в зависимости от создаваемых напряжений в пласте. В этом плане по инициативе авторов были выполнены специальные опыты, при проведении которых подробно регистрировался не только процесс нагружения, но

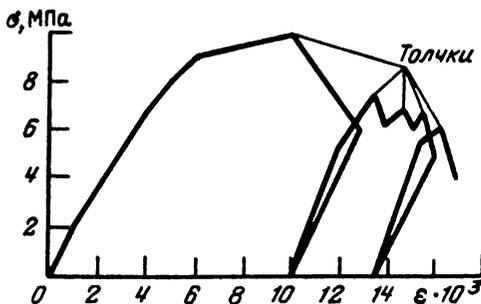


Рис. 3.6. График, иллюстрирующий толчкообразное поведение пласта угля при нагружении с помощью гидроподушки (Я.А.Бич, 1953)

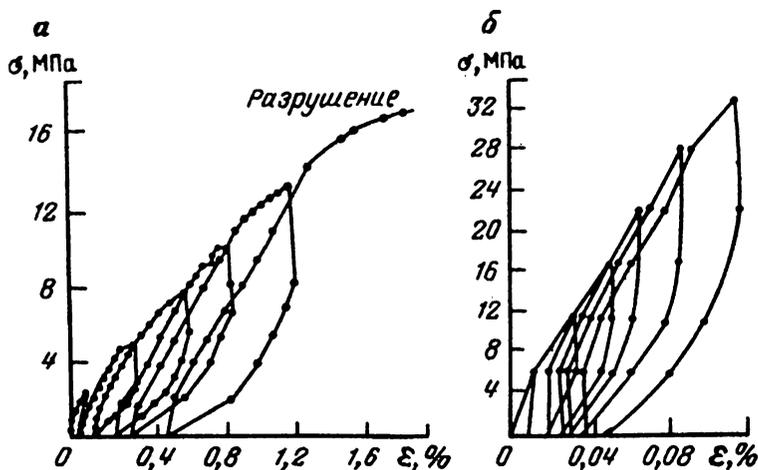


Рис. 3.7. Результаты натуральных испытаний пластов угля с помощью гидроподушек с регистрацией процессов нагрузки и разгрузки (А.П.Зап-рягаев, Г.Д.Морозов):

а – пласт «Четвертый» на шахте № 40 Воркутинского месторождения; б – пласт «Соленый» на шахте 1-5 «Кочегарка» Донецкого бассейна

и процесс разгрузки. Из графиков рис. 3.7 устанавливается, что модуль пропорциональности в процессе разгрузки значительно изменяется: его величина уменьшается по мере разгрузки.

Это обстоятельство должно учитываться при оценке энергетических показателей хрупкого разрушения, например, в краевой части угольного пласта впереди очистного забоя. Снижение модуля пропорциональности создает повышенные возможности для накопления энергии упругого сжатия и повышения вследствие этого удароопасности краевой части пласта. Последнее подтверждается проявлением горных ударов, микроударов и толчков в процессе работы комбайнов в очистном забое.

3.1.4. Бурение скважин в зонах опорного давления

Одна из интересных особенностей зоны предельно напряженного состояния в угольном пласте заключается в том, что при бурении скважин в ее пределах уголь ведет себя как упругий материал, способный к хрупкому разрушению с проявлениями стреляний, толчков, микроударов и образованием вокруг скважины также предельно напряженной зоны в результате неупругих деформаций (рис. 3.8). Ясно, что если бы удалось пробурить каким-то способом скважину поперек уже

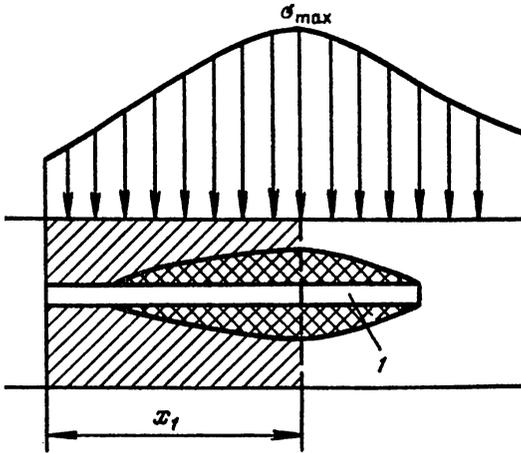


Рис. 3.8. Схема, иллюстрирующая предельно напряженное состояние в краевой части угольного пласта x_1 и вокруг скважины 1

пробуренной, то вокруг этой скважины также возникла бы зона предельно напряженного состояния.

На рис. 3.9 приведен пример получения ряда основных показателей напряженного состояния краевой части пласта при бурении скважины в лаве № 723 шахты № 2 «Капитальная» в Кизеловском бассейне.

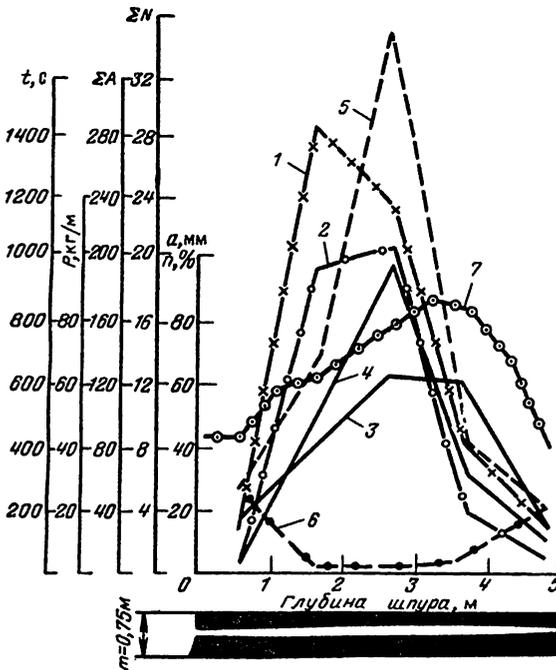


Рис. 3.9. Оценка удароопасности пласта комплексным методом в лаве № 723 шахты № 2 «Капитальная»:

1 - число толчков Σ_N ; 2 - сумма амплитуд толчков Σ_A ; 3 - содержание в буровой мелочи фракции размером больше 3 мм, n ; 4 - удельный выход буровой мелочи P ; 5 - общее время бурения t ; 6 - чистое время бурения t ; 7 - диаметр скважины a

Максимум зоны опорного давления находится на глубине 2–3 м. Выход буровой мелочи в зоне максимума возрос почти до 100 кг/м (диаметр скважины 43 мм), т. е. увеличился в 50 раз. Чистое время бурения, т. е. время, в течение которого производится принудительная подача инструмента на забой в максимуме зоны опорного давления, практически равно нулю, тогда как общее время бурения резко возросло из-за необходимости выдачи большого количества буровой мелочи. В процессе бурения скважины фактически идет «саморазрушение» угля с образованием вокруг нее зоны предельно напряженного состояния.

3.1.5. Область неупругих деформаций и величина опорного давления

Эффекты разуплотнения и дискретности в угольном пласте в зонах предельно напряженного состояния установлены на основе инструментальных наблюдений на шахтах Кизеловского бассейна еще в начале 1950-х годов. В [37] приведены расчетные зависимости для определения величины разуплотнения краевой части пласта угля за счет подвижек по неровным поверхностям природной и вызванной горным давлением трещиноватости и слоистости (рис. 3.10).

Радиус зоны неупругих деформаций определяется по формуле [37]:

$$\frac{R}{r} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \delta},$$

где r – радиус скважины;

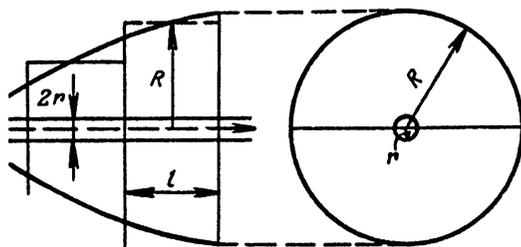
$$\delta = \frac{3n_r - n_r - 2}{n_r - 1},$$

здесь n_r – коэффициент разрыхления на контуре скважины;

$$\gamma = M_{\text{ш}} / M_0,$$

$M_{\text{ш}}$ – масса «нулевого» и избыточного штыба, вынутаго с единицы длины скважины; M_0 – масса «нулевого» штыба, вынутаго с единицы длины скважины.

Рис. 3.10. Схема разуплотнения краевой части пласта угля за счет подвижек по неровным поверхностям трещиноватости и слоистости



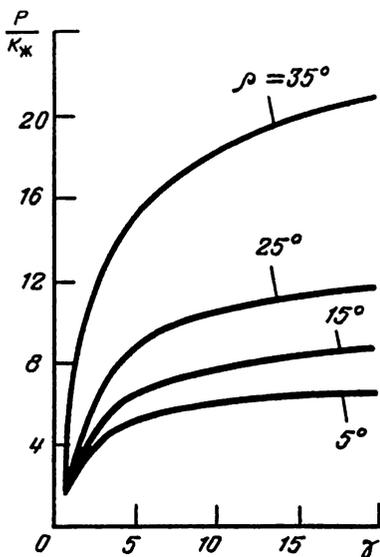


Рис. 3.11. Зависимость опорного давления от величины γ при различных углах внутреннего трения ρ

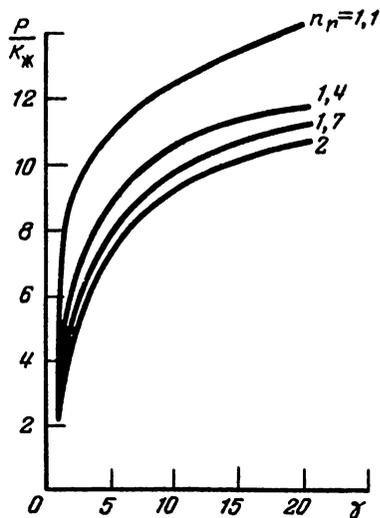


Рис. 3.12. Зависимость опорного давления от величины γ при различных коэффициентах разрыхления n_r

На рис. 3.11–3.13 приведены зависимости для расчета:
 опорного давления по массе выбуренного штыба при различных углах внутреннего трения в пласте угля;
 опорного давления по массе выбуренного штыба при различных коэффициентах разрыхления;

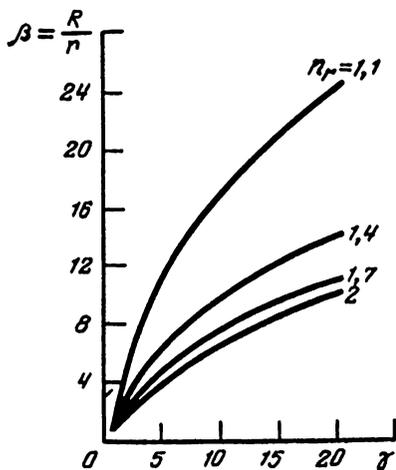


Рис. 3.13. Зависимость радиуса области неупругих деформаций от величины γ при различных коэффициентах разрыхления n_r

радиуса области неупругих деформаций по массе выбуренного што́ба при различных коэффициентах разрыхления n_r .

Установлено, что коэффициент разрыхления n_r заметно влияет на величину радиуса зоны неупругих деформаций и величину опорного давления при изменении его в интервале 1,1–1,4 и слабо – при изменении n_r в интервале 1,4–2. Величина угла внутреннего трения ρ сильно влияет на величину опорного давления при изменении в интервале 25–35° и слабее при изменении ρ в интервале 5–25°.

Степень надежности определения нагрузок, действующих на угольный пласт в зоне опорного давления, по выходу бурового што́ба существенно зависит от точности определения сцепления и угла внутреннего трения в массиве пласта. При этом, если значение угла внутреннего трения приближенно можно брать из паспорта прочности, полученного при испытании образцов угля, то сцепление, по-видимому, будет определяться в зависимости от соотношения размеров макроструктурных элементов пласта угля, диаметра скважины и области неупругих деформаций.

В заключение отметим, что в научно-технической литературе зона в краевой части пласта угля с предельно напряженным состоянием часто отождествляется с зоной нарушенного угля или с зоной его пластического состояния. При решении некоторых вопросов такое отождествление вполне допустимо.

Однако предельно напряженная зона в краевой части пласта или целика угля должна рассматриваться как такая зона, в пределах которой в результате упругопластического деформирования пласта возникает предельное распределение напряжений. Переход пласта в предельно напряженное состояние может происходить, как правило, толчкообразно и сопровождаться резкими подвижками и микроразрушениями.

Из такого толкования зоны предельно напряженного состояния следует, что, несмотря на то, что в указанной зоне пласт угля претерпел существенное деформирование и разуплотнение, он тем не менее сохранил способность к накоплению упругой энергии и, следовательно, к хрупкому разрушению в форме горных ударов. Последнее подтверждается практикой ведения горных работ на пластах, опасных по горным ударам. Несмотря на то, что ширина зоны с предельно напряженным состоянием в очистных забоях достигает иногда 5–6 м, внедрение в краевую часть пласта даже на небольшую глубину сопровождается микроударами и толчками. Рассмотренное выше о зоне предельно напряженного состояния, образующейся вблизи горных выработок по угольному пласту, в своих основных чертах относится вообще ко всем горным выработкам, проведенным в любых других горных породах в условиях, когда напряжения превышают предел прочности породы при сжатии.

3.2. РАЗНООБРАЗИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ЗОН ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

3.2.1. В земной коре

Одним из основных признаков наличия зон предельно напряженного состояния массива горных пород в земной коре является проявление сейсмичности. Причем чем больше интенсивность проявления сейсмичности, тем значительнее размеры этих зон и сильнее активность деформирования и разрушения в них.

Ежегодно в земной коре происходят сотни крупных землетрясений, что приводит во многих случаях к значительным разрушениям. Наибольшее число землетрясений наблюдается в пределах Тихоокеанского (75%) и Альпийского (23%) поясов. Тихоокеанский пояс проходит по границе океан – суша. Основная часть выделившейся сейсмической энергии приурочена к эпицентрам, расположенным по контуру Тихого океана через Новую Зеландию, острова Тонга, Самоа, Фиджи, Соломоновы, Тайвань, Японские, Камчатку, Алеутские острова, Аляску и западное побережье Северной, Центральной и Южной Америки. Альпийский пояс проходит через Средиземноморье, Италию, Балканы, Турцию, Среднюю Азию, Иран, Афганистан, Памир, Тибет, Западный Китай. В указанных поясах часто происходят землетрясения с магнитудой более 8. В срединных частях океанов происходят не сильные землетрясения с небольшой глубиной очага (обычно в срединно-океанических хребтах). В широтах более 60° обоих полушарий сейсмичность слабая.

В районах интенсивного проявления землетрясений имеет место, конечно, бесчисленное проявление мелких разрушений с выделением сейсмической энергии разной интенсивности. Так же как в зонах предельно напряженного состояния, рассмотренных выше применительно к угольному пласту, в зонах, опасных по землетрясениям разного класса, постоянно идут процессы деформирования и разрушения массива горных пород в стремлении достичь равновесия. Достижение равновесия в одном месте влечет за собой его потерю в соседнем или даже в нескольких соседних участках.

Отдельные разрушения блочного массива горных пород в естественных условиях могут происходить в районах земной коры, не считающихся сейсмически активными. В этих районах обширные зоны предельно напряженного состояния отсутствуют, однако возможны

подвижки по разломам, нарушениям, макроструктурным поверхностям в породах, а, следовательно, возможно образование предельно напряженного состояния в отдельных небольших участках и возникновение динамических явлений (разрушений) с выделением сейсмической энергии. Как будет показано ниже, в зонах сжатия земной коры в верхних частях, прилегающих к земной поверхности, создаются достаточные условия для перехода горного массива в предельно напряженное состояние.

3.2.2. При разработке месторождений

В параграфе 3.1 были показаны условия образования и характер проявления зон предельно напряженного состояния при разработке угольных месторождений и сделано заключение, что сказанное в полной мере относится и к разработке других твердых полезных ископаемых.

В дополнение к этому отметим следующее.

Толчкообразное деформирование массива горных пород присуще отработке твердых полезных ископаемых и связано с возникновением зон предельно напряженного состояния, увеличением их размеров, формы, взаимодействием между собой по мере развития горных работ на шахтном поле или на месторождении в целом. При этом весьма существенным является вопрос – находился ли массив горных пород в предельно напряженном состоянии еще до горных разработок или такое состояние в нем ранее не имело места.

При появлении выработанного пространства (полости) больших размеров в зонах преобладающего сжатия земной коры, т.е. при наличии естественного предельно напряженного состояния массива, нарушается равновесие в части зоны предельно напряженного состояния всего массива, а поэтому перераспределение напряжений может распространяться значительно глубже мест ведения горных работ. Примером здесь может быть отработка свиты пластов общей мощностью 30–40 м на Ткибули-Шаорском угольном месторождении в сейсмически активном районе. При наклоне пластов 20–40° горные работы достигли глубины 1 км, в то время как толчки или возбужденные мелкофокусные землетрясения техногенного характера с энергией до 10^6 – 10^9 Дж возникают здесь на глубинах до 3 км, т.е. в 3 раза превышающих глубину разработки и в 1,5 раза – ширину выработанного пространства (табл. 3.2).

При отработке же Северо-Уральских бокситовых месторождений, где размеры выработанных пространств значительно меньше, появление толчков с энергией 10^2 – 10^8 Дж имеет место на меньших глубинах.

Таблица 3.2

**Результаты исследования влияния параметров отработки
месторождений на проявление сейсмичности**

Месторождение, шахта	Глубина разработки H , км	Ширина выработан- ного пространства L , км	Максимальная глу- бина проявления се- йсмичности H_c , км	H_c/H	L/H
Ткибули-Шаорское угольное	1	2	3	3	1,5
Северо-Уральское бокситовое:					
шахта № 15	0,7	1,2	2	1,4	0,8
шахта № 14	0,7	0,8	0,7	1	0,9

Максимальная глубина проявления сейсмичности H_c напрямую зависит от ширины выработанного пространства L : при увеличении L в 2,5 раза H_c возрастает в 4,3 раза (см. табл. 3.2). Кроме того, в 3 раза увеличивается H_c/H . На шахте № 14, например, видно, что горные разработки вызывают переход в предельно напряженное состояние лишь на участках массива, непосредственно прилегающих к образовавшимся локальным выработанным пространствам, не вызывая существенных изменений в массиве, расположенном ниже.

3.2.3. При подземных ядерных взрывах

При проведении мощных камуфлетных ядерных взрывов в сейсмически активном районе Невады отмечено возникновение инициированных взрывами мелкофокусных тектонических землетрясений с магнитудой порядка 5,5–6.

Землетрясения и афтершоки связаны с подвижками по известным сейсмогенным разломам. Мощные взрывы с тротильным эквивалентом от нескольких десятков килотонн до одной мегатонны инициируют рои в сотни и тысячи землетрясений. Магнитуды инициированных землетрясений (наиболее мощных из них) на одну–две единицы меньше, чем магнитуда взрыва. Эти землетрясения происходят на тех же глубинах, что и естественные (8–13 км). Наиболее сильные землетрясения происходят в первые 5–20 с после взрыва. Промежуток време-

ни, в течение которого проявлялись афтершоки, – от нескольких дней до нескольких месяцев (И.П.Пасечник [5]). Очаги землетрясений и афтершоков отмечаются на расстояниях 20–40 км (иногда более) от места взрыва.

Американские сейсмологи высказали предположение о возможности использования глубоких (3–5 км) ядерных взрывов величиной 1–10 мегатонн в сейсмоактивных районах для снятия напряженного состояния в литосфере, в целях предотвращения возможности возникновения разрушительных землетрясений в данном районе (И.П.Пасечник [5]). Это может в отдельных случаях оказаться действительно эффективным, но лишь тогда, когда организовано изучение геодинамической обстановки для значительного региона земной коры и выбора на этой основе осуществления оптимального управления этой обстановкой. В противном случае проведение ядерного взрыва и, следовательно, возбуждение с его помощью землетрясения может привести к непредсказуемому появлению опасности в соседних районах земной коры.

Таким образом, при мощном ядерном взрыве происходит появление в горном массиве новой зоны предельно напряженного состояния на фоне существующего здесь естественного предельно напряженного состояния с возникновением, следовательно, условий для существенного повышения сейсмичности.

3.2.4. При разработке нефтяных и газовых месторождений

Наведенная сейсмичность, связанная с разработкой жидких и газообразных полезных ископаемых, неоднократно отмечалась в США, б. СССР (Узбекистане, России, Дагестане и др.).

26 мая 1971 г. в районе Старогрозненского нефтяного месторождения произошло вызванное нефтяными разработками землетрясение с магнитудой 4,1 и гипоцентром 2,5 км (М.Н.Смирнова [5]). На земной поверхности интенсивность колебаний составила 6 баллов при основном толчке и 5 баллов при афтершоках. Произошло повреждение колонн в некоторых скважинах, упали кирпичные трубы, разрушились крыши. Капитальные стены и перегородки деформировались и отклонились от вертикали, разрушены и перекошены дверные и оконные перемычки, арки. Размеры площади сотрясений составили 144×78 км².

В этом районе отмечались естественные землетрясения в 1868, 1902, 1914, 1938, 1952, 1960 и 1961 гг. Наблюдалось множество относительно слабых толчков. Самое глубокое землетрясение произошло 22 июля 1973 г. с гипоцентром 22 км.

Сейсмограммы Старогрозненского землетрясения обладают всеми чертами сейсмограмм, записанных для естественных землетрясений: резкие первые вступления, большие амплитуды колебаний, периоды колебаний 1–2 с. Землетрясение имеет *тектоническое* происхождение, возбужденное нефтяными разработками [5]. К числу возможных причин возбуждения землетрясений относятся: извлечение и закачка флюида, разрушение коллектора, изменение пластового давления и пластовой температуры. Процесс разработки месторождения сопровождается резким изменением пластового давления. Так, в первой скважине давление упало с 69 МПа в 1964 г. до 44,5 МПа в 1971 г. (на 3–4 МПа в год, однако в 1969 г. оно снизилось на 11,5 МПа).

На нефтяном месторождении Веллингтон (Калифорния) за период с 1937 по 1960 г. оседание поверхности достигло 10 м. В Венесуэле оседание земной поверхности на нефтяном месторождении по соседству с озером Мара-Като так велико, что созданы плотины для защиты прибрежной зоны от наводнений.

В работе [5] делается вывод о том, что землетрясение возбуждается нефтяными разработками, а именно: отбором нефти и закачкой воды. Тем не менее по вопросу конкретных возбудителей землетрясения единых мнений нет.

По мнению авторов, землетрясения здесь возникали потому, что естественную зону предельно напряженного состояния осложнило появление техногенной зоны напряжений, вызванной нефтяными разработками. Вызванные техногенной деятельностью изменения в зоне предельно напряженного состояния приводят к интенсификации толчкообразного деформирования массива горных пород и усилению проявления сейсмичности в процессе видоизменения существовавшей ранее зоны предельно напряженного состояния.

3.2.5. При закачке воды в скважины

Большую роль в интенсификации сейсмической активности играет и такой вид воздействия на массив горных пород, как закачка воды в скважину. Так, в штате Колорадо (США) закачка сточных вод в скважину глубиной 3671 м в 1962–1966 гг. вызвала более 1500 толчков с магнитудой 1,5–3,4 и гипоцентром 1,5–5,5 км. Землетрясения начались после закачки 15,2 тыс. м³ воды [5].

Интенсификация сейсмической активности в данном случае, по нашему мнению, вызвана образованием под воздействием закачки воды новой зоны предельно напряженного состояния в массиве пород вокруг скважины.

3.2.6. При строительстве и эксплуатации гидростанций

В табл. 3.3 приведены данные о землетрясениях, стимулированных сооружением крупных водохранилищ (Н.И.Калинин и И.П.Кузин, 1982 г.). Связь между сейсмической активностью и уровнем заполнения водохранилища приведена на рис. 3.14 и 3.15.

Рассмотрим более подробно один из примеров влияния сооружения водохранилища на сейсмичность.

Таблица 3.3

Данные о землетрясениях,
возникших под влиянием крупных водохранилищ
(по Н.И. Калинину, И.П. Кузину, 1982 г.)

Плотина (страна)	Высота, м	Объем водохранилища, км ³	Год наполнения	Год наиболее сильного землетрясения	Магнитуда (интенсивность)
Марафон (Греция)	63	0,6	1930	1938	5
Гувер (США)	221	37,5	1936	1939	5
Кларк-Хилл (США)	67	2,5	1952	1974	4,3
Синфыньцзян (КНР)	105	10,5	1959	1962	6,1
Кариба (Родезия)	128,3	160,3	1959	1963	5,8
Грандваль (Франция)	88	0,3	1959	1963	–
Канеллес (Испания)	150	0,7	1960	1962	–
Куробэ (Япония)	186	0,2	1960	1961	4,9
Вайонт (Италия)	261	0,1	1961	1963	–
Монтеньяр (Франция)	155	0,2	1962	1963	4,9
Койна (Индия)	103	2,7	1964	1967	6,5
Кремаста (Турция)	165	4,7	1965	1966	6,3
Бенмор (Новая Зеландия)	118	2,1	1965	1966	5
Баджина-Баста (Югославия)	89	0,3	1966	1967	4,5-5
Оровил (США)	236	4,3	1968	1975	5,9
Нурекская (СССР)	300	10,4	1969	1972	4,5
Талбинго (Австралия)	162	0,9	1971	1972	3,5
Дожкасси (США)	133	1,4	1972	1975	3,2
Токтогульская (СССР)	215	19,5	1972	1979	4,7
Кебан (Турция)	207	31	1973	1974	3,5
Чиркейская (СССР)	233	2,7	1974	1974	4,9
Ингури (СССР)	272	1,1	1978	1979	4,3

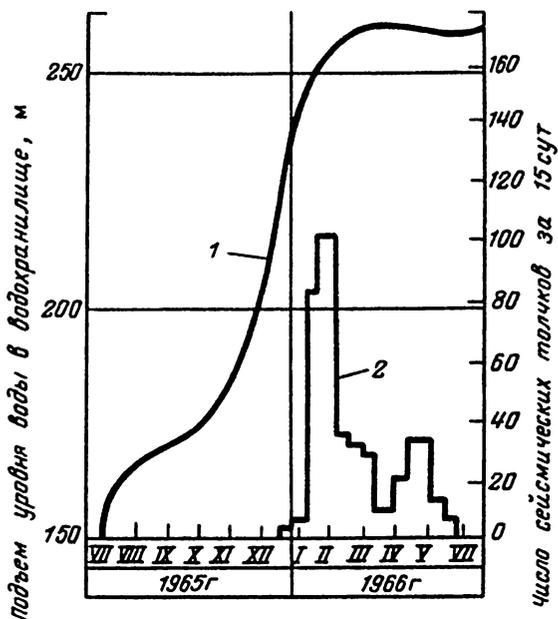


Рис. 3.14. Графики повышения уровня воды в водохранилище (1) и сейсмической активности (2) (по И.Г.Киссину)

А.М.Бабаевым, В.К.Кулагиным, А.М.Лысковым и другими проанализирована возбужденная сейсмичность вблизи Нурекского водохранилища – до, во время и после его заполнения [5].

До заполнения водохранилища наблюдалось убывание количества слабых землетрясений с глубиной. Локальный максимум землетрясений наблюдался на глубине 20–52 км. На глубинах менее 10 км было сосредоточено 80% слабых землетрясений.

С 1960 по 1971 г. в среднем за квартал возникло 26 землетрясений, с начала же 1971 г. (начало заполнения водохранилища) средний уровень повысился до 40 событий, а в последнем квартале 1972 г., когда уровень воды достиг 100 м, произошло 113 землетрясений. Достаточно высокий уровень сохранился и в первом квартале 1973 г. (85 толчков), после чего число толчков упало до уровня 1971 г. Корреляция между колебаниями уровня воды и числом землетрясений прослеживается достаточно отчетливо. Отмечено изменение глубины очагов землетрясений. Если с 1969 по 1972 г. 80% очагов возникло на глубине до 5 км, то в период с 1972 по 1973 г. на этой глубине произошло 95% толчков.

Сосредоточение толчков наблюдается в районе ниже плотины, где имеет место максимальный перепад давлений в массиве горных пород.

Приливные деформации Земли, по данным И.Г.Киссина [5], вызывают колебания напоров в водоносных горизонтах с амплитудой до

7 см и более. Перед землетрясениями уровень воды в скважинах повышается. Так, в Австралии перед семибалльным землетрясением 14 октября 1968 г. за 1,5 ч повышение составило 29 мм, а через два-три часа после землетрясения уровень воды стал плавно снижаться.

В районе озера Иссык-Куль 5 июля 1970 г. произошло 8–9-балльное землетрясение. В скважине, расположенной в 35 км западнее эпицентра, повышение уровня воды составило 15 см. Повышение уровня воды, по-видимому, связано с дополнительным сжатием массива горных пород вследствие возрастания его напряженности.

По данным Н.И. Николаева [5], вскоре после начала заполнения водохранилища Синфыньцзян (Китай) с высотой плотины 105 м и объемом 11500 млн. м³ начались землетрясения. Сильный толчок с магнитудой 6,1 произошел 19 марта 1962 г. (8 баллов). К декабрю 1972 г. произошло более 250 тыс. толчков. Эпицентры землетрясений в значительной мере расположены вблизи плотины, где глубина воды максимальная. Гипоцентры – на глубине 1–11 км (чаще 4–7 км). За 20 дней до главного толчка с магнитудой 6,1 сейсмичность постепенно уменьшилась и землетрясений с магнитудой большей или равной 3 не было. В результате землетрясения произошло повреждение плотины, разрушились здания и сооружения.

Ниже приведены интересные обобщения Н.И. Николаева о проявлении сейсмичности при гидростроительстве [5].

1. По величине магнитуды возбужденных землетрясений выделяются: водохранилища с микросейсмичностью, водохранилища с землетрясениями с магнитудой от 3 до 5, наряду с микросейсмичностью, водохранилища с возникновением землетрясений с магнитудой более 5, сопровождающихся большим числом афтершоков. Для подавляющего же большинства водохранилищ, в том числе очень

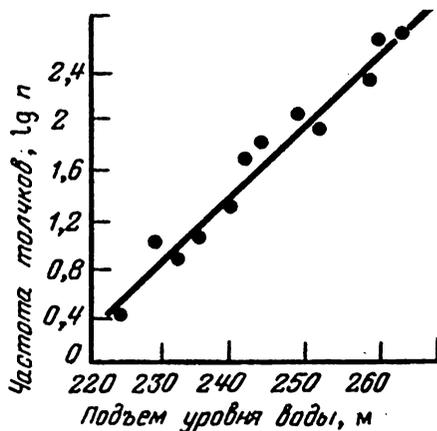


Рис. 3.15. Зависимость числа толчков от подъема уровня воды в водохранилище Кремета (по И.Г.Киссину)

емких и с большой высотой плотин (более 100 м), характерно отсутствие сейсмичности.

2. Глубина очагов возбужденной сейсмичности не превышает 5–6 км, число толчков при заполнении водохранилищ изменяется от десятков до нескольких тысяч в год.

3. Большинство возбужденных землетрясений располагается в районе плотины.

4. Усиление сейсмической активности происходит после поднятия уровня воды, ослабление – при стабилизации уровня и резкое ослабление – при его понижении.

5. Для водохранилищ с интенсивными землетрясениями соотношение магнитуды наибольшего афтершока и главного толчка является высоким (0,9).

6. Опасная сейсмическая активность возникает при высоте плотины более 90 м и объеме воды более 10^9 м³.

7. Выявляются зависимости толчков от геологических условий – геоморфологической обстановки, геологического строения, тектонических и тектонофизических условий:

расчлененный рельеф (наиболее экономичный вариант для проектировщиков), сложное геологическое строение (Нурек, Токтогул, Гиркей, Ингури), наличие интенсивных новейших тектонических движений, активная естественная сейсмичность района благоприятствуют проявлению сейсмичности при заполнении водохранилища;

наличие мягких грунтов, спокойно залегающих осадочных горных пород, отсутствие разломов не способствуют накоплению напряжений и не приводят к толчкам после заполнения водохранилищ.

8. Уровень напряжений, вызываемых тектоническими деформациями, еще до появления водохранилища должен быть близким к прочности среды.

В результате анализа выводов Н.И. Николаева можно установить: в районах, сейсмически не активных, т. е. в которых в естественном состоянии предельно напряженное состояние массива горных пород отсутствует, заполнение водохранилища не сопровождается сейсмической активностью;

в районах, активных по проявлению сейсмичности, т. е. находящихся в предельно напряженном состоянии, при заполнении водохранилища имеет место переход массива в предельно напряженное состояние другого порядка и, вследствие того, происходит активизация сейсмичности;

активизация сейсмичности происходит главным образом в периоды нарушения стабильности в массиве горных пород (повышение уровня вода с определенного уровня, его снижение).

3.2.7. При бурении сверхглубоких скважин

С увеличением глубины бурения сверхглубоких скважин «Кольская СГ-3» и «Уральская СГ-4» существенно осложнились условия их проходки. Прежде всего возникают проблемы устойчивости ствола скважины, кавернообразования, увеличения кривизны. По этим причинам имеют место заклинивания бурильной колонки и прихвата бурового инструмента.

Эти сложности связаны прежде всего с высокими напряжениями, действующими в массиве горных пород. Известно, что районы бурения указанных скважин характерны тем, что горизонтальные напряжения в массиве значительно превышают вертикальные напряжения, определяемые весом породы, что говорит прежде всего о наличии в них условий для существования предельно напряженного состояния массива горных пород в его естественном состоянии.

На больших глубинах в процессе бурения скважины возникает предельно напряженное состояние и вокруг самой скважины. Этот переход в предельно напряженное состояние сопровождается кавернообразованием, повышенным выходом выбуриваемого материала и происходит толчкообразно, вызывая прихваты бурового инструмента.

В связи с этим можно обратить внимание на неправильное, по мнению авторов, толкование обнаруженного при бурении «Кольской СГ-3» явления скачкообразного уменьшения плотности горных пород (на глубине 4,5–6,8 км), скоростей прохождения упругих волн, увеличения пористости пород. Эти данные были получены на образцах, прошедших «обработку» при их переходе в зону предельно напряженного состояния вокруг скважины или – при измерениях скорости прохождения упругих волн в зонах, перешедших в предельно напряженное состояние.

В подтверждение сказанного обратимся к результатам испытаний на установке высокого давления (ВНИМИ).

Опыты на установке высокого давления, выполненные во ВНИМИ, показывают, что в таких условиях выход буровой мелочи в процессе бурения возрастает по сравнению с номинальным, горные породы вокруг скважины переходят в предельно напряженное состояние, сопровождаясь эффектом разуплотнения пород и, следовательно, повышением пористости и снижением скорости прохождения упругих волн. При бурении скважины в образце из крепких пород, когда радиальные напряжения на образец в давилочной установке в два–три раза превышают предел прочности при сжатии, выход буровой мелочи возрастает в три–пять раз против номинального. Увеличение выхода буровой мелочи (штыба) при бурении шпуров (скважин) особенно четко

установлено при ведении работ по углю на глубинах 700–1000 м на угольных месторождениях Кузбасса, Воркуты, Кизела и др. Как уже отмечалось, в зонах опорного давления, особенно в целиках угля, выход буровой мелочи часто превышает номинальный в 5–30 и более раз.

Таким образом, вокруг глубоких и сверхглубоких скважин при их бурении возникает зона предельно напряженного состояния, что должно учитываться при выборе способов, средств и режима бурения скважин. В противном случае бурение сверхглубоких скважин типа СГ-3 и СГ-4 ниже глубины 10–12 км становится невозможным.

Кроме того, поскольку основное назначение сверхглубоких скважин заключается в оценке физико-механических свойств перебуриваемых пород, то все методы оценки, которые применяются в настоящее время, должны учитывать наличие зон предельно-напряженного состояния, возникающего вокруг скважины. К сожалению, это обстоятельство в разведочных работах не учитывается, что сопряжено со многими неточностями и, даже, ошибками.

Этот вопрос может быть проиллюстрирован на примере использования метода акустического каротажа*, заключающегося в установлении излучателей и приемников упругих колебаний (как правило от 2 до 4), возбуждении в пересеченных скважиной горных породах упругих колебаний, их приеме, измерении временных и амплитудных параметров принятых сигналов и вычислении параметров, характеризующих физико-механические свойства горных пород, окружающих скважину**. Основными характеристиками горных пород, изучаемыми с помощью акустического каротажа, являются скорости распространения V_p , V_s и коэффициенты затухания α_p , α_s продольных и поперечных волн соответственно. С ними функционально связаны все остальные характеристики горных пород, определяемые при акустическом каротаже, такие как модули упругости, пористость и т.д. Устройство для производства данных работ (например, аппаратура типа СПАК) содержит каротажный зонд*** и наземный измерительно-вычислительный блок.

Однако при выполнении данных работ не учитывается изменение упругих свойств в окрестности скважины за счет действия «эффекта опорного давления» [39]. Прохождение горной выработки (в том числе и скважины) изменяет геомеханические и геофизические параметры

* Составлено с участием А.И.Баданина, С.Н.Мулева и В.С.Сидорова.

** Латышева М.Г., 1975, Запорожец В.М., 1983.

*** Стандартные зонды аппаратуры типа СПАК имеют один приемник (П) и два излучателя (И) упругих колебаний с расстоянием между излучателями $S=0,5$ м и расстоянием между излучателем и приемником $LS=1,5$ м (принятое обозначение И0, 5И1, 5П или И0, 5И2, 0П)

горных пород в ее окрестности. Характер изменения параметров с удалением от выработки описывается теорией опорного давления. Некоторые кривые, характеризующие изменение ряда параметров в зависимости от расстояния от горной выработки (скважины), приведены на рис. 3.16.

Это приводит к тому, что измерения параметров в зависимости от разноса L между излучателем и приемником, проводятся либо в разгруженной зоне, где упругие свойства пород существенно отличаются от реальных (без влияния скважины), либо регистрируются первые вступления волны, проходящей по максимуму опорного давления (там максимальная скорость, см. рис. 3.16, кривая z). Получение характеристик за максимумом опорного давления с использованием принятого в настоящее время подхода невозможно. Чем на большей глубине от поверхности земли проводятся исследования, тем больше радиус влияния скважины и тем большая ошибка возникает в определении упругих свойств.

Авторами предложен способ, учитывающий изменение упругих свойств в окрестности скважины за счет действия «эффекта опорного давления».

Для этого, предварительно, расчетным путем или с помощью рекогносцировочных измерений определяют расстояние от стенки скважины до максимума опорного давления, излучают и принимают упругие колебания не менее двух раз с глубиной проникновения акустической волны в горные породы, не меньшей расстояния от

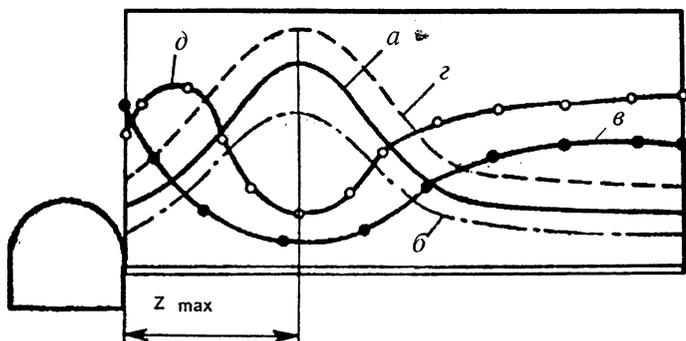


Рис. 3.16. Изменение параметров по мере удаления от горной выработки:

a – распределение напряжений в зоне опорного давления; b – распределение числа дисков с одного метра скважины; z – распределение электросопротивлений; z – распределение скоростей сейсмических волн; d – распределение усилий вдавливания индентора в забой и стенки скважины

стенки скважины до максимума опорного давления, а также не менее четырех раз с глубиной, меньшей этого расстояния, и вычисление параметров, характеризующих свойства горных пород, производят с использованием аналитических зависимостей изменения опорного давления от расстояния до скважины.

Аналитические кривые, приведенные на рис. 3.16, описываются (аппроксимируются) либо кусочно (опорное давление до точки максимума описывается линейной зависимостью от расстояния до выработки), либо непрерывной зависимостью, которая и необходима для решения задачи.

Как показывают приведенные исследования, зависимость, фактически и по форме наиболее близко описывающая характер изменения какого-либо параметра с удалением от выработки, имеет вид

$$P(z) = P_0 + \frac{(P_\infty - P_0)z^2}{\sqrt{(k^2 - z^2)^2 + 4n^2z^2}}, \quad (3.1)$$

где $P(z)$ – исследуемый параметр; P_0 – исследуемый параметр на границе горной выработки (скважины); P_∞ – исследуемый параметр на бесконечности (выработка влияния не оказывает); z – расстояние от выработки; k, n – постоянные.

Например, для скорости распространения акустической волны

$$V(z) = V_0 + \frac{(V_\infty - V_0)z^2}{(k^2 - z^2)^2 + 4n^2z^2}, \quad (3.2)$$

При этом значение $V(z)$ достигает максимума $V(z)_{\max}$ при

$$Z_{\max} = \sqrt{(k^2 - 2n^2)}$$

(что равно расстоянию до максимума опорного давления).

Максимум опорного давления достигается при расстоянии от стенки скважины или выработки

$$Z_{\max} = 1,1 \left(\frac{\mathcal{H}}{\sigma_{с.жс}} \right)^{2/3} R, \quad (3.3)$$

величина максимума

$$\sigma_{\max} = 1,5 \mathcal{H} \left(\frac{\sigma_{с.жс}}{\mathcal{H}} \right)^{1/3} + \sigma_0, \quad (3.4)$$

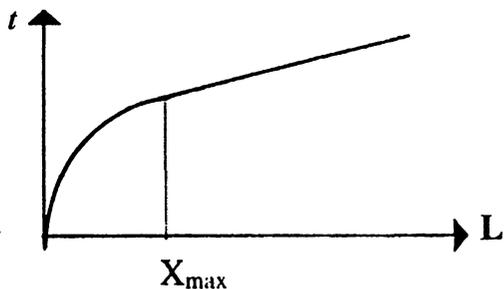


Рис. 3.17. Вид общего годографа волны

где γ – гравитационная постоянная; H – глубина скважины (глубина скважины до точки, в которой изучаются параметры горной породы); R – радиус скважины; $\sigma_{ск}$ – постоянная, характеризующая горную породу.

Рассмотрим влияние опорного давления на результаты акустического каротажа.

Время прохождения акустической волны от излучателя до приемника зависит от разноса L между ними. Волну, регистрируемую по первому вступлению при каротаже, можно рассматривать для разноса $L \leq X_{max}$ (X_{max} – минимальный разнос, соответствующий глубине проникновения луча до максимума опорного давления), как рефрагированную волну, а при разносах $L > X_{max}$, как головную волну. Стандартный вид общего годографа волны, регистрируемой по первому вступлению, приведен на рис. 3.17.

Приведем для этих частей годографа некоторые соотношения, необходимые в дальнейшем.

Для первой части общего годографа (рефрагированная волна).

Соотношение, связывающее разнос L и максимальную глубину проникновения луча Z_m , следуя В.П.Нолюконову (1990), описывается формулой:

$$L(Z_m) = 2 \int_0^{Z_m} \frac{V(Z)dZ}{\sqrt{(V^2(Z_m) - V^2(Z))}}. \quad (3.5)$$

Приближенное соотношение на основе формулы Чибисова (Герглотца–Вихерта) (там же, стр. 199):

$$\left(\frac{dV}{dz} \right)_{z_m} \approx \frac{\pi^2 z_m V(z_m)}{L^2}. \quad (3.6)$$

Из представления годографа рефрагированной волны в виде ряда для какой-то максимальной глубины проникновения луча $Z = Z_m$

выразим $\Delta t/\Delta L$ (здесь для наглядности берем только 2 первых члена разложения. В принципе, суть не изменится, если для повышения точности брать большее количество членов ряда, только формулы будут более громоздкие):

$$\frac{\Delta t}{\Delta L} \approx \frac{dt}{dL} = \frac{1}{V_z} + \frac{L^2 \left(\frac{dV}{dz} \right)_{z_m}}{8V_z^3} + \dots \quad (3.7)$$

Вторая часть годографа (головная волна). Скорость, определенная по годографу для $L \geq X_{\max}$, равна скорости в области максимума опорных нагрузок.

$$\Delta L / \Delta t \approx V_{\max} = \text{const} \quad (3.8)$$

Исходя из общего годографа (см. рис. 3.17) и количества параметров, подлежащих определению, в формулах типа (3.1) необходимо при измерении получить минимум две точки на годографе в зоне головной волны и четыре – в зоне рефрагированной волны (исходим из количества неизвестных в формуле (3.1)).

На основании (3.5) – (3.8) напишем систему уравнений для нахождения скорости V_α вне зоны опорного давления (используем также формулу 3.1):

– первое уравнение из данных, полученных при наблюдении в зоне головной волны:

$$\frac{\Delta L_r}{\Delta t_r} = V_{\max} = V_0 + \frac{(V_\alpha - V_0) z_{\max}^2}{\sqrt{\left((k^2 - z_{\max}^2)^2 + 4n^2 z_{\max}^2 \right)}}, \quad (3.9)$$

где $z_{\max} = \sqrt{k^2 - 2n^2}$; ΔL_r и Δt_r – разность соответственно разносов между излучателем и приемником, и времен прихода головной волны;

– уравнения из данных, полученных при наблюдении в зоне рефрагированной волны (всего 3 пары уравнений при наличии 4 точек на годографе в зоне рефрагированной волны):

$$\frac{\Delta t_{pi}}{\Delta L_{pi}} \approx \frac{1}{V_{zi}} + \frac{L^2 \left(\frac{dV}{dz} \right)_{z_{mi}}}{8V_{zi}^3} + \dots \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{dV}{dz} \right)_{z_{mi}} \approx \frac{\pi^2 z_{mi} V(z_{mi})}{L^2}, \quad (3.11)$$

где $i = 1, 2, 3$; ΔL_{pi} и Δt_{pi} – разность соответственно соседних разносов между излучателем и приемником, и времен прихода рефрагированной волны.

Всего получили 7 уравнений с 7 неизвестными: $k, n, V_\alpha, V_\rho, z_{mi}$ (где $i=1, 2, 3$).

Система уравнений (3.9)–(3.11) решается численно. В результате получаем V_α и другие параметры аппроксимации для формулы (3.1), характеризующие параметры горной породы.

При наличии большого количества точек наблюдения на годографе в зоне рефрагированной волны возможно получение оценок точности нахождения искомых параметров.

Использование предлагаемого способа для акустического исследования упругих свойств пород в скважинах позволяет увеличить достоверность и точность измеряемых параметров. При этом, исходя из фактического материала, можно избежать ошибки, достигающей десятков процентов (зависит от глубины скважины и пересеченных горных пород), что, соответственно, поможет давать более достоверные заключения по материалам исследований (например, при оценке газо- и нефтесодержания) и избежать существенных материальных потерь из-за ошибочной оценки искомых параметров.

3.3. НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕНИЯ

Рассмотренные выше представления о поведении угольных пластов в зонах предельно напряженного состояния, базирующиеся на обширных инструментальных наблюдениях в шахтах, на лабораторных испытаниях угля и пород, и примеры, характеризующие условия появления зон предельно напряженного состояния горного массива при других техногенных воздействиях позволяют сформулировать некоторые общие положения.

1. Литосфера в целом находится в своеобразном предельно напряженном состоянии. Однако это не означает, что каждый участок ее находится в таком состоянии. На фоне предельно напряженного состояния в массиве пород имеет место крайне дискретное распределение напряжений, когда участки с предельным состоянием перемежаются с участками относительно разгруженными. Именно такое дискретное распределение напряжений и, следовательно, потенциальной энергии упругого деформирования пород является источником нестабильности как в массиве литосферы в целом, так и на отдельных ее участках.

2. Естественные проявления сейсмичности имеют место на тех участках земной коры, которые испытывают интенсивное горизонтальное сжатие, достаточное для того, чтобы массив горных пород перешел в предельно напряженное состояние. Динамические явления с выделением сейсмических волн есть результат последовательного нарушения и восстановления равновесия на участках массива горных пород, находящихся в предельно напряженном состоянии.

3. В случаях техногенного воздействия на такой массив (разработка полезных ископаемых, сооружение и заполнение водохранилищ, бурение глубоких скважин, атомные или обычные мощные взрывы и др.) на существующее поле предельно напряженного состояния накладывается возникающее дополнительно поле, обусловленное инженерной деятельностью. Массив горных пород переходит в предельно напряженное состояние *второго порядка* с обязательным проявлением сейсмичности.

Последующие техногенные воздействия каждый раз вызывают новые нарушения равновесия на отдельных участках массива пород и, соответственно, возникают предельно напряженные состояния третьего, четвертого и других порядков, сопровождаясь сейсмическими явлениями той или иной интенсивности.

Таким образом, массив горных пород участка земной коры, находящийся до техногенного воздействия в предельно напряженном состоянии, в результате многократного техногенного воздействия в отдельных его частях может оказаться составленным из многих участков с предельно напряженным состоянием, размеры и формы которых зависят от величины и степени техногенных воздействий.

4. На участках земной коры, в своем естественном состоянии свободных от зоны предельно напряженного состояния, при достаточно сильном техногенном воздействии, массив горных пород также может перейти в предельно напряженное состояние, сопровождаясь проявлением геодинамических явлений и сейсмичности.

5. Предельно напряженное состояние – вид, форма, условие существования геомеханической, а вернее, геодинамической системы «массив горных пород». Более того, предельно напряженное состояние участка массива горных пород или земной коры в целом, понимаемое как предельное насыщение потенциальной энергией, является главным условием, стимулом постоянного изменения состояния массива, его неустойчивости.

6. Раскрытие природы образования зон предельно напряженного состояния в земной коре и на ее отдельных участках, взаимодействия этих зон, их развития и видоизменения в пространстве и времени позволяет уже в настоящее время ставить вопрос о возможности

управления поведением массива горных пород в процессе безопасного и экологичного освоения недр и земной поверхности.

7. Образование зон предельно напряженного состояния при бурении скважины как результат неупругого деформирования некоторого объема пород вокруг скважины сопряжено со значительным изменением физико-механических свойств пород, пересекаемых скважиной, и тем большим, чем в общем случае больше глубина скважины и меньше прочность пород, окружающих ее. Поэтому, все применяющиеся методы оценки свойств пород, испытавших воздействие процесса образования зоны предельно напряженного состояния, должны учитывать это и корректироваться. Это касается и кернов, извлекаемых в процессе бурения скважины, и геофизических методов, применяемых для оценки свойств массива пород с использованием скважин.

ПРИРОДА И ВЕЛИЧИНА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ В ЛИТОСФЕРЕ

4.1. О ГЕОДИНАМИКЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ЛИТОСФЕРЫ

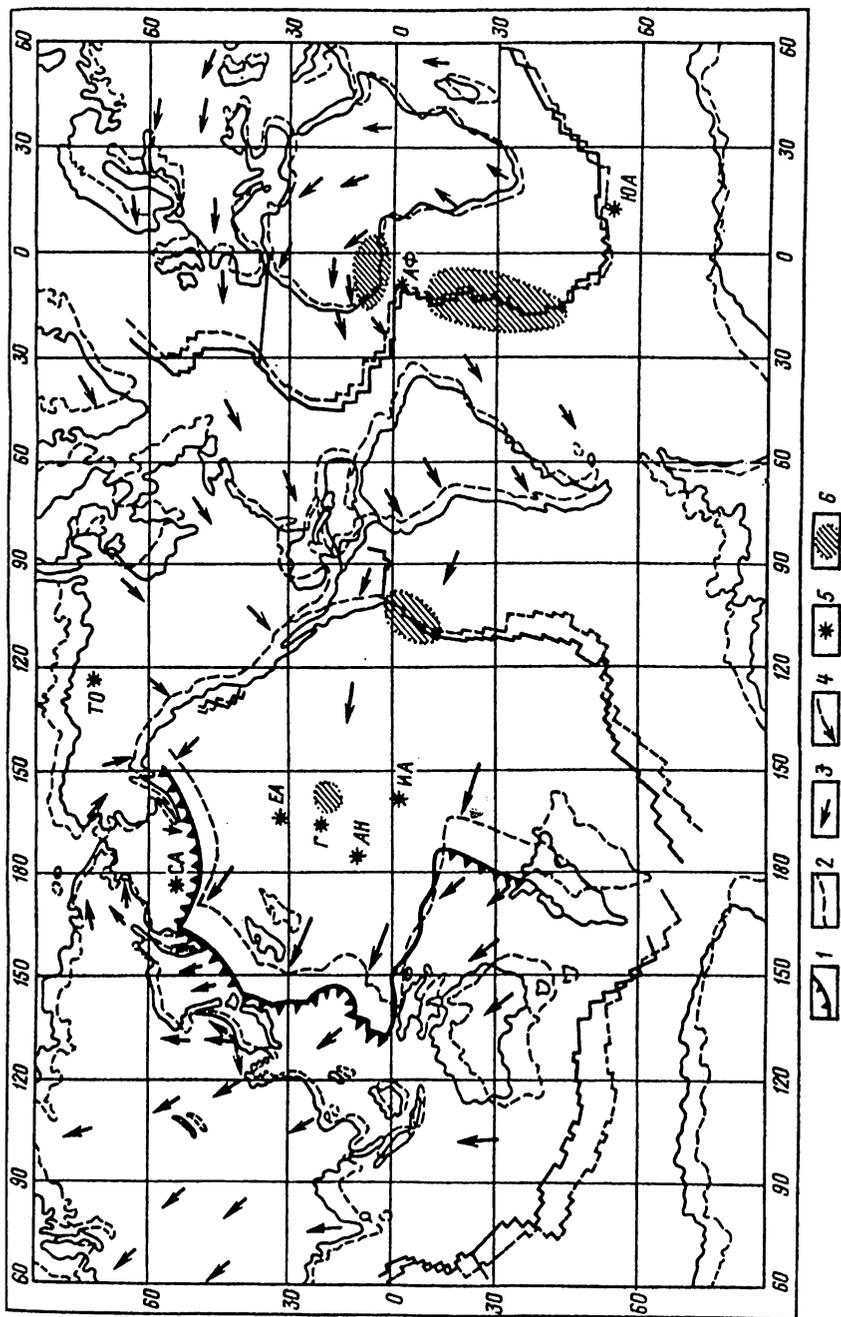
Наиболее сложный и нерешенный вопрос – величина активных горизонтальных сил, ответственных в конечном счете за напряженное состояние земной коры и литосферы в целом, перемещение литосферных плит и силовое взаимодействие блоков разного иерархического ранга.

Величины перемещения литосферных плит привлекают внимание многих исследователей. Эти величины [35] находятся в пределах 30–40 мм/год. В 1983 г. были получены результаты измерений со спутников о перемещении Австралии и ложа Тихого океана относительно Северной Америки в том же направлении, которое следует из теории тектоники плит, но со скоростью в 1,5–2 раза большей, чем вытекает из осреднения за первые миллионы лет (Прим. ред. [35]).

С 1979 г. ведутся наблюдения за взаимным перемещением литосферных плит с помощью метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, точность которого достигает сантиметров и даже

Рис. 4.1. Карта движения главных литосферных плит Земли и их границы по отношению к системе островодужных микроплит запада Тихого океана за последние 10 млн лет:

1 – система островных дуг запада Тихого океана; 2 – положение контуров континентов и других границ 10 млн лет назад; 3 – направление движения литосферных плит; 4 – направление движения Евразийской плиты; 5 – полюса вращения литосферных плит по отношению к островодужным микроплитам запада Тихого океана (ТО – Тихоокеанской, ЕА – Евразийской, СА – Северо-Американской, ЮА – Южно-Американской, АФ – Африканской, ИА – Индо-Австралийской, АН – Антарктической, Г – Гавайской горячей точки); 6 – области, сравнительно неподвижные относительно островодужных микроплит запада Тихого океана



миллиметров [35]. Из 22 существующих наблюдаемых пунктов 15 находятся на территории Северо-Американской плиты (США), 6 пунктов – на территории Евразийской плиты (Западная Европа) и 1 пункт – на территории Африканской плиты. Этими наблюдениями установлено «разбегание» Северо-Американского континента и Западной Европы со скоростью 4,5 см/год. Центральная часть Тихоокеанской плиты движется в западно-северо-западном направлении со скоростью 7,5 см/год. Калифорнийская часть Тихоокеанской плиты движется в западно-северо-западном направлении со скоростью 5 см/год. Евразийская плита перемещается навстречу Тихоокеанской плите со скоростью 3 см/год.

Приведенные результаты наблюдений являются доказательством правомерности теории литосферных плит. Полученные в результате инструментальных наблюдений направления движения литосферных плит практически согласуются со схемой, приведенной на рис. 4.1 [35].

Вопрос о движущих силах в тектонике литосферных плит является чрезвычайно важным, однако не нашел пока однозначного решения.

Наиболее достоверной большинство ученых считает гипотезу, согласно которой движение литосферных плит осуществляется за счет конвективных течений, имеющих место в астеносфере. На рис. 4.2 [35] приведены результаты моделирования этих представлений.

Однако приведенная на рис. 4.2 схема конвективных движений является гипотетической и, по мнению авторов, не имеет достаточного обоснования. Дрейф континентов, изображенный на рис. 4.1 и подтверждаемый инструментальными наблюдениями, может быть объяснен и из соображений, изложенных в работе [40].

Известно, что в земной коре постоянно, хотя и неравномерно, идут процессы, связанные с наращиванием ее в районах развития океанских и континентальных рифтовых зон и поглощением в зонах поддвижения (субдукции) океанских плит под континентальные плиты. Если добавить к этому синорогенный рифтогенез, происходящий в областях коллизии литосферных плит, то оказывается [12], что около 80% поверхности Земли созданы рифтогенным режимом. Попытаемся дать краткую характеристику этих процессов, воспользовавшись достаточно обширными результатами исследований и наблюдений, имеющимися в науках о Земле. Дальнейшее изложение этого вопроса – по книге А.Ф.Грачева [12].

Учение о рифтогенезе согласуется с научными положениями, развиваемыми в науке о тектонике плит. Предполагается, что океанские и континентальные рифтовые зоны появляются в местах утонения тектонических плит при наличии проплавливающего действия горячей аномальной мантии, механически замещающей более холодную верхнюю

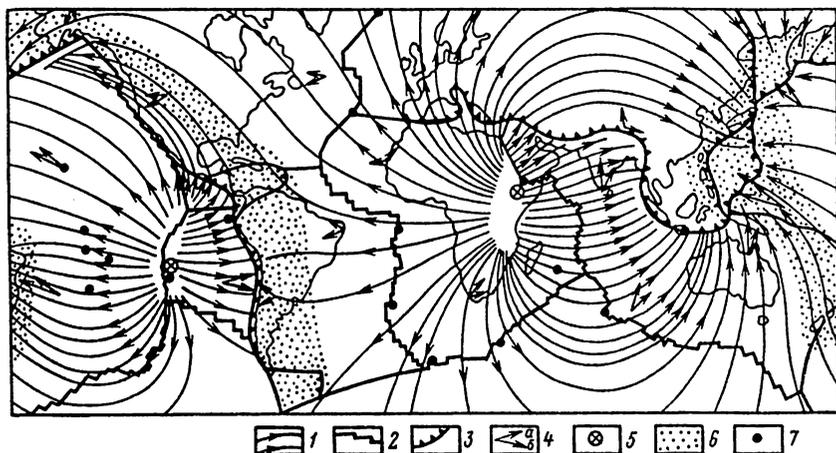


Рис. 4.2. Карта моделированных линий течений в астеносфере и их соотношения с движением литосферных плит на поверхности Земли (составлена Л.А.Савостиным, П.А.Аучковым по модели А.В.Каракина и Л.И.Лбоковского):

1 – линия течений; 2 – границы наращивания и скольжения литосферных плит; 3 – границы поглощения литосферных плит; 4 – направление движения литосферных плит (а – по отношению к системе островных дуг запада Тихого океана; б – по отношению к системе горячих точек); 5 – предполагаемые центры восходящих ветвей конвективных течений; 6 – предполагаемые области нисходящих течений (по О.Г.Сорохтину, 1974 г.); 7 – главные горячие точки.

мантию. При этом ход процесса определяется мощностью и вязкостью линзы аномальной мантии. Срединно-океанические хребты имеют общую протяженность свыше 80 тыс. км, занимая около трети площади Мирового океана, что равно общей площади материков. Высота срединно-океанических хребтов обычно не превышает 1 км. В результате деформации земной коры блоковая структура в районе срединно-океанских хребтов прослеживается на расстояние до 500–700 км по обе стороны. Ширина и глубина рифтовой долины, залегающей между хребтами, например, в Атлантическом океане, равны соответственно 30 км и 1500 м. В центральной части располагается внутреннее дно шириной 1,5–3 км и глубиной 100–400 м, разделяющееся на две впадины шириной от 800 до 1300 м. Медианный хребет состоит из отдельных сегментов, разделенных понижениями, длиной до 3 км. Обнаружена система открытых трещин, параллельных оси внутреннего дна с шириной от нескольких сантиметров до десятков метров, с тенденцией возрастания ширины трещин с удалением от оси внутреннего дна (суммарная

ширина трещин составляет 6–8% ширины внутреннего дна). Рельеф внутреннего дна рифтовой долины обусловлен вулканической деятельностью. Обычно вулканы относятся к центральному типу, но обнаружены и системы линейных вулканов длиной до 10 км. Важным элементом рельефа срединно-океанических хребтов является образование поперечных желобов (впадин) и прилегающих к ним поднятий (поперечных хребтов), образование которых связано с трансформными разломами. Ширина зон поперечных разломов меняется от первых километров до 25–40 км. Склоны поперечных желобов обычно крутые. Глубина желобов и высота поперечных хребтов, как правило, больше соответственно глубины и высоты рифтовых впадин и гор.

Наращение земной коры в рифтовой зоне и, следовательно, расхождение плит происходит со скоростью 1–4 см в год. Процесс нестационарный: скорость меняется во времени, вплоть до полной остановки. Причина нестационарности процесса заключается в изменении скорости субдукции и морфологии зоны Заварицкого–Беньефа. Скорость движения, размеры и вес плит, по-видимому, характеризуют силы воздействия магмы в зоне раздвига, что подлежит более углубленному сопоставлению и исследованию в будущем. Имеет место асимметрия раздвижения плит. Интересно отметить, что срединно-океанские хребты не имеют слепого окончания в океане: приближаясь к материку, они продолжают там в виде зон высокой сейсмической, тектонической и вулканической активности [12].

Континентальные рифтовые зоны имеют общие особенности рельефа: абсолютные высоты не превышают 3500 м; асимметричный поперечный профиль с равной высотой хребтов по обе стороны рифтовой впадины; исключительная линейность, прослеживающаяся на расстоянии первых тысяч километров при ширине зон до 50 км. Эти особенности присущи материковым рифтам: Африкано-Аравийскому рифтовому поясу, Байкальской рифтовой зоне, Момскому рифту, Рейнскому грабену. Особое место занимают рифтовая зона Запада США, имеющая ширину около 1000 км при общей протяженности 3500 км. Зона представлена параллельными впадинами и поднятиями, образующими клавишную систему. Нечто подобное представляет собой рифтовая зона Западно-Сибирской плиты в части сочетания большого числа элементарных рифтов. Магмопродуктивность континентальных рифтов на порядок ниже океанических, однако все они имеют проявления вулканизма.

С мировой рифтовой системой связано около 3% всех землетрясений и 6% сейсмической энергии Земли. Эпицентры землетрясений приурочены к осевой зоне срединно-океанических хребтов и к системам поперечных разломов с отклонениями от оси хребта или от транс-

формного разлома не более первых километров. При этом все сильные землетрясения с магнитудой более 7 приурочены к зонам трансформных разломов. Осевая зона характеризуется землетрясениями с магнитудой 4–5,5. Глубина очагов в 90% землетрясений обычно равна 2–5 км, вообще не превышает 8 км. Наблюдаются рои землетрясений при отсутствии главного толчка. Небольшой гипоцентр землетрясений, приуроченных к осевой зоне хребтов, объясняется, по-видимому, тем, что температура пород здесь составляет до 500° С уже на глубине 1–2 км и потому уже на глубинах более 5–8 км из-за повышения пластичности пород толчкообразное разрушения их маловероятно [12].

Сейсмичность материковых рифтов во многом имеет общие черты с рифтовыми зонами срединно-океанских хребтов, с тем отличием, что она имеет большее рассеяние землетрясений. Эпицентры землетрясений располагаются как в рифтовых впадинах, так и за их пределами, часто в пределах хребтов, особенно в еще развивающихся зонах. Магнитуды землетрясений материковых рифтов равны в среднем 4,5–5,4. Такие магнитуды характерны для внутририфтовых толчков. С магнитудой, большей 6,5, землетрясения более редки и происходят во внутривпадинных перемычках и зонах взламывания хребтов. Подавляющее число землетрясений происходит на глубинах менее 30 км.

4.2. ПРИРОДА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ В ЛИТОСФЕРЕ

Как уже отмечалось, наибольшее признание в последние десятилетия получила теория тектоники плит. Однако до сих пор не предложен приемлемый механизм, вызывающий движение плит [49]. Автор работы [49] пришел к этому выводу, проанализировав существующие гипотезы:

литосферные плиты пассивно «волокутся» из-за конвективных движений в мантии, появления мантийных струй, проявляющихся на поверхности Земли в виде «горячих точек»;

саморегулирующие механизмы тектоники плит: плита двигается за счет силы тяжести поддвигающегося края в зонах субдукции, потока вещества в пределах спредингового «клина» (возможная сила отталкивания, возникающая в хребтах, в этих моделях чрезвычайно мала и др.);

пассивное приспособление коры Земли к преобладающим динамическим условиям действующего плитотектонического цикла – рифтинг, дрейф и субдукция;

многие механизмы орогенеза основаны на гипотезах, отличных от теории литосферных плит.

В заключение автор [49] отмечает, что самым реальным представляется самовозбуждающийся процесс, вызываемый погружением плиты в зонах субдукции, однако и здесь встречаются трудности. Альтернативным вариантом является наличие тепловых конвективных течений; механическая вероятность существования таких потоков, по-прежнему, остается негарантированной.

Отдают предпочтение тому, что механизмом, который приводит в движение литосферные плиты, является конвективное течение материала в мантии [12, 14, 32, 49]. Эта гипотеза не имеет прямых доказательств своей достоверности. Более правдоподобный взгляд на вопрос о движущих силах необходимо, по мнению авторов, связывать с рифтогенезом [40].

Трудно согласиться [12] с тем, что рифтогенез в океане носит пассивный характер, т. е. по мере расхождения плит литосферы пространство между ними заполняется вновь поступающим материалом в виде даек, силлов и лавовых потоков, включая вулканические постройки, которые вместе и формируют новообразованную кору. По мнению авторов, во всем этом процессе как раз рифтогенез участвует активно, обеспечивая появление активных горизонтальных сил, которые оказываются достаточными для того, чтобы выполнять работу по раздвигу литосферных плит [40].

Как это можно было бы представить при использовании рассмотренных выше результатов и данных геомеханики и геодинамического районирования недр разрыв в земной коре и последующее раздвижение его бортов может быть объяснено двояко (рис. 4.3).

Идет поднятие одного или нескольких блоков в наиболее тонком участке земной коры, например, в районе океанического дна (рис. 4.3, а).

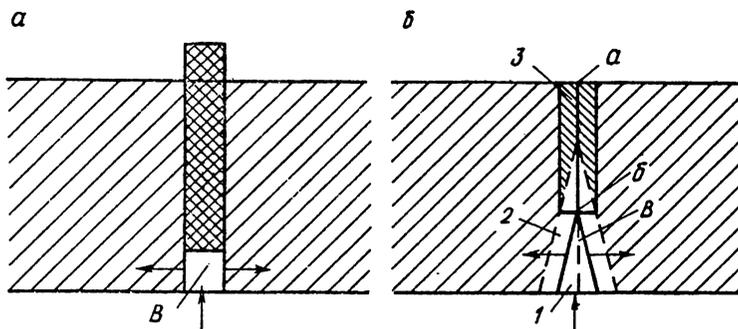


Рис. 4.3. Возможные варианты появления прорыва магмы:

а – при «клавишной работе» блочной структуры; б – при раздвигании образовавшейся области; аб – область образующегося разлома; 1 – область проникновения магмы; 2 – вмещающие породы; 3 – область растяжения.

Образуется область B , где появляются горизонтальные активные силы, способствующие ослаблению зажима блока и, следовательно, его дальнейшему выталкиванию вверх. По мере выталкивания блока растет высота области B и растут раздвигающие борта силы. Наконец, раздвигающие силы становятся настолько большими, что борта начинают расходиться, и магма вырывается на земную поверхность по границам воздымающегося блока. Последующее воздымание соседних блоков значительно облегчается раздвигающим действием магмы. Поэтому процесс по формированию зоны раздвига закономерно продолжается. Созданный механизм раздвига на достаточно большом протяжении обеспечивает горизонтальное движение литосферных плит в стороны от раздвига. Раздвиг далее сопровождается наращиванием земной коры за счет изливающейся магмы.

Возможно также появление «клинового» эффекта (рис. 4.3, б). Чем выше проникает магма, тем сильнее действие клина. Наконец, магма проникает до земной поверхности и создаются условия для раздвига. При этом надо иметь в виду, что на всем протяжении зоны раздвига (спрединга плит) имеет место неравномерное распределение величины горизонтальных сил, импульсивное их воздействие, в том числе и по толщине земной коры. Однако на некотором удалении от зоны спрединга происходит выравнивание величин этих сил и устанавливается постоянство их воздействия, т. е. образуются горизонтальные силы, вызывающие общее перемещение прилегающих плит. Степень действия горизонтальных сил на отдельные участки земной коры будет, по-видимому, определяться формой и размерами блоков, на которые разбиты прилегающие литосферные плиты, прочностью и деформируемостью каждого блока и группы блоков как взаимодействующей системы, неодинаковой толщиной земной коры и др. На рис. 4.4 представлена возможная схема развития среднеокеанского рифта в направлении, например, с юга на север – по границам блоков, имеющих или образующихся вновь в земной коре. При этом эффект достигается в результате последовательного разворота каждого блока. Представим, что аналогичная картина проникновения магмы может происходить и по другим контактам блоков, в том числе расположенным горизонтально.

Предложенная схема разрыва земной коры не противоречит и не опровергает схемы, предусматривающей плавление нижней части земной коры под воздействием воздымающейся линзы аномальной мантии, как это описывается в работе [12], а может ее лишь дополнять.

Необходимо остановиться далее на весьма принципиальном вопросе, касающемся зоны растяжения, возникающей в земной коре в районе срединно-океанического хребта. *Субдукционные* границы плит

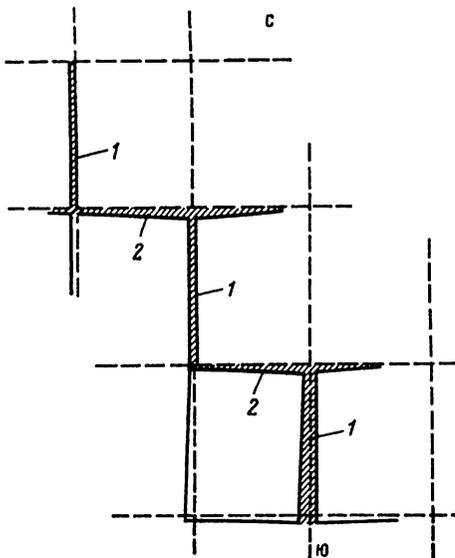


Рис. 4.4. Схема развития раздвига 1 и трансформных разломов 2

обычно находятся в состоянии сжатия, а к *рифтовым границам* плит, как правило, приурочены *напряжения растяжения*. В качестве доказательства этого приводится рис. 4.5 [49], отражающий сейсотектоническое поле напряжений Земли: к рифтовым зонам приурочены зоны растяжения.

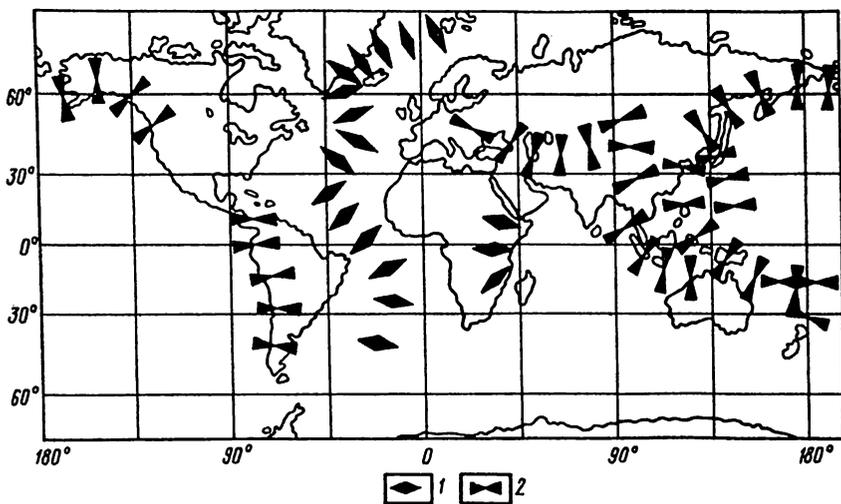


Рис. 4.5. Сейсотектоническое поле напряжений (по Шейдегеру, Балакиной и др.): 1 – растяжение; 2 – сжатие

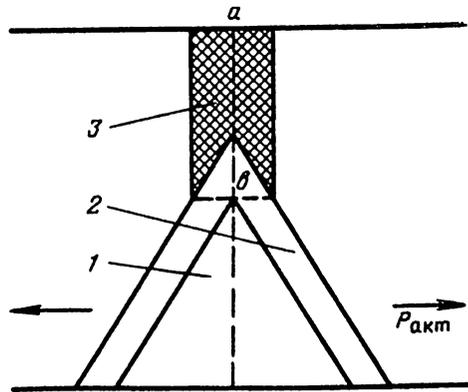


Рис. 4.6. Схема, иллюстрирующая поведение земной коры в зоне раздвигания

В работе [12] поставлен еще один чрезвычайно важный и интересный вопрос, касающийся зоны растяжения земной коры в области срединно-океанских хребтов. Поскольку срединно-океанские хребты являются областью растяжения земной коры (что следует, например, из механизмов в очагах землетрясений), то необходимо выяснить, на каком расстоянии от осевой зоны хребтов происходит смена знака полей напряжений?

Ответ на этот вопрос попытались дать в 1973 г. Л. Сайкс и М. Сбар, изучившие напряжения в очагах 75 сильных землетрясений, которые произошли внутри литосферных плит. По их мнению, в океанских бассейнах движения типа взбросов начинают развиваться за пределами изохроны 20 млн. лет; изохрона 10 млн. лет ограничивает область, где господствуют нормальные сбросы. Таким образом, переходная зона, в которой происходит смена полей напряжений, заключена между изохронами 10 и 20 млн. лет.

В работе [12] утверждается, что зона с напряжениями растяжения в районе срединно-океанического хребта имеет ширину не менее 300–400 км и является областью высокой тектонической активности.

Рассмотрим это, пользуясь схемой, приведенной на рис. 4.6 [42].

Допустим, что на участках 1, а затем и 2 магма проникала под давлением, существующим на границе между земной корой и верхней мантией. Выше магма тоже проникла, но не сплошным массивом, а по образовавшимся пустотам. На уровне рифтовой долины магма изливается спокойно под давлением, близким к весу столба воды над долиной (например, около 4 км). Поскольку под действием сил $P_{\text{акт}}$ в момент проникновения магмы на достаточно большую высоту (до точки б) начнется раздвиг плит, то на участке аб (см. рис. 4.6) возникнут напряжения растяжения. По мере роста раздвигания плит и соответствующего наращивания земной коры по обе стороны участка аб возникнут

кает зона растяжения Z , размеры которой не могут выходить за пределы равнобедренного треугольника высотой ab и основанием, расположенным по дну рифтовой долины,

$2ab \operatorname{tg}(45^\circ - \rho/2)$, где ρ – угол внутреннего трения пород.

В указанной зоне растяжения формируется внутреннее дно рифтовой долины: появляются открытые трещины, обрушения пород, характерные для внутреннего дна [12]. В процессе появления и действия растягивающих напряжений в зоне Z и особенно на нижней ее границе проявляются многочисленные землетрясения, гипоцентры которых, как отмечалось выше, находятся на глубинах, не превышающих 5–8 км. Механизм в очагах землетрясений свидетельствует, что это действительно зона растяжения.

Более того, можно предположить, что и в указанной локальной зоне напряжения растяжения приурочены главным образом к перемычкам застывших участков магмы, а на участках проникновения жидкой магмы действуют напряжения сжатия, способствующие появлению напряжений растяжения на участках застывшей магмы, следовательно, проявлению сейсмичности в результате деформаций отрыва. Поэтому, возвращаясь к рис. 4.5, можно согласиться, что на нем правильно отражено проявление землетрясений, связанных с растяжением массива горных пород как в пределах Атлантического срединно-океанского рифтового пояса, так и в пределах Африкано-Аравийского рифтового пояса. Зона растяжения в этом случае приурочена лишь к верхней части земной коры на толщину не более 5–8 км. Поэтому вывод из работы [12] о том, что в районе рифтовых поясов (по всей глубине) находится зона растяжения земной коры, является ошибочным.

Таким образом, зона растяжения массива пород в области срединно-океанического хребта не выходит за пределы внутреннего дна рифтовой долины и потому имеет незначительные размеры по ширине и глубине расположения. Связанные с зоной растяжения землетрясения имеют гипоцентры, обычно 2–5 км, и не превышают 8 км. Более того, зона растяжения, являясь локальной, практически не оказывает влияния на раздвиг литосферных плит: в конечном счете землетрясения являются результатом раздвига плит.

Остальная толща земной коры и литосферы в целом в области срединно-океанского хребта находится под воздействием высоких напряжений сжатия, обусловленных проникновением магмы в зону раздвига. Высокая тектоническая активность в области, прилегающей к срединно-океанскому хребту, выражающаяся в клавишном движении блоков и проявлении землетрясений, обусловлена воздействием горизонтальных сил вблизи места их приложения (переходная область) к участку земной коры, имеющему в данном месте меньшую толщину.

Допустим, что прорыв магмы в центральной рифтовой зоне предполагает ее проникновение по разломам соседних блоков, что приводит к оживлению клавишного движения блоков, проникновению магмы и ее раздвигающего действия по границам многих блоков, в том числе до поверхности дна океана. Следовательно, эффект образования зон растяжения, как это показано на рис. 4.5, может повториться во многих местах и вдали от основной осевой зоны срединно-океанского хребта. Более того, вероятно существование не одной осевой зоны хребта, а может быть даже серии таких зон на больших расстояниях, в том числе и до 300–400 км, как об этом говорится в работе [12]. Сложная система рифтовых и трансформных разломов имеет зоны растяжения до глубины 2–5 км от поверхности дна океанов, где и проявляются рои землетрясений с фокальным механизмом растяжения.

Можно дополнительно сообщить, что в 1996–1997 гг. сотрудниками кафедры теории упругости Санкт-Петербургского университета и ВНИМИ было выполнено математическое моделирование, подтвердившее гипотезу возникновения горизонтальных сил в литосфере за счет раздвигающего действия магмы, поднимающейся в рифтовых зонах*.

4.3. ВЕЛИЧИНА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ

Пользуясь приведенной на рис. 4.7 схемой, можно ориентировочно установить величину активной силы $P_{\text{акт}}$, действующей перпендикулярно к поверхности раздвига. Прежде всего, чем больше высота подъема магмы в зоне раздвига, тем значительнее активные силы превышают силы, определяющие переход земной коры в предельно напряженное состояние по всей ее толщине [40].

Если принять толщину литосферы $H_r = 30$ км, высоту $H_{\text{пл}} = 10$ км, глубину залегания рифтовых зон $h = 13$ км, а нарастание горизонтальных сил по глубине по прямолинейному закону, то из несложных расчетов следует, что на полоске литосферы шириной в 1 м может возникнуть сила $P_{\text{акт}} = 1,6 \cdot 10^{10}$ кН.

Однако литосфера может воспринять лишь силу, не превышающую $P_{\text{пред}}$, т.е. соответствующую ее предельно напряженному состоянию. При принятых допущениях и согласно рис. 4.7 величина $P_{\text{пред}}$ на

* Горбатов Л.Г., Семенов Б.Н., Петухов И.М., Сидоров В.С. Расклинивание трещин в земной коре вязкой несжимаемой жидкостью. // Проблемы геодинамической безопасности. Международное рабочее совещание, ВНИМИ. – Спб., 1997.].

полоске шириной в 1 м будет около $1,3 \cdot 10^{10}$ кН. Таким образом, возникающих в зоне раздвига горизонтальных сил более чем достаточно для перехода литосферы при этих параметрах в предельное состояние по всей ее толщине.

Если считать, что на близком к раздвигу участке литосфера перешла в предельное состояние на всю глубину H_1 , то на участках, где толщина литосферы больше ее толщины в районе раздвига, в предельное состояние литосфера перейдет лишь на некоторую часть своей толщины, начиная с земной поверхности, и тем меньшую, чем больше толщина литосферы. Отсюда, следовательно, можно заключить, что величины средних по глубине горизонтальных напряжений будут обратно пропорциональны толщине литосферы, что, по-видимому, дает возможность по изолиниям толщины земной коры в известной мере судить о степени ее напряженности. Итак, по площади литосферных плит глубина перехода массива горных пород в предельно напряженное состояние по отношению к толщине земной коры будет различаться в широких пределах и зависит: от толщины земной коры, размеров и формы блоков, степени структурной нарушенности и литологической неоднородности массива и других особенностей строения и истории формирования каждого участка литосферы.

Зная величину горизонтальных сил, возникающих в зонах раздвига, можно, в известной степени, оценить и количество работы, которая ими совершается. Так, воспользовавшись известными данными о том, что перемещение литосферных плит достигает 0,03 м в год, можно получить, что в рассмотренном выше примере на полоске шириной 1 м ежегодно совершается работа, равная $4 \cdot 10^{11}$ Дж. Если принять, что такая работа производится на длине 80 тыс. км всех срединно-океанских хребтов, то суммарная ее величина составит $3,2 \cdot 10^{19}$ Дж.

Как видно, сами горизонтальные силы и совершаемая ими работа весьма внушительны. Следует также отметить, что картина формирования и воздействия горизонтальных сил будет неполной, если не

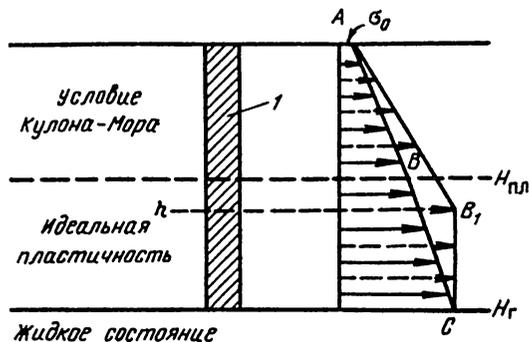


Рис. 4.7. Схема, иллюстрирующая возникновение активных горизонтальных сил:

l – зона раздвига;

h – уровень магмы в зоне раздвига;

\rightarrow – $P_{\text{прев}}$;

$-\rightarrow$ – $P_{\text{акт}}$

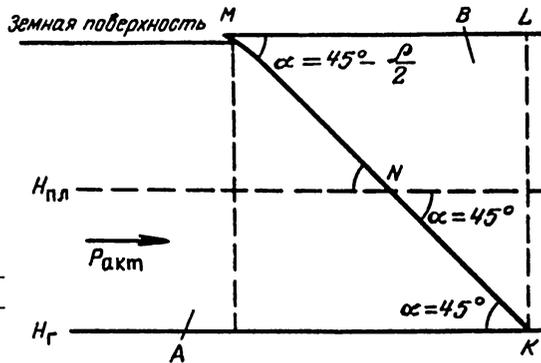


Рис. 4.8. Схема разрушения плиты при землетрясении

представлять, что эти процессы идут толчкообразно, динамичность им придает пульсирующий приток энергии из прилегающих массивов пород. Отсюда, чем интенсивнее сейсмичность соответствующего района земной коры, тем, следовательно, больше возможный гипоцентр сейсмических явлений, в том числе и крупных землетрясений. При континентальном рифтогенезе схема появления активных горизонтальных сил, действующих поперек рифта, аналогична как и для океанских срединных хребтов, с тем отличием, что их действие локализовано и, следовательно, создает предпосылки для образования тектонически напряженных зон в земной коре по обе стороны от рифтовой зоны. Вместе с тем, в таких регионах, как, например, запад США, где длина многочисленных рифтовых зон достигает 3500 км, их действие приближается к действию океанских рифтовых зон, так как создаваемая ими тектонически напряженная зона распространяется фактически на всю Северную Америку.

Далее уместно уточнить представления о природе горизонтальных сил: действительно ли они являются тектоническими. Если принять, что горизонтальные силы в районе раздвига литосферных плит образовались в результате поступления магмы под высоким давлением, то в этом случае силы не имеют тектонического происхождения, а обязаны своим появлением силам гравитации. В самом деле, расплавленные породы верхней мантии имеют гидростатическое напряженное состояние, когда все три составляющие напряжений равны γH_r (где H_r – толщина литосферы). Таким образом, горизонтальные силы, действующие в литосфере и участвующие в перемещении и взаимодействии литосферных плит, образуются в результате действия гравитации. Вследствие этого принятое определение горизонтальных сил в земной коре как сил *тектонических* нуждается в уточнении. Может быть целесообразно горизонтальные силы, обязанные своим появлением гравитации, считать тектоническими по отношению к взаимодействию

блоковых структур земной коры, горообразованию и другим проявлениям геодинамики. Этот вопрос является принципиальным и нуждается в специальном рассмотрении в будущем.

Целесообразно попытаться рассмотреть отдельные случаи воздействия горизонтальных сил в литосфере и в земной коре, в частности.

Большой интерес представляет процесс формирования и развития зон субдукции, в пределах которых идет поглощение литосферной плиты за счет ее поддвигания под соседнюю плиту. Общий механизм этого явления виден из рис. 4.8. Плита A в результате разрушения по линии MNK по всей толщине земной коры поддвигается под плиту B . Разрушение земной коры происходит от сжатия активными горизонтальными силами $P_{\text{акт}}$. Возникает удельная подъемная сила

$$P_{\text{верт}} = P_{\text{акт}} \operatorname{tg} \alpha .$$

Угол α , по-видимому, изменяется в пределах от $(45^\circ - \rho/2)$ вблизи земной поверхности с учетом постепенного обращения в 0° угла внутреннего трения ρ на глубине $H_{\text{пл}}$, где угол α , следовательно, становится равным 45° ; на глубине $H_{\text{пл}}$ угол α равен также 45° . Область воздействия $P_{\text{верт}}$ сказывается на участке ML от линии разрушения, зафиксированной на земной поверхности. На графике (рис. 4.9) левее точки OK эта сила будет превышать вес пород и, как следствие, участвовать в деформировании массива пород, включая горообразование. Кроме того, возникает возможность излома земной коры по некоторой поверхности, в результате чего могут появиться трещины, каналы, обеспечивающие прорывы магмы в сторону земной поверхности, т. е. проявление вулканической деятельности, которая, как известно, сопутствует зонам субдукции (например, так называемое «Тихоокеанское огненное кольцо»).

Разрушения земной коры описанного вида могут развиваться постепенно (во времени) как по глубине, так и по площади. Сливаясь,

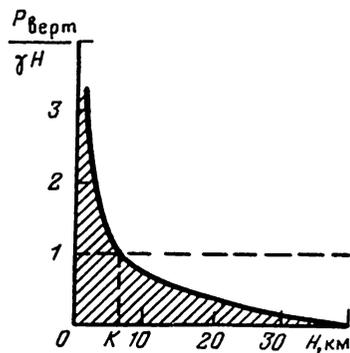


Рис. 4.9. Зависимость подъемной силы $P_{\text{верт}}/(\gamma H)$ от глубины H

эти разрушения могут сформировать генеральное разрушение, которое, в конечном счете, приводит к явлению *субдукции*.

Многочисленные подвижки по образовавшейся поверхности разрушения в зоне субдукции приводят к наблюдаемым явлениям, включая землетрясения и извержения вулканов вблизи этих зон. Здесь не последнее место занимает толчкообразное поршневое действие подвигающейся плиты.

Возникающая подъемная сила обеспечивает разгрузку массива горных пород с соответствующим углублением начала зоны пород с гидростатическим распределением напряжений. Здесь кроется также разгадка того положения, что в зонах субдукции толщина земной коры значительно возрастает.

Подъемная сила на участке земной коры, где она превышает вес пород, участвует в горообразовании. По высоте горы (ее весу) можно составить некоторое представление о величине подъемных сил, а отсюда, вообще, о величине горизонтальных сил, действующих в земной коре в данном месте.

Толчкообразные подвижки, заложенные в природе явления, способствуют разрушению и воздыманию массива пород, образованию разрывов в массиве. Толчкообразность во всех зонах движения и разрушения массива горных пород – основной закон изменений, совершающихся в земной коре.

Таким образом, можно констатировать, что литосфера и часть верхней мантии, прилегающая к ней, представляют собой систему, находящуюся в предельно напряженном состоянии, обладающую запасом энергии за счет гравитации, достаточным для постоянного силового взаимодействия и обновления материала литосферных плит. Толчкообразность процессу придает, прежде всего, взаимодействие плит в зонах субдукции, где имеет место эффект преодоления сил трения.

Целесообразно рассматривать литосферу, как оболочку Земли, как самостоятельную систему, замкнутую в себе.

Эту систему характеризуют следующие положения:

литосфера нагружена собственным весом с добавкой веса толщи воды на территориях, занятых океаном и другими водными объектами;

литосфера представлена литосферными плитами, находящимися в постоянном неравномерном движении и взаимодействии друг с другом;

активные горизонтальные силы, действующие в литосфере, задаются в океанских рифтовых зонах за счет распорного действия расплавленных пород (магмы) и имеют, следовательно, гравитационную природу;

наращивание литосферных плит при рифтогенезе компенсируется их погружением в зонах субдукции, обдукции, эдукции, коллизии, выжимания масс пород и др.;

природная система наращивания плит и их поглощения находится в определенном компенсационном равновесии, что и характеризует ее как находящуюся в своеобразном предельно напряженном состоянии;

вдали от рифтовых зон, по мере роста толщины литосферы, в предельно напряженном состоянии, имеет место крайне дискретное распределение свойств и напряжений, нагруженных и разгруженных зон, многочисленных предельно напряженных зон и других элементов дискретности, присущих как мы видели выше, состоянию любого массива, находящегося в предельно напряженном состоянии (глава 3);

«клавишное» образование и перемещение элементов блочной структуры земной коры обеспечивается в значительной степени перемещением жидких масс пород в астеносфере.

Таким образом можно констатировать, что литосфера в целом или ее отдельные части находятся в условиях предельно напряженного состояния, они постоянно видоизменяются и деформируются, в них готовятся и происходят геодинамические явления разного рода интенсивности и опасности и происходят катастрофические землетрясения. Эти явления готовятся и происходят в силу действия законов существования предельно напряженного состояния массива.

4.4. ВЛИЯНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ СИЛ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Не вызывает сомнения тот факт, что напряженное состояние массива горных пород в любом районе нашей планеты обусловлено его местоположением в системе «Земля», т.е. напряженным состоянием Земли как планеты в данном районе.

Этому вопросу посвящены работы А.В.Пейве, А.И.Суворова, В.Е.Хаина, В.В.Белюсова, Г.П.Горшкова и др. При этом многими исследователями на первое место ставится тангенциальное сжатие в земной коре, свойственное Земле как космическому телу. По мнению Г.П.Горшкова, напряжения в земной коре едины как для коры, так и для мантии из-за влияния планетарных сил, тангенциальные напряжения ведут к образованию разломов. Часть из них (надвиги, взбросы) располагается обычно согласно складчатости или перпендикулярно к сжатию, а часть (сдвиги, сколы) – ориентированы под углом 45° к направлению давления или простиранию складчатых структур. При этом

на напряженное состояние земной коры оказывают влияние такие планетарные силы, как неравномерное вращение Земли, изменение солнечной активности, лунно-солнечные приливы и др.

Рассмотрим характер и степень влияния перечисленных факторов.

4.1.1. Влияние вращения Земли

Известно, что скорость вращения Земли вокруг своей оси непостоянна и испытывает изменения (флуктуации), величина которых достигает 0,0004 с за период от 2 до 10 дней. По оценке А.Д.Сытинского, количество высвобождающейся по этой причине энергии в течение одного года равно $1,17 \cdot 10^{20}$ Дж, что на три порядка выше энергии, высвобождающейся при землетрясениях за тот же период времени. По оценке Гутенберга и Рихтера (1948 г.), она составляет $3 \cdot 10^{17}$ Дж. Кинетическая энергия вращения Земли равна $2,16 \cdot 10^{29}$ Дж.

Изменение скорости вращения Земли во времени может вызвать разрушающие напряжения в земной коре.

Так, по мнению Л.С.Лейбензона, наибольшая разность напряжений в тонкой земной коре (1/100 радиуса Земли), вызываемая замедлением скорости вращения Земли (которое в нашу эпоху составляет 0,0024 с за 100 лет),

$$\Delta = \Delta_1 \rho \alpha^2 D(\alpha) \gamma,$$

где Δ_1 – величина, зависящая от географической широты места;
 ρ – плотность земной коры (принята 0,5 средней плотности Земли);
 α – средний радиус Земли: $D(\alpha)$ – величина, определяемая по теории упругих приливов Земли из наблюдений над колебаниями горизонтального маятника и приливами длинного периода ($D/\alpha \sim 2/3$);
 γ – величина, определяемая по формуле

$$\gamma = \frac{\omega^2}{\alpha} \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right),$$

здесь ω_0 и ω – скорость вращения Земли, соответственно, начальная угловая и в рассматриваемый момент времени.

Ниже приведены значения наибольшей разности напряжений для разных широт*.

φ , градус0	15	30	45	60	75	90
Δ , МПа74	69	55	37	41,5	49	51,4

* Батугин А.С., Батугина И.М. Изменение напряженного состояния нетронутого массива горных пород в пространстве и во времени //Сб.: Напряженное состояние земной коры. – М.: Наука, 1973. С. 148–157.

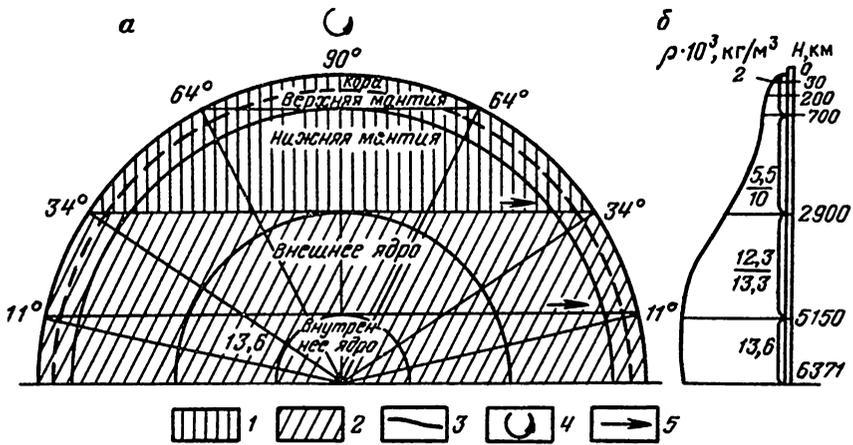


Рис. 4.10. Модель внутреннего строения (а) и график изменения плотности Земли ρ с глубиной H (б):

1 – верхняя «шапка» Земли; 2 – центральная часть; 3 – кривая плотности Земли; 4 – направление срезающих усилий; 5 – направление смещения земных масс

Таким образом, поле напряжений в земной коре неоднородно. Вследствие этого наблюдаются неодинаковые по величине, знаку и характеру новейшие и современные движения земной коры в различных частях земного шара. При этом наибольшая разность напряжения (18 МПа) наблюдается между 30 и 45 широтами, к которым и приурочены наиболее активные проявления сейсмичности и удароопасности.

С изменением скорости вращения Земли связано увеличение и уменьшение полярного сжатия. Так, в приложении к фигуре Земли М.В.Стовас рассмотрел распределение напряжений в земной коре при изменении ее полярного сжатия на 10^{-7} для четырех моделей, приняв глубину сферического слоя 127 км. Им установлено, что с увеличением скорости вращения Земли полярное сжатие возрастает, с уменьшением – снижается, что вызывает «волновые» движения земной коры. В настоящее время наблюдается замедление вращения Земли, что обуславливает перестройку деформаций. Уменьшение сжатия у полюсов и увеличение его у экватора способствует перестройке структурного плана внутренней оболочки Земли, в том числе и осадочного чехла. Она протекает последовательно от ядра Земли до ее поверхности. Свидетельством тому являются скрытые разломы, зафиксированные в фундаменте и пока только фрагментарно выраженные в рельефе.

Исходя из модели внутреннего строения Земли (рис. 4.10), отдельные ее слои от ядра до верхней мантии и коры имеют разную плотность

[5]. Угловая скорость вращения Земли везде одинакова, линейная же различна, причем максимум ее приходится на экватор. В местах наибольшей кривизны кривой плотности (см. рис. 4.10) наблюдается появление срезающих сил верхней «шапки» относительно центральной части. Указанный максимум кривизны располагается примерно у 35-й параллели. Этой широте соответствуют, согласно исследованиям Г.Н.Каттерфельда, М.В.Стоваса, точки перегиба (рис. 4.11, *а, б*) и разориентированности воздушных течений (рис. 4.17, *в*) [5]. К ней же приурочена наибольшая сейсмичность (Б.Гутенберг, К.Рихтер, М.В.Сто-вас) и удароопасность (И.М.Батугина) месторождений.

В результате неравномерностей плотности вращающихся масс в земной коре возникают срезающие усилия, которые могут фиксироваться в виде трансформных разломов на континентах. Это должно учитываться при оценке напряженного состояния массива горных пород, находящегося в зоне разлома.

Строгая ориентировка разломов по отношению к оси вращения Земли известна по работам П.С.Воронова. Самые крупные складчатые пояса Земли имеют четыре генеральных направления: два диагональных и два ортогональных. Большая часть их ориентирована под

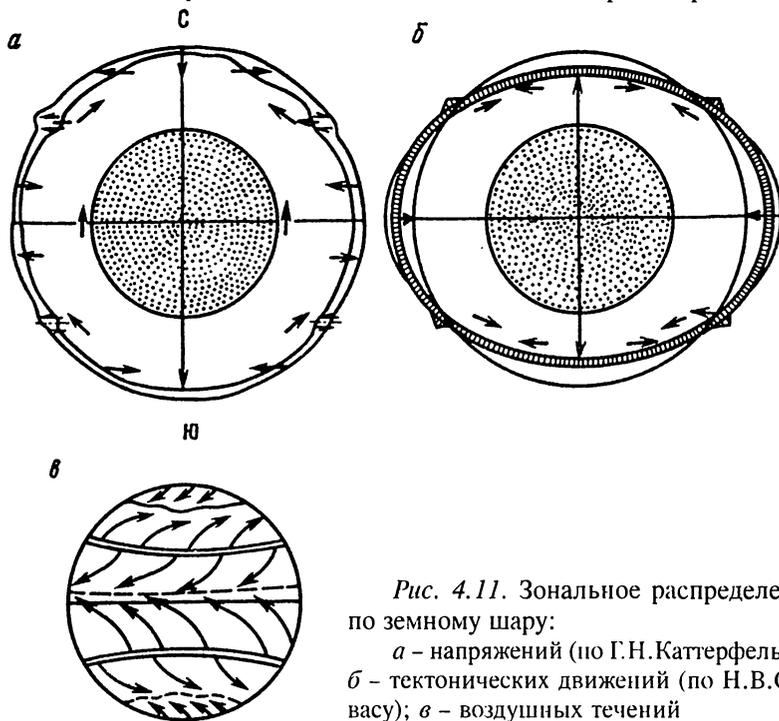


Рис. 4.11. Зональное распределение по земному шару:

а – напряжений (по Г.Н.Каттерфельду);
б – тектонических движений (по Н.В.Сто-васу);
в – воздушных течений

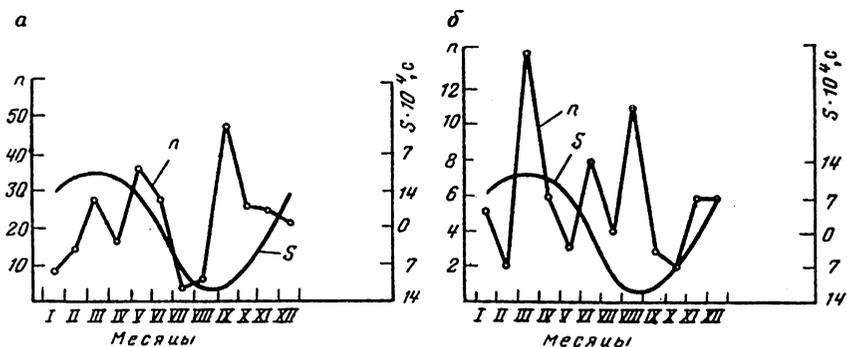


Рис. 4.12. Сезонная периодичность горных ударов для месторождений Кизеловского бассейна в 1947–1961 гг. (а) и Индии в 1956–1961 гг. (б):
n – число горных ударов;
S – изменение продолжительности суток, с.

углом 45° к оси вращения Земли или согласно оси вращения, или перпендикулярно к ней. Средний угол между ними равен 45° . Диагональная система создана скалывающими усилиями, а ортогональная – меридиональными и широтными сжимающими (растягивающими) усилиями, возникающими в литосфере Земли при ее планетарной полярной деформации. Кроме того, близкий к 45° угол сохраняется между разломами на платформе и разломами, обрамляющими складчатые сооружения. Этот же угол наблюдается при раскалывании образцов, подвергшихся испытанию на сжатие ($45^\circ - \rho/2$, где ρ – угол внутреннего трения).

В работе И.М.Батугиной* представлены исследования некоторых причин сезонной периодичности горных ударов на месторождениях мира. Собранные фактические данные об изменении числа горных ударов в течение года по 12 месторождениям приводятся с распределением их по месяцам. Для абсолютного большинства месторождений максимум горных ударов падает на февраль – март, июнь – август и ноябрь – декабрь. Весенний и летний максимумы наступают на разных месторождениях в разные месяцы, в то время как осенний максимум наступает одновременно на целом ряде месторождений.

В качестве примера на рис. 4.12 приведено распределение числа горных ударов по месяцам для месторождений Урала (Кизеловский бассейн, рис. 4.12, а) и Индии (рис. 4.12, б). Аналогичные результаты получены Б.Г.Тарасовым (рис. 4.13).

* Батугина И.М. Сезонная периодичность горных ударов. //Вопросы маркшейдерского дела. – Кемерово, 1970.

Представляет несомненный интерес тот факт, что в распределении числа горных ударов по месяцам наблюдается некоторая аналогия с распределением по месяцам и числу землетрясений. К.Н.Хефер отмечает максимум землетрясений в первом и четвертом кварталах года. С.Ф.Филипас, исследуя закономерности сейсмической активности северо-западной части Тихого океана, приходит к выводу, что большинство землетрясений приурочено к осенне-зимнему периоду. По-видимому, в причинах, вызывающих изменения числа землетрясений и горных ударов по месяцам, есть общее, связанное с планетарными сезонными изменениями. Наиболее вероятно, что это связано с изменениями скорости вращения Земли. Сопоставление сезонной периодичности горных ударов с неравномерной скоростью вращения Земли показало, что максимумы (минимумы) числа горных ударов приурочены к месяцам с минимальной (февраль – март, декабрь) и максимальной (июль – сентябрь) скоростью вращения Земли или к месяцам наибольшей скорости ее изменения (июнь, октябрь – ноябрь).

Изменение скорости вращения Земли приводит к изменению полярного сжатия и, следовательно, напряжений в земной коре.

Достаточно большой разброс максимумов горных ударов на месторождениях мира относительно скорости вращения Земли может быть связан с различным их расположением в географической системе координат (φ , λ). А это, в свою очередь, связано с разными геомеханическими и тектонофизическими условиями и напряженным состоянием земной коры. Данный вопрос подлежит дальнейшему исследованию.

По расчетам Л.С.Лейбензона, для появления в земной коре разрушающих напряжений, необходимо замедление вращения Земли на 11 мин. Поэтому изменение продолжительности суток в течение года, равное 0,0025 с, не может, согласно этим расчетам, привести к разрушениям, но вызовет незначительные изменения напряженного состояния массива горных пород.

Таким образом, влияние сил, вызванных изменением скорости вращения Земли в течение года, вызывает повышенные

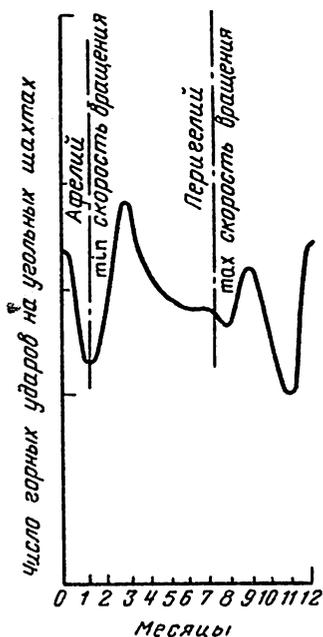


Рис. 4.13. Сезонные вариации удароопасности на угольных шахтах за период 1947–1989 гг. (по Б.Г.Тарасову).

напряжения в земной коре в местах наибольшей кривизны плотности вещества земного шара (35-я параллель) и различные величины напряжений у полюсов и экватора.

Существенная неравномерность проявления динамических явлений и землетрясений по месяцам года свидетельствует о том, что изменение скорости вращения Земли создает условия *нестабильности* в напряженном состоянии земной коры.

4.1.2. Влияние солнечной активности

Другой планетарной силой является солнечная активность, одним из количественных показателей которой является число пятен на Солнце. Солнечная активность оказывает свое воздействие на напряженное состояние земной коры через изменение магнитного поля Земли и благодаря ему через изменение прочностных свойств пород. Подтверждением тому является статистика землетрясений и динамических явлений в шахтах и рудниках.

Многие исследователи указывали на связь сейсмичности Земли с солнечной активностью. Известно, что солнечная активность ежегодно изменяется и имеет в среднем 11-летний цикл (фактически продолжительность солнечного цикла колеблется от 7 до 16 лет). Так, по мнению П.Бернала (1938 г.), годы с самыми интенсивными микросейсмическими возмущениями полностью совпадают с годами значительно ослабления солнечной активности. А.Д.Сытинский (1963 г.) указывал, что на 11-летний солнечный цикл приходится два максимума сейсмической активности.

Исследования И.М.Батугиной и А.С.Батугина (1973 г.) по сопоставлению хода сейсмической активности с изменением числа землетрясений XX в. и с изменением числа горных ударов на ряде месторождений (рис. 4.14, а) показали, что кривая сейсмической активности в общем повторяет по форме кривую изменения числа солнечных пятен, причем максимумы сейсмической активности Земли совпадают по времени или несколько отстают от максимумов ΔR .

На рис. 4.14, б показана связь числа сильнейших землетрясений с максимумом числа Вольфа в солнечном цикле. При этом число землетрясений в год определялось как частное от деления общего числа землетрясений, имевших место в течение данного солнечного цикла, на продолжительность цикла. На указанных рисунках видна тенденция к увеличению сейсмической активности Земли с увеличением максимального значения числа Вольфа в солнечном цикле.

На рис. 4.15 представлены динамика числа горных ударов N для двух месторождений и изменение солнечной активности R . Видно

Правда, в этой зоне, как и в других океанских рифтовых зонах должны действовать напряжения сжатия. На рисунке же ошибочно показано, что в океанских зонах действуют напряжения растяжения. На приведенном ранее рис. 4.5 говорится лишь о приуроченности к этим зонам проявления сейсмичности, вызванной растяжением, что, конечно, более правильно. Основным же наш вывод о том, что к рифтовым зонам приурочены зоны сжатия, вызванные действием поступающей в них магмы под высоким давлением, остается в силе.

Схема расположения сил, отражающая силовое воздействие на Евразийскую плиту со стороны Африканской, Аравийской, индийской, Австралийской и Тихоокеанской литосферных плит и рифтовых зон Атлантического и Северного Ледовитого океанов, приведена на рис. 5.11. Активные силы, обязанные своим происхождением и существованием океанским рифтовым зонам ($P_{\text{акт}}$), обозначены P_1 ; реактивные силы, возникающие в зонах Заварицкого – Бенъефа – P_2 . В первом приближении для задания граничных условий можно принять, что везде величины $P_1 = P_{\text{акт}} = 1,3 \cdot 10^{10}$ кН на полоске в 1 м шириной на всю толщину литосферы. Величину сил P_2 и P_3 , совпадающих с широтным и меридиональным направлением, можно определить из условия равновесия на оси:

$$P_2 \approx P_1 - \gamma H_r f_{\text{тр}} L_{\text{ш}},$$

$$P_3 \approx P_1 - \gamma H_r f_{\text{тр}} L_{\text{м}},$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения вдоль нижней поверхности плиты; $L_{\text{ш}}$ и $L_{\text{м}}$ – характерные размеры плиты соответственно в широтном и меридиональном направлениях; γH_r – вертикальные напряжения, действующие на нижней подошве плиты толщиной H_r .

Пример. Определим величины P_2 и P_3 для следующих типовых условий: $f_{\text{тр}} = 0,001$, что примерно соответствует коэффициенту внешнего и внутреннего трения в магме; $H_r = 30$ км; $L_{\text{ш}} = 1,5 \cdot 10^7$ м;

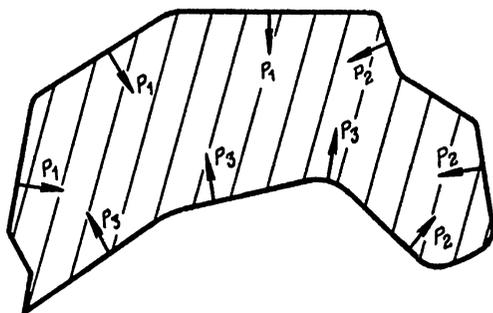


Рис. 5.11. Схема приложения сил к Евразийской плите

$L_m = 0,5 \cdot 10^7$ м; $\gamma H_1 = 750$ МПа. Тогда для рассмотренных значений параметров имеем: $P_2 = 0,2 \cdot 10^{10}$ кН; $P_3 = 0,9 \cdot 10^{10}$ кН.

Более точные расчеты распределения сил P_2 и P_3 вдоль контуров плиты можно выполнить каким-либо численным методом, например методом конечных элементов (МКЭ), установив более детально конфигурацию плиты и распределение активных сил P_1 ; задавшись при этом известным изменением толщины плиты, можно распределение сил P_2 и P_3 получить, как реакцию вдоль заделанной части контура плиты. В дальнейшем, используя расчетные значения величин P_2 и P_3 , можно выполнить расчет поля напряжений как в самой плите, так и в отдельных составляющих ее мегаблоках.

Рифтовые зоны раздвигаются на участках литосферы, имеющих наименьшую толщину, например, в средней части океанов. Прорыв магмы приводит к образованию хребтов и, вообще, утолщению коры в этом месте. Длительный, а может и многократный процесс в этом направлении приводит, в конечном счете, к утолщению литосферы. В то же время отток магмы из-под континентов приводит к их оседанию. Не здесь ли кроется разгадка смен дна морей и океанов на континенты и наоборот (известно, например, что на месте Уральского хребта было море)? Здесь необходимо указать еще и об утолщении земной коры в зонах субдукции. Величины сил P_1 , P_2 и P_3 определяются, исходя из расчета по соответствующим океанским рифтовым зонам (но с учетом толщины литосферы, когда определяются заданные напряжения), P_3 – по силам трения при поддвиге.

Наиболее сложные условия возникают при относительном перемещении литосферных плит Евразийской, с одной стороны, и Индийской, Аравийской и Африканской – с другой. Последние плиты двигаются с юга на север, Евразийская – с запада на восток с небольшим разворотом на юго-восток.

Поскольку в этом случае реализуется условие разрушения в форме «сжатие – срез», то происходит не только относительное перемещение плит по поверхности среза, но и взаимное их «проникновение» в направлении: юг – север. Естественно предположить, что указанное «взаимопроникновение» ведет, в конечном счете, к утолщению плит в районе границы между соответствующими плитами. Этим, по-видимому, и объясняется значительное утолщение земной коры в этом месте и наличие гор. Можно допустить, что в восточной части границы (район взаимодействия плит Евразийской и Индийской, а возможно и Евразийской и Аравийской), происходит поддвиг плит. Где столкновение плит, а где поддвиг – требует уточнения. Причем можно в некоторых случаях говорить о «каскадном» поддвиге, как это мы предположили при расследовании Спитакского землетрясения («кас-

кад» в районе северного Ирана и Турции, включающий в себя про-
растание очередного поддвига, в результате которого и произошло
указанное землетрясение). Такие же многокаскадные срезы, возможно,
наблюдаются и в Юго-Восточной Азии. Это свидетельствовало бы, что
в районе взаимодействия евразийской плиты и прилегающих к ней с
юга плит имеет место не одна поверхность среза, а несколько (может,
много). Поверхности могут быть прерывистыми по простиранию и
глубине. В данном случае, скорее всего, имеет место широкая нару-
шенная зона с поверхностями многих нарушений, простирающимися
вдоль границы раздела литосферных плит. Вся эта зона характеризуется
крайне неравномерным распределением напряжений. Взаимное пере-
мещение плит идет по неровным поверхностям. В районе этой зоны
постоянно возникают и исчезают местные участки с предельно напря-
женным состоянием. В конечном счете возникают условия для «пере-
мещения» плит и их «взаимопроникновения» по подобию движения
сороконожки. Здесь необходимо еще оценить «разуплотнение» массива
в обширной зоне, прилегающей к границам раздела литосферных плит.
Чем ближе к земной поверхности, тем больше угол внутреннего трения
и тем больше коэффициент разрыхления массива, больше толчко-
образность деформаций и выделения сейсмической энергии.

Ниже предпринята попытка оценки напряженного состояния зем-
ной коры, да и литосферы в целом, используя положения, установ-
ленные ранее в работах [40, 42, 43]:

горизонтальные силы в литосфере возникают в рифтовых зонах,
действуя перпендикулярно их простиранию, за счет поступления магмы
под давлением, соответствующим γH_r , где H_r – толщина литосферы:

наращивание литосферных плит в рифтовых зонах и их погло-
щение в зонах субдукции создают условия существования своеоб-
разного предельно напряженного состояния в литосфере в целом;

вблизи земной поверхности на различную глубину от нее по
отдельным участкам земной коры возникают зоны предельно напря-
женного состояния массива пород;

величина горизонтальных сил в срединно-океанической рифтовой
зоне, например, в Атлантическом океане достаточна, чтобы литосфера
на этом участке перешла в предельно-напряженное состояние по всей
ее толщине;

среднее горизонтальное напряжение, действующее поперек рифто-
вой зоны, передается по всей толщине литосферной плиты;

величина горизонтальных напряжений в каждом участке лито-
сферной плиты будет определяться с учетом блочной структуры и
зависит от толщины литосферы соответствующего участка;

горный массив рассматривается, как сплошная среда.

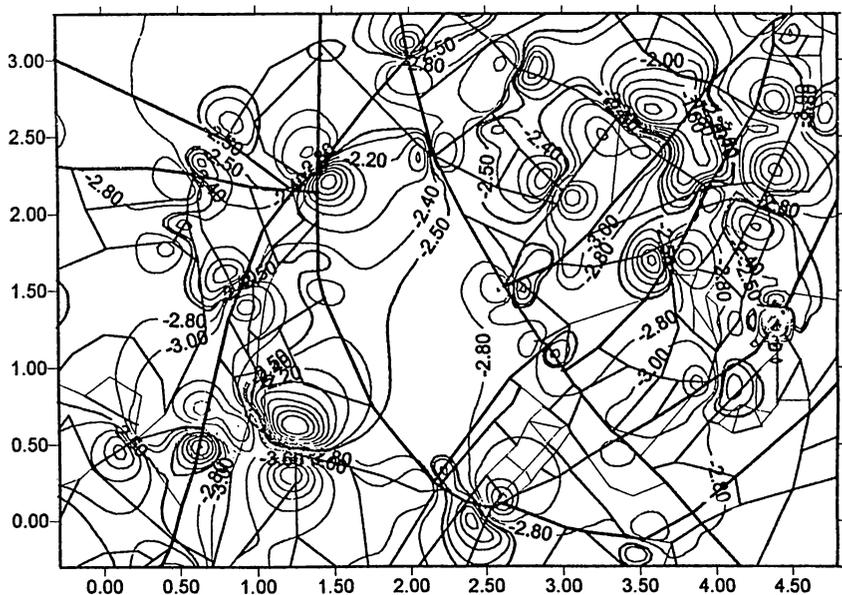


Рис. 5.12. Распределение полусуммы напряжений $(\sigma_x + \sigma_y) / 2$

-  – границы мегаблоков II ранга;
-  – границы мегаблоков III ранга;
-  – изолинии безразмерных напряжений

На рис. 5.12 приведен фрагмент из карты геодинамического районирования части территории России, построенной И.М.Батугиной, А.С.Батугиным и С.И.Петуховым, с использованием топографической карты масштаба 1 : 4 000 000. На приведенном рисунке показаны границы мегаблоков II и III рангов.

Можно попытаться оценить напряженное состояние выявленной блочной структуры.

Для этого необходимо установить граничные условия по контуру Евразийской литосферной плиты и задаться условиями на контактах мегаблоков.

С учетом изложенного граничные условия для расчета напряжений в литосферной плите ориентировочно принимаются в следующих относительных показателях:

напряжение в субширотном направлении равно 3;

напряжение в субмеридиональном направлении равно 2.

При сцеплении в массиве пород, принятом за 1, сцепление вдоль разломов III ранга принимается 0,95, а вдоль разломов II ранга – 0,90.

Приняты также некоторые ограничительные условия:

минимальные линейные размеры мегаблока должны быть более пятикратной толщины литосферы. Можно принять, что в общем случае линейные размеры мегаблока должны быть более 300 км;

снижение концентрации напряжений отражаются в узлах разломов, чтобы «смягчить» излишнюю искусственно возникающую при расчетах их концентрацию в этих местах. Линейные размеры участков разломов от мест их пересечения, на которых необходимо «смягчение» концентрации напряжений, принимаются равными толщине земной коры в месте узла разломов.

Следует отметить, что хотя расчет напряжений в блочном массиве литосферы должен, в принципе, производиться с позиций сугубо трехмерной (пространственной) задачи, определенные выводы можно получить также и из решения плоской задачи о напряженном состоянии системы плоских блоков с границами между блоками, перпендикулярными земной поверхности, нагруженной горизонтальными напряжениями сжатия, усредненными по толщине литосферы. При этом предполагается, что все блоки с одинаковым модулем упругости, деформируются упруго, а все неупругие процессы (т.е. подвижки между блоками) переносятся на контактные поверхности между блоками.

На рис. 5.12 представлены результаты расчетов полусуммы безразмерных субширотных σ_x и субмеридиональных σ_y напряжений в блочном массиве*.

Вдали от контактов блоков (например на участке A) величины σ_x и σ_y можно практически трактовать как главные напряжения τ_{xy} на участке A весьма невелики, так как по условию «сброс» касательного напряжения на контактах между блоками составляет соответственно 10% на контактах между блоками II ранга и 5% – на контактах между блоками III ранга. Поэтому для дальнейшей количественной оценки распределения напряжений уже по толщине литосферы будем считать напряжения σ_x и σ_y на участке A главными напряжениями σ_1' и σ_2' (штрихи означают, что напряжения являются безразмерными). После того, как безразмерные значения главных напряжений σ_1' и σ_2' на участке A известны, можно выполнить расчет напряжений по глубине**. Для этого вначале вычисляются размерные значения, например в МПа, главных напряжений σ_1 и σ_2 . Далее для известной толщины H литосферы на рассматриваемом участке вычисляются величины σ_{cp}^{max} и σ_{cp}^{min} напряжения, действующие соответственно в предельно напряжен-

* Расчеты выполнены с участием В.В.Зубкова с использованием программы *BLOCK 2D* [41]

** Расчеты выполнены с участием В.С.Сидорова

ном и упругом состоянии по всей толщине литосферы из зависимостей [41]:

$$\sigma_{\text{ср}}^{\text{max}} = 0,5 \left(4 \sigma_0 + \sigma_0' + \mathcal{H} H_{\text{пл}} \right) \frac{H_{\text{пл}}}{H} + 0,5 \left(4 \sigma_0 + \mathcal{H} H_{\text{пл}} + \mathcal{H} H \right) \left(1 - \frac{H_{\text{пл}}}{H} \right) \quad (5.14)$$

$$\sigma_{\text{ср}}^{\text{min}} = 0,5 \left(\sigma_0' + \mathcal{H} H \right), \quad (5.15)$$

где σ_0 – предел прочности на сжатие пород вблизи земной поверхности с учетом коэффициента структурного ослабления, МПа; $\sigma_0' = \sigma_0$ при свободной земной поверхности (суша); $\sigma_0' = \sigma_0 + 3\gamma_{\text{в}} h$ при давлении столба воды (дно океана); $\gamma_{\text{в}} = 1 \text{ т/м}^3$ – удельный вес воды; h – средняя глубина океана в месте задания граничных условий [44]. Величина σ_0' учитывает рост предела прочности на сжатие за счет давления столба воды высотой h . $H_{\text{пл}}$ – глубина пластического течения горных пород, км. Величина $H_{\text{пл}}$ определяется из зависимости:

$$\mathcal{H} H_{\text{пл}} = \frac{1 - \sin \frac{\rho}{2}}{2 \sin \frac{\rho}{2}} \left(8 \sigma_0 - \sigma_0'' \right), \quad (5.16)$$

$$\text{где } \sigma_0'' = \begin{cases} \sigma_0 & \text{при свободной земной поверхности} \\ \sigma_0 + \frac{1 + \sin \frac{\rho}{2}}{1 - \sin \frac{\rho}{2}} \mathcal{H} h_s & \text{при давлении столба воды } h_s \end{cases}$$

Если $\sigma_1 > \sigma_{\text{ср}}^{\text{max}}$, то рассматриваемый участок литосферы находится в предельно-напряженном состоянии по всей ее толщине, а если $\sigma_1 < \sigma_{\text{ср}}^{\text{min}}$, то литосфера по всей толщине на рассматриваемом участке находится в упругом состоянии. Если σ_1 расположена в интервале $\sigma_{\text{ср}}^{\text{min}} < \sigma_1 < \sigma_{\text{ср}}^{\text{max}}$, то средних горизонтальных напряжений σ_1 уже недостаточно для перехода в предельно напряженное состояние массива горных пород по всей толще литосферы. Толщина H_0 верхней части литосферы, перешедшей в предельно-напряженное состояние, при этом определяется из выражения [41]*:

* Петухов С.И., Сидоров В.С. К оценке напряженного состояния океанического дна. М., МГУ, ГИАБ, № 4 – 51, 1996. – С. 10–12.

$$\frac{H_0}{H} = \frac{2\sigma - \mu H - \sigma_0}{\sigma_0 \left(1 + \frac{2H}{H_{пл}}\right)}, \quad (5.17)$$

По формуле (5.17) для конкретных значений σ_0 , $H_{пл}$, H и σ_1 можно определить толщину слоя литосферы, находящегося в предельно напряженном состоянии.

Для вычисления размерных значений σ_1 и σ_2 необходимо определить размерные значения напряжений, заданных в качестве граничных условий. Поскольку граничные условия заданы на участках земной коры, перешедших в предельно-напряженное состояние по всей ее толщине, то эти напряжения вычисляются по формуле (5.14).

Принимается гипотеза, что полное напряжение во внутренних точках блочной мега- плиты является суммой напряжений исходного состояния и дополнительных напряжений, обусловленных воздействием дополнительных напряжений, действующих в рифтовой зоне и являющихся разностью: $\Delta\sigma = \sigma_{1гран} - 1/2(\gamma_b h + \gamma H_p)$ (H_p – толщина земной коры в рифтовой зоне).

При этом σ_1 в точке A определяется из выражения:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \mu H + \Delta\sigma \frac{H_p}{H} \frac{\chi}{3}, \quad (5.18)$$

где χ – коэффициент концентрации субширотных напряжений, рассчитываемый по прогнозной карте распределения напряжений (программа *BLOCK 2D*).

Пример расчета. Граничные условия: глубина Атлантического океана $h = 3$ км, $\sigma_0 = 30$ МПа, по формуле (5.16) $H_{пл} = 10$ км, $H_r = 40$ км. Для указанных параметров $\sigma'_0 = 30 + 3 \times 30 = 120$ МПа. Вычислим $\sigma_{1гран}$ по формуле (5.14) при $\sigma'_0 = 120$ МПа; $\sigma_{1гран} = 575$ МПа. Определим напряженное состояние участка земной коры, для которого выполнялись расчеты по программе *BLOCK 2D* для следующих значений исходных параметров $H = 80$ км, $H_{пл} = 13$ км, $\sigma_0 = 30$ МПа по формулам (5.14) и (5.15):

$$\sigma_{ср}^{max} = 1056 \text{ МПа} \quad \text{и} \quad \sigma_{ср}^{min} = 1015 \text{ МПа.}$$

Пусть заданы в безразмерном виде граничные условия: $\sigma_x = 3$ в субширотном направлении, $\sigma_y = 2$ в субмеридиональном направлении и пусть рассматривается вблизи точки A (см. рис. 5.12) участок литосферы. Вычисленное значение σ'_1 в этой точке равно 2,6. Размерная величина $\Delta\sigma = 575 - 1/2(30 + 1000) = 60$ МПа. По формуле (5.18) $\sigma_1 = 1026$ МПа. В этом случае $\sigma_{ср}^{max} > \sigma_1 > \sigma_{ср}^{min}$ и, следовательно,

литосфера на рассматриваемом участке до некоторой глубины H_0 находится в предельно напряженном состоянии, а нижняя ее часть – в упругом состоянии. Величина H_0 определяется по формуле (5.17).

Для указанных выше значений исходных параметров величина H_0 составит 14 км, т. е. в рассмотренном примере участок литосферы до глубины H_0 , равной 14 км, находится в предельно напряженном состоянии, а далее до глубины $H = 80$ км литосфера находится в упругом состоянии.

На рис. 5.12 в качестве иллюстрации возможности практического использования изложенной методики приводится пример расчета главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 по всей толщине литосферы применительно к участку А.

Расчет напряжений выполняется в каждой (любой) точке литосферы по суммарному среднему напряжению от земной поверхности до подошвы литосферы (с учетом толщины литосферы в данном месте). Точка литосферы, для которой рассчитываются напряжения, должна выбираться на расстоянии от разлома, равном или большем 0,5Н.

Из предложенного метода расчета напряжений по глубине от земной поверхности до подошвы литосферы следует, что при этом можно использовать имеющиеся результаты измерения напряжений, полученные, например, для какой-то глубины в руднике, шахте с помощью метода разгрузки или гидроразрыва. Фактические данные подставляются в соответствующие формулы, что позволяет получить все значения напряжений по глубине литосферы. Авторы отдают себе отчет в том, что таким образом могут быть даны лишь ориентировочные оценки. Эти данные могут быть получены без особых трудностей и в большом количестве.

В табл. 5.1 в качестве примера приведены данные расчетов для наибольшего главного напряжения σ_1 СУБРа, Таштагола, Апатитов. Наименьшее главное напряжение: $\sigma_3 = \gamma H$, а среднее σ_2 может быть принято $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$.

После того, как величина H_0 определена, распределения главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 по толщине земной коры становятся известными при $0 \leq H \leq H_0$:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma H + \sigma_0 + (2\tau_{\max} - \sigma_0) H/H_{\text{пл}}; \\ \sigma_2 &= \gamma H + \sigma_0 / 2 + (2\tau_{\max} - \sigma_0) H / 2H_{\text{пл}}; \quad \sigma_3 = \gamma H, \end{aligned} \quad (5.19)$$

где $\tau_{\max} = k\sigma_0$ ($k = 2 \div 4$ в зависимости от физико-механических свойств массива горных пород); $H_{\text{пл}}$ – определяется по формуле (5.16);

Таблица 5.1

Месторождение, бассейн	Расчетные величины σ_i , МПа								
	H , м								
	0	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Апатиты	50	54	60	68	88				162
СУБР	30								
Кизел		34							
Сучан			40	49	68			125	
Воркута		24	30	40	60			100	
Кузбасс	10	14	21	32	53	75			

при $H_0 < H \leq H_r$:

$$\sigma_1 = \sigma_1^0 + (\gamma H_r - \sigma_1^0) (H - H_0) / (H_r - H_0);$$

$$\sigma_3 = \gamma H; \quad \sigma_2 = 1/2 (\sigma_1 + \sigma_3), \quad (5.20)$$

где H_r – толщина земной коры на рассматриваемом участке; σ_1^0 – значение σ_1 , вычисляемое по формуле (5.19) при $H = H_0$.

На рис. 5.13 представлена схема, иллюстрирующая задание граничных условий по мощности земной коры. Рассматривается весомый

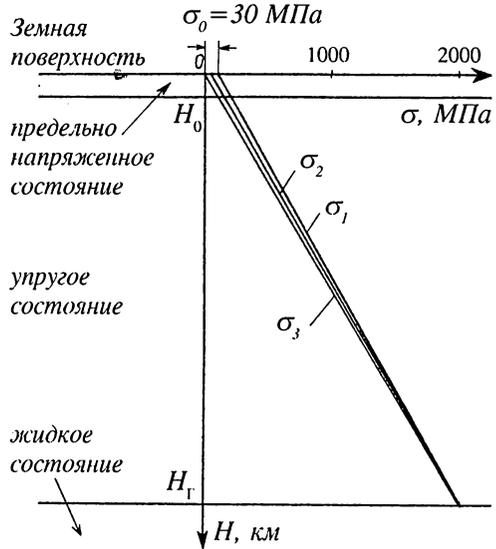


Рис. 5.13. Распределение главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 по толщине литосферы в районе точки А

параллелепипед, включающий систему блоков (многогранников) различных рангов. Могут быть изучены различные варианты:

упругие свойства блоков являются неизменными в пределах того или иного многогранника;

блоки являются слоистыми и в пределах каждого слоя задается модуль упругости;

внутри блоков могут быть те или иные упругие включения (линзы, интрузии) с заданными упругими характеристиками.

На верхней поверхности блочного параллелепипеда при отсутствии действия поверхностных сил (давление воды на морское и океаническое дно, в водоохранилищах, давление терриконов на земную поверхность и т.д.) задаются нулевые граничные условия

$$\sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0, \quad (5.21)$$

где σ_y – вертикальные напряжения; τ_{xy} и τ_{yz} – касательные напряжения, действующие вдоль земной поверхности.

При наличии действия поверхностных сил

$$\sigma_y = f(x, z); \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0, \quad (5.22)$$

где $f(x, z)$ – заданная функция распределения на земной поверхности нормальных нагрузок.

На нижней границе блочного параллелепипеда (при $y = H$) можно задать граничные условия в двух вариантах:

$$\sigma_y = -\gamma H_r; \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0; \quad (5.23)$$

$$v = 0; \quad \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0, \quad (5.24)$$

Вторая форма задания граничных условий удобна при использовании для расчетов поля напряжений метода конечных элементов (МКЭ).

Выше рассматривался случай, когда внутри блочного параллелепипеда дополнительные силы отсутствуют, т.е. разрывные смещения и деформации отсутствуют и блочный параллелепипед деформируется без разрыва сплошности. В то же время по поверхностям между блоками в ряде случаев может иметь место частичное или полное проскальзывание. Дополнительные силы внутри параллелепипеда появляются также при наличии горных выработок и при откачке нефти и газа. В этих случаях необходимо задавать и внутренние граничные условия:

1) на поверхностях, соответствующих границам отработки полезного ископаемого (угольные, соляные и продуктивные пласты, рудные залежи);

2) на граничных поверхностях между блоками, на отдельных участках которых реализуются условия частичного или полного проскальзывания.

В первом случае на поверхностях горных выработок задаются граничные условия в напряжениях по методикам, приведенным, например, в работе [41]. При извлечении жидких флюидов определяются размеры депрессионных воронок в окрестности сетки скважины и на этих поверхностях задаются граничные условия в дополнительных напряжениях

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \gamma H_p - p(x, z); \\ \tau_{xy} &= \tau_{yz} = 0,\end{aligned}\tag{5.25}$$

где H_p – глубина разработки нефтяной залежи, м; γH_p – вертикальные напряжения на глубине H_p , МПа; $p(x, z)$ – функция распределения пластового давления вдоль поверхностей депрессионных воронок, МПа.

Во втором случае для учета частичного или полного проскальзывания на контактных поверхностях между блоками задается паспорт контактной прочности между соответствующими блоками.

В качестве паспорта контактной прочности можно использовать условие специального предельного равновесия в форме Кулона-Мора:

$$\tau_n < c + \sigma_n t g \rho_i,\tag{5.26}$$

где τ_n и σ_n – соответственно касательное и нормальное напряжения, действующие на контактной поверхности между блоками; c и ρ_i – соответственно сцепление и угол трения на контактной поверхности, МПа.

При отсутствии экспериментальных данных для конкретной горно-технической ситуации для расчета можно принимать значения углов трения, представленные ниже.

Значения углов трения на контактных поверхностях между блоками различных рангов

Контактная поверхность	I	II	III	IV	V ранг и ниже
Угол трения, градус	10	16	20	24	26

Получение в будущем удовлетворительного решения вопроса представляет достаточно большую сложность и требует дополнительных исследований и серьезных теоретических изысканий.

Во-первых, требуется развитие представлений о геодинамической модели блочной структуры литосферы и земной коры, как ее составной части, уточнение природы и количественных зависимостей образования иерархической системы блоков, выявление роли астеносферы в образовании и поведении системы блоков в литосфере.

Во-вторых, необходимы разработка специальной программы расчета напряжений и параметров газо-гидродинамического состояния в сложной блочной структуре в трехмерной постановке задачи на основе метода МКЭ, обеспечение этих работ соответствующим оборудованием.

В-третьих, необходимо ускорение работ по созданию общей теории толчкообразного деформирования горного массива в земной коре – одной из наиболее крупных проблем геодинамики недр, как новой отрасли наук о Земле [42].

В-четвертых, необходимы далее значительные уточнения о приложении сил и поведении массивов пород на границах взаимодействия литосферных плит.

5.4. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛИТОСФЕРЕ

Как указано выше, разработанные подходы и методы расчета позволяют ориентировочно оценивать параметры усредненного напряженного состояния в любом регионе литосферы по площади и по глубине. Степень приближения к конкретно существующему полю напряжений будет тем выше, чем в большей степени могут быть использованы отдельные уже известные показатели напряженного состояния, полученные, скажем, методами гидроразрыва или разгрузки.

Вследствие указанного, общие подходы и методы к совершенствованию такого рода расчетов достаточно ясны и поэтому нет необходимости еще раз подробно на них останавливаться.

Более сложной является задача оценки напряженного состояния всей литосферы Земли, представленной системой взаимодействующих литосферных плит.

Общая схема решения такой задачи сводится к рассмотрению следующих этапов и позиций (с учетом, конечно, изложенного выше в главе 5):

устанавливаются все рифтовые зоны и толщина литосферы по всей их длине и определяются, следовательно, величины горизонтальных

сил, действующих перпендикулярно к рифтам в соответствующих литосферных плитах;

устанавливаются условия взаимодействия литосферных плит на их других общих границах (субдукция, противостояние и пр.), производится оценка взаимодействующих сил;

определяются граничные условия для расчета главных напряжений для каждой литосферной плиты;

выполняется геодинамическое районирование в пределах каждой литосферной плиты;

выполняется расчет главных напряжений для блочной структуры каждой литосферной плиты.

При этом следует отталкиваться от одной из главных наших посылок о том, что литосфера является природной системой, находящейся в предельно напряженном состоянии под действием, главным образом, сил гравитации. Планетарные силы, как выше уже отмечалось, так же как и силы, действующие со стороны атмосферы, дестабилизируют напряженное состояние в литосфере, вызывая его постоянное и прежде всего толчкообразное изменение, что, как известно, является характерным для зон, находящихся в предельно напряженном состоянии (см. главу 3). Каждое толчкообразное изменение напряженного состояния вызывает такие же изменения в прилегающем массиве пород. Процесс идет в пространстве и времени. В этом суть природы землетрясений в той части литосферы, которая находится в предельно напряженном состоянии или временно попадает в такие условия.

Изложенные выше предложения по оценке главных напряжений в земной коре и в литосфере в целом должны получить дальнейшее совершенствование и применение.

ПАСПОРТ ПРОЧНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО ГЛУБИНЕ ЛИТОСФЕРЫ

6.1. ПОСТРОЕНИЕ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ

Исключительно большое значение для решения вопросов геомеханики при открытых и подземных разработках полезных ископаемых, проектировании гидротехнических и других крупных сооружений имеет паспорт прочности горной породы Кулона–Мора. В этом паспорте удачно представлено определение прочности материала по сцеплению и углам внутреннего трения как основных характеристик прочности. Поэтому возникла необходимость разработать паспорт прочности массива горных пород с учетом влияния температуры и потери прочности его при приближении к состоянию гидростатистики, имеющей место на контакте земной коры и верхней мантии. Наличие такого паспорта позволит более обоснованно и оперативно решать задачи геодинамики применительно к различным участкам по площади и глубине земной коры.

На величину предела прочности при сдвиге τ земной коры существенно влияет температура горных пород (см. параграф 5.2).

Из анализа экспериментальных данных [7] следует, что в первом приближении можно принять линейную зависимость предела прочности при сдвиге τ от температуры t :

$$\tau/\tau_0 = 1 - t/T_{пл}, \quad (6.1)$$

где τ_0 – предел прочности при сдвиге при комнатной температуре; $T_{пл}$ – температура плавления горных пород.

Как следует из анализа приведенных в 5.2 данных, может быть принята линейная зависимость t от глубины H :

$$t = \alpha H,$$

где α – некоторый постоянный коэффициент.

При этом

$$T_{\text{пл}} = \alpha H_r.$$

Тогда формулу (6.1) можно представить в виде

$$\tau/\tau_0 = 1 - H/H_r. \quad (6.2)$$

Таким образом, сопротивление сдвигу (предел «текучести») τ с ростом H будет уменьшаться и стремиться к нулю при $H \rightarrow H_r$, поскольку в жидком состоянии $\tau = 0$.

С учетом поправки на изменение температуры формула (6.2) для расчета τ имеет вид

$$\tau = \left(1 - \frac{H}{H_r}\right) \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + 16K^2(P^2 - \beta^2)}}{16K^2}. \quad (6.3)$$

При $H = H_{\text{пл}}$ и $\tau = \tau_{\text{max}}$

$$\tau_{\text{max}} = \left(1 - \frac{H_{\text{пл}}}{H_r}\right) \frac{\gamma H_{\text{пл}}}{4K}. \quad (6.4)$$

Введем показатель $\mu = \tau/\tau_{\text{max}}$, который является относительным, характеризующим изменение величины τ с ростом глубины H и с учетом температуры t .

Тогда

$$\mu = \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} = \frac{1 - H/H_r}{1 - H_{\text{пл}}/H_r} \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + 16K^2(P^2 - \beta^2)}}{4K\gamma H_{\text{пл}}}. \quad (6.5)$$

Изменение величины μ с ростом глубины H при $K = 4$ и $H_{\text{пл}}/H_r = 0,45$ показано на рис. 6.1.

Из анализа приведенного графика следует, что с увеличением H вначале происходит рост предела прочности при сдвиге τ до $H = H_{\text{пл}}$, далее величина τ убывает и стремится к нулю при $H \rightarrow H_r$.

Выражение (6.5) позволяет получить соотношение, связывающее величины $H_{\text{пл}}$, H_r и характеристики паспорта прочности земной коры. Величина $H_{\text{пл}}$ (см. рис. 6.1) соответствует τ_{max} на паспорте прочности и может быть определена из условия минимума на кривой паспорта

$$d\mu/dH = 0. \quad (6.6)$$

Получающееся при этом выражение является весьма громоздким. Приведем приближенную количественную оценку соотношения величин $H_{\text{пл}}$, H_r и характеристик паспорта прочности земной коры,

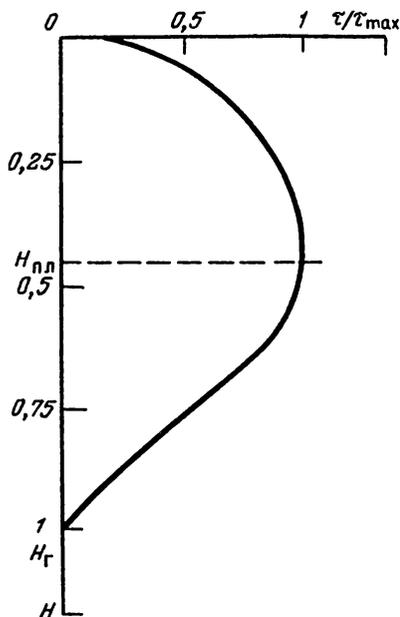


Рис. 6.1. Паспорт прочности земной коры в зонах сжатия с учетом напряженного состояния и температуры

исходя из линейной аппроксимации величины τ от глубины H :

$$\tau = \left(1 - \frac{H}{H_r}\right) (\tau_0 + \mathcal{H} \operatorname{tg} \rho), \quad (6.7)$$

где $\tau_0 = \sigma_0/2$ при $H = 0$; ρ - угол внутреннего трения.

Тогда из условия $d\tau/dH = 0$ получим следующую зависимость для определения величины $H_{пл}$:

$$\mathcal{H} H_{пл} = \frac{1}{2} \mathcal{H}_r - \frac{\tau_0}{2 \operatorname{ctg} \rho_{пл}}, \quad (6.8)$$

где $\rho_{пл}$ - угол внутреннего трения при $H = H_{пл}$.

Эта формула устанавливает связь между $H_{пл}$, H_r , τ_0 и $\rho_{пл}$.

В качестве примера рассчитаем величину $H_{пл}$ при следующих значениях параметров: $H_r = 30$ км, $\gamma H_r = 750$ МПа, $\rho_{пл} = 10^\circ$;

$$\tau_0 = \sigma_0/2 = 15 \text{ МПа.}$$

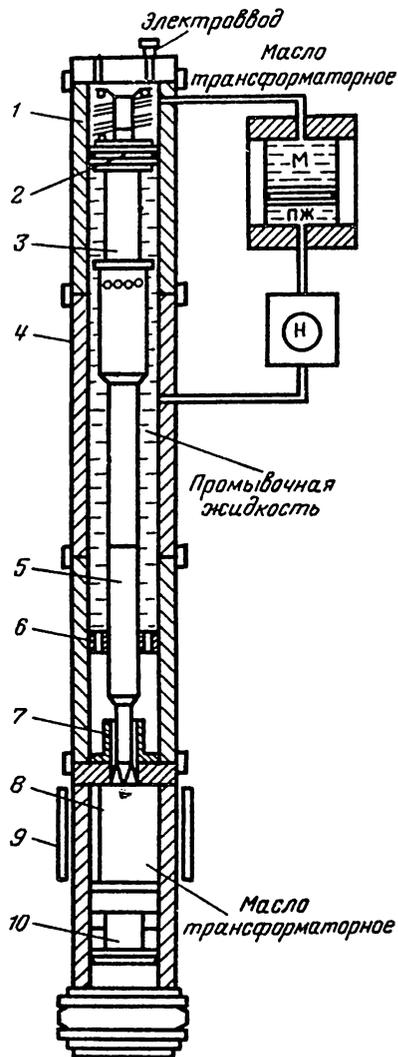
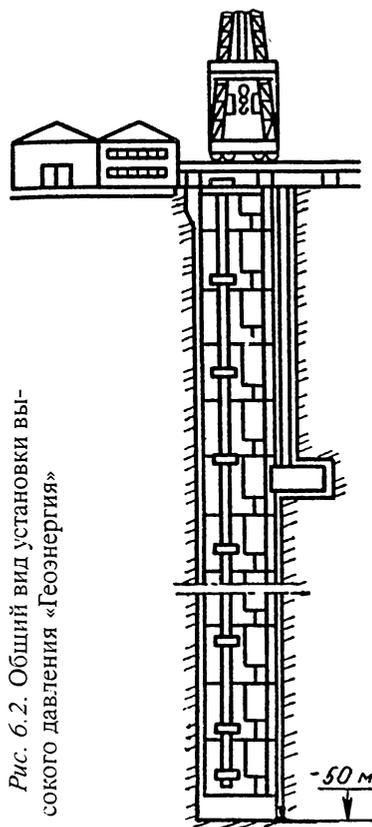
$$\text{Тогда } \gamma H_{пл} = 30 \text{ МПа или } H_{пл} = 13 \text{ км.}$$

6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К НАТУРНЫМ

Предлагаемые решения по напряженному состоянию массива горных пород должны уточняться по мере получения дополнительных данных о физико-механических свойствах горных пород с учетом совместного влияния напряженного состояния и температуры. При этом особое значение имеют исследования на установке высокого давления «Геоэнергия» конструкции ВНИМИ и ВНИИБТ (Пермский филиал)*. Установка предназначена для испытания крупногабаритных образцов в термодинамических условиях, соответствующих глубинам до 15–20 км (рис. 6.2). Установка «Геоэнергия» рассчитана на размещение в ней испытываемого образца горной породы (или искусственного

* Руководители разработки И.М.Петухов и Н.Д.Деркач

Рис. 6.3 (справа). Схема камеры:
 1 – камера высокого давления; 2 –
 разделительный поршень; 3 – элек-
 тродвигатель; 4 – насос; 5 – забойный
 двигатель; 6 – центратор; 7 – шламо-
 сборник; 8 – блок горной породы; 9 –
 ТЭН; 10 – поршень горного давления



материала) диаметром 260 мм и высотой 1500 мм, погружных электродвигателя и насоса, испытуемого забойного двигателя и долота. Общая высота камеры 50 м. Камера рассчитана на создание бокового давления до 250 МПа и осевого давления на образец до 500 МПа. Температура может изменяться от 0 до 350° С. Камеру (рис. 6.3) размещают в шахтном стволе глубиной 50 м и диаметром 6 м, над которым смонтирована буровая установка.

развитие, а также возможные последствия, место и время будущих катастрофических и мелкомасштабных динамических явлений.

7. Исследование возможностей использования энергии земной коры.

Комплексный подход в исследованиях с получением закономерностей поведения горных пород в реальных условиях позволяет составить общее представление о свойствах и энергетических возможностях массива горных пород. Достоверные знания о величинах энергии массива, характере реализации этой энергии в разных ситуациях позволяют разрабатывать тактику взаимоотношений с массивом при максимальном использовании его энергии с гарантией отсутствия геодинамических явлений.

На установке «Геоэнергия» представляется, кроме того, возможным проведение испытания и отработка параметров аппаратуры по автоматизированному управлению режимом бурения сверхглубоких скважин в целях обеспечения эффективного бурения их в экстремальных условиях больших глубин. Эти работы ведутся совместными усилиями сотрудников ВНИМИ, ВНИИБТ и Уральской сверхглубокой СГ-4.

Указанные работы имеют приоритетное значение. Следует отметить, что установка «Геоэнергия» была запланирована в начале 1970-х годов, прежде всего, для получения данных с целью совершенствования бурения сверхглубоких скважин. Уже в те годы на основе опыта горняков [37] было ясно, что существующая технология и техника бурения сверхглубоких скважин не могут обеспечить их бурение на глубинах свыше 10–12 км. Существующие теории бурения не предусматривают бурение скважин в экстремальных условиях больших глубин, когда имеет место повышенный против номинального выход выбуриваемого материала, интенсивное кавернообразование, искривление скважин, прихваты бурового оборудования и др.

Таким образом, использование установки «Геоэнергия» будет способствовать уточнению параметров паспорта прочности массива горных пород земной коры, условий, характера и количественных показателей обмена энергией между элементами массива и, в конечном счете, позволит существенно продвинуться в решении вопросов теории и практики геодинамики недр как одной из наук о Земле.

ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ НЕДР

7.1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НЕДР

Метод геодинамического районирования месторождений – как метод исследования естественного напряженного состояния массива горных пород – сформировался в 1978–1979 гг.* [4] в связи с решением вопроса о доле участия современной тектоники в проявлении горных ударов.

К этому времени значительно возросли глубины разработки месторождений, появились горно-тектонические удары и техногенные землетрясения. Утвердился тезис о том, что горные удары есть результат взаимодействия двух процессов: современного тектонофизического и технологического, создаваемого инженерной деятельностью человека при отработке месторождений. Эта уверенность базировалась на фактах превышения горизонтальных напряжений над вертикальными, установленными учеными-горняками в результате большого числа измерений, произведенных в горных выработках различных регионов. Причину этой закономерности горняки объясняли влиянием современной тектонической деятельности (С.А. Батугин, И.А. Турчанинов, Г.А. Марков и др.). Геологи, в свою очередь, заинтересовались этими экспериментами. Но одни не придавали им серьезного значения, считая, что в нарушенном горной выработкой массиве не может идти речь о современной тектонике. Другие (П.А. Кропоткин, О.И. Гущенко и др.) пытались использовать эти данные, наряду с данными о напряжениях в очагах землетрясений, для воссоздания современного поля напряжений значительных территорий. Таким образом наметилась конкретная граница взаимопроникновения геотехнологии в геологию и

* Методические указания по профилактике горных ударов с учетом геодинамики месторождений. / И.М. Петухов, И.М. Батугина и др. – Л.: ВНИМИ, 1980.

обратно, а значит, появилась тенденция к возникновению смежной области наук о Земле.

Для горной науки возникла методологическая проблема необходимости изучения и учета естественного поля напряжений массива горных пород при проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий, опасных по горным ударам. Для этого был проведен анализ 2,5 тыс. источников публикаций по горным ударам, начиная с 1900 г. Из этого анализа следовало, что наличие зон повышенных тектонических напряжений в массиве горных пород при разработке месторождений подтверждалось фактами:

стреляния горных пород в тоннелях (М.И.Евдокимов-Рокотовский, 1929 г.), объясненного современной тектонической деятельностью;

участия энергии вмещающих пород в проявлении горного удара (И.М.Петухов, 1954 г.);

превышения горизонтальных напряжений над вертикальными на отдельных рудниках, полученного инструментально по методу разгрузки, и объяснение этого факта с позиций современных движений земной коры (С.А.Батугин и др., 1964 г.);

приуроченности мест возникновения внезапных выбросов угля и газа к зонам максимального изменения скоростей современных движений земной коры (Г.А.Коньков и др., 1965 г.);

наличия связи неравномерного распределения горных ударов по площади и глубине с касательными тектоническими напряжениями (И.М.Батугина, 1968 г.).

Эти и другие факты свидетельствовали о том, что в массиве горных пород есть особо опасные зоны, которые обладают определенными свойствами, отличными от соседних зон. Анализ локальных геологических и горнотехнических условий проявления горных ударов убедительно показал, что в формировании и проявлении горных ударов на угольных шахтах участвует вся система «угольный пласт – боковые породы» и что горный удар происходит вследствие превышения скорости приложения нагрузки над скоростью релаксации напряжений в угольном пласте, а энергия горного удара складывается из энергии упругого сжатия пласта и притока энергии из окружающего массива (И.М.Петухов, 1954–1972 гг.).

Установлено также, что горные удары проявляются неравномерно в пространстве и времени. Интенсивность горных ударов и условия их проявления в пространстве значительно зависят от величин касательных тектонических напряжений в земной коре, а также времени и режима их действия. Причем, чем больше величина касательных напряжений, тем с меньшей глубины и большей интенсивностью происходят горные удары (рис. 7.1). Кроме того, число горных ударов

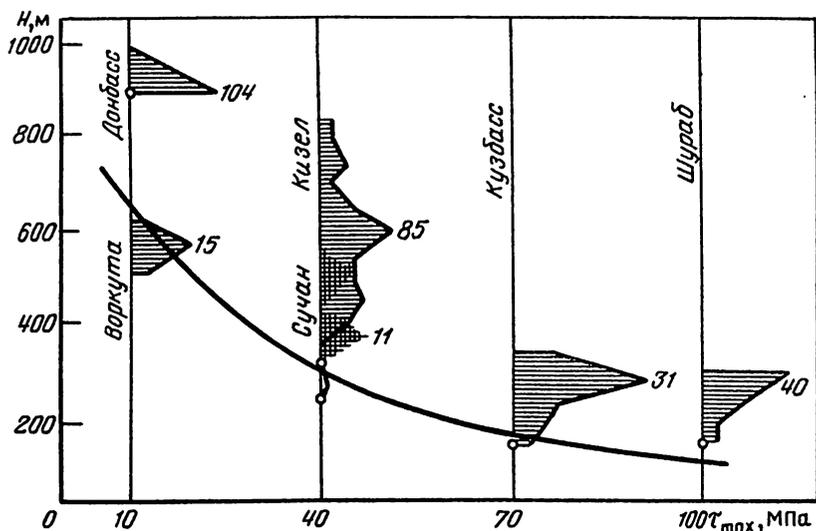


Рис. 7.1. Распределение числа горных ударов по глубине для месторождений, расположенных в различных тектонических зонах (цифрами показано максимальное число горных ударов на месторождении на данной глубине)

возрастает в определенные часы, дни, сезоны года. Это обусловлено влиянием на напряженное состояние пород таких глобальных факторов, как действие солнечной активности, лунно-солнечных приливов, неравномерности скорости вращения Земли и т.д. (И.М.Батугина, А.С.Батугин, 1966–1969 г., И.М.Петухов, 1972 г.).

В связи с этим появилась вторая методологическая проблема горной науки: раскрыть механизм формирования исходного поля напряжений в районе месторождения на стадии проектирования и строительства горных предприятий для выявления опасных, тектонически напряженных зон (ТНЗ). Но с помощью какой информации этот механизм раскрывать? На стадии проектирования и строительства мы имеем общую геологическую карту, инженерно-геологические данные о свойствах грунтов в местах сооружения промплощадок, сведения о физико-механических свойствах пород, полученные на основании результатов бурения скважин под стволы. Наличие только этого фактического материала о естественном состоянии недр в районе месторождения не давало достаточного основания для раскрытия механизма формирования естественного поля напряжений.

Однако разработка месторождений ведется на глубинах до 5 км, т.е. в верхних частях земной коры. Следовательно, исходное поле

напряжений горных пород в районе разрабатываемого месторождения обуславливается теми физико-химическими процессами вещества земной коры, изучением которых занимаются науки о Земле, такие как геология, геофизика, геохимия, география, геодезия и др. Каждая из этих наук владеет определенным уровнем информации о свойствах и поведении вещества земной коры. Таким образом возникла необходимость использования результатов исследований перечисленных наук о Земле, несущих информацию о тектоническом поле напряжений. Поэтому появилась третья методологическая проблема горной науки: использование в обобщенном виде результатов исследований в смежных науках о Земле для оценки исходного поля напряжений в районе месторождения.

Сначала необходимо было выбрать путь обобщений. Обратились к геологической форме движения материи. Классификация форм движения материи отражает две глобальные тенденции современного естествознания – дифференциацию и интеграцию его отдельных областей. В этих двух тенденциях вырабатывается общая картина развития природы как многокачественного и в то же время целостного материального процесса.

Из области смежных наук о Земле, таких как тектоника, геоморфология, металлогения, геотехнология (в том числе теория горных ударов), и фундаментальных наук: механика, математика и т.д. – были выделены информационные блоки с данными, раскрывающими характер протекания физических процессов в земной коре, которые можно использовать для оценки напряженного состояния пород. Эти информационные блоки необходимо было объединить и увязать между собой для практического использования.

Обобщение фактов и синтез методов потребовали единого методологического подхода. В данном случае был выбран общий диалектический метод о единстве материального мира, который позволил выделить одни и те же закономерности, полученные путем дифференциации исследований в смежных науках, и синтезировать их по принципу «от общего к частному» в более или менее целостное представление о естественном напряженном состоянии массива.

Формирование общих закономерностей напряженного состояния массива горных пород происходит согласно известным физическим законам, действующим в природе. Однако многообразие форм движения материи (форм энергии), действующих в земной коре, затрудняет выявление этих закономерностей. Переход из одной формы энергии в другую в земной коре имеет более сложный стохастический характер. Логическая схема, составленная для обобщения информации в смежных науках о Земле, представлена в табл. 7.1.

**Использование закономерностей,
полученных в смежных науках о Земле**

Область знания	Раздел
Тектоника плит Геотектоника	Характеристика границ плит и их взаимодействие Законы взаимодействия разломов, продолжительность их «жизни», зона влияния разлома
Металлогения Геоморфология Тектонофизика	Расположение месторождений в зоне разлома Методы выделения блоковых структур Механизм формирования тектонических структур, зона влияния разлома
Геотехнология	Механизмы разрушения пород при горном ударе, на- рушения устойчивости бортов карьеров; сдвигения горных пород и другие законы геомеханики
Математика (статистика) Геомеханика	Построение тренд-поверхностей, распознавание об- разов Механика формирования сдвигового разрушения, ме- ханизм формирования трещин
Теория дислокаций Высшая геодезия	Взаимодействие дислокаций; характеристика границ, блочность Характер и величина современных движений земной коры

Статистические исследования являются предварительной разведкой о сущности явления. Полученные при этом выводы свидетельствуют о скрытом механизме явления, который предстоит расшифровать.

Путем синтеза информационных блоков из смежных отраслей наук о Земле был создан метод геодинамического районирования месторождений в качестве основного метода новой отрасли наук о Земле – геодинамики месторождений. Позднее область применения метода расширилась, и он получил название – метод геодинамического районирования недр, а сама новая отрасль науки – геодинамика недр [4, 42].

Логико-структурная схема создания метода геодинамического районирования недр представлена на рис. 7.2 [4].

При этом напряженно-деформированное состояние массива горных пород в районе объекта предложено определять по принципу «от общего к частному», что позволяет абстрагироваться от частных и представить общее течение процесса деформирования массива пород в районе объекта. Чем больший объем горных пород принят при исследовании, тем процесс представляется более однородным, и, следовательно, более четко выделяются скрытые закономерности. И



Рис. 7.2. Логико-структурная схема геодинамического районирования месторождений

хотя такой общий процесс деформирования (тенденция образования разлома) состоит из суммы частных процессов (разрушение отдельных перемычек между фрагментами формирующегося разлома), он происходит на более высокой качественной ступени. Познав его, мы, очевидно, сможет расшифровать последовательность деформирования горных пород, выявив таким образом для правильного планирования, например горных работ, наиболее напряженные участки разломов в районе месторождения на данном этапе его развития. Блочная структура месторождения является не чем иным, как результатом деформирования земной коры при изменении напряженного состояния в массиве пород.

Подход к оценке напряженного состояния горных пород по принципу «от общего к частному» обусловлен еще и тем, что, зная закономерности формирования напряженного состояния для тех массивов, для которых они хорошо изучены, можно предположить, что эти закономерности действуют и в других объемах горных пород.

Использование при создании метода геодинамического районирования принципа «от общего к частному» (1978–1980 гг.) позволило получить возможность оперативного выделения блочной структуры, выявления взаимодействия и взаимозависимости элементов блочной

структуры, классифицировать блоки по рангам (I, II, III и т.д.), учитывая «главенство» блоков высшего ранга по отношению к низшему. Вопрос об иерархической соподчиненности блоков получил позднее отражение в работах М.А.Садовского и других*, прежде всего, в части выявления возможности установления количественной оценки соотношения размеров блоков в структуре. В методе же геодинамического районирования соподчиненность и размеры блоков выявляются автоматически из методики их выделения последовательно от высшего ранга к низшему.

Таким образом, *методологическими основами* создания метода геодинамического районирования недр являются:

выявление общности закономерностей в частных науках о Земле на основании их диалектического единства;

раскрытие закономерностей формирования исходного поля напряжений региона на основе изучения геодинамического состояния земной коры;

выявление блочной структуры земной коры на основе принципа «от общего к частному», раскрывающего существующую соподчиненность элементов блочной структуры;

применение выявленных закономерностей для планирования безопасного освоения недр на стадии проектирования и строительства предприятий и других объектов.

Содержание метода геодинамического районирования вытекает из логико-структурной схемы (см. рис. 7.2) и в общих чертах сводится к следующему.

Тектоническое поле напряжений как в районе месторождений, так и в районе любого объекта, если подходить к его изучению по принципу «от общего к частному», можно охарактеризовать следующим образом. Земная кора состоит из плит, каждая из которых имеет свое вращательно-поступательное движение. Под влиянием напряжений, действующих на границе плит, они дробятся на крупные мегаблоки, которые определенным образом взаимодействуют между собой и под влиянием напряжений, возникающих на их контактах, делятся на блоки более низкого ранга и т.д. В конечном итоге можно прийти к микроблочному строению массива, динамическое взаимодействие блоков в котором и будет определять естественное поле напряжений в районе месторождений (объекта).

Такое районирование территории месторождения (участка любого другого объекта) на блоки, определение характера подвижности по их

* Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности // Физика Земли. – 1984. – № 2. – С.3–15.

границам (динамики взаимодействия), ориентировки и соотношения (величины) главных напряжений в блоках составляют *существо* предлагаемого способа оценки естественного напряженного состояния массива горных пород в земной коре.

С учетом полученных результатов составляются карты геодинамического районирования территории месторождений (участков любого объекта), которые, в свою очередь, являются основой при решении вопросов управления геодинамической безопасностью и эффективностью эксплуатации при освоении недр и земной поверхности.

Таким образом, содержание и структура метода геодинамического районирования сводятся к следующим основным положениям [4, 10].

I. Выявление блочной структуры земной коры в ее иерархической соподчиненности с выделением тектонически напряженных и разгруженных зон по принципу «от общего к частному» (по картам масштаба):

Элемент структуры	Ранг	Масштаб карты
Мегаблоки	I	1:40 000 000
	II	1:25 000 000
	III	1:12 000 000
	IV	1: 8 000 000
	V	1: 4 000 000
Блоки	I	1: 2 500 000
	II	1: 1 000 000
	III	1:100 000, 1:50 000
	IV	1: 25 000
	V	1 : 10 000

Примечание. Выделение мегаблоков I, II, III рангов производится для условий океанического дна, а мегаблоков IV и V рангов при геодинамическом районировании литосферных плит.

II. Оценка динамики взаимодействия блоков с определением степени их активности и выделением тектонически напряженных зон.

III. Классификация участков земной коры по напряженности и геодинамической опасности.

IV. Оценка напряжений в блочном массиве горных пород: определение граничных условий для соответствующей литосферной плиты;

определение граничных условий для отдельных мегаблоков;

расчет напряжений в блочной структуре для регионов и отдельных участков.

V. Управление геодинамической безопасностью и эффективностью освоения недр и земной поверхности на основе результатов геодинамического районирования.

7.2. ВЫДЕЛЕНИЕ БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Блочность массива горных пород выявляется посредством морфоструктурного анализа земной поверхности, для чего были обобщены и модернизированы известные методы выявления блоков по рельефу на основе использованного авторами для решения этого вопроса известного в маркшейдерском деле принципа «от общего к частному». Методика выделения блочной структуры подробно приведена в [4, 10], поэтому далее ограничимся изложением, главным образом, основных подходов, не вдаваясь в подробности.

Основой метода является различная интенсивность вертикальных движений блоков по системе разновозрастных разломов различной глубины заложения. При этом имеется в виду, что любые горизонтальные перемещения блоков находят отражение в их вертикальных движениях. Числовыми характеристиками рельефа в данном случае служат высоты площадок древней поверхности выравнивания. Эта поверхность когда-то находилась в горизонтальном или слабонаклонном положении, а в результате тектонических процессов была деформирована на отдельные блоки, поднятые или опущенные при движениях на разную высоту. Отметки сохранившихся возвышенных участков и включаются в обработку. Устанавливают минимальную разницу высот, достаточную для отнесения двух соседних участков к разным блокам.

В каждом конкретном районе с учетом контрастности рельефа и масштаба карты за минимальную разницу высот h_0 можно принять $0,1 (H_{\max} - H_{\min})$, где H_{\max} и H_{\min} – абсолютная высота рельефа, соответственно максимальная и минимальная (без отметок врезов речных долин) %, м.

В зависимости от величины h_0 устанавливают градации интенсивности тектонических движений в соответствии с приведенными ниже данными.

Минимальная разница высот....	500–400	300–200	100	50	25
Градация интенсивности.....	1	2	3	4	5

На карте размечают опорные высоты водоразделов, тектонических уступов или ступеней, а также равнинных участков. Отметки склонов и врезов речных долин при этом не учитывают.

Природные объекты расположены на разных гипсометрических уровнях. Так, рудные месторождения занимают гипсометрический уровень в пределах 200–1800 м, угольные – 100–900 м, нефтяные – 50–200 м.

Исходя из общего положения равновесия термодинамического состояния системы, устойчивому равновесию отвечают точки минимума, т.е. чем рельеф ниже для данной местности, тем более устойчив массив горных пород. Однако дефекты структуры массива, вызванные условиями его образования, уменьшают устойчивость. Уменьшение устойчивости сопровождается возрастанием изобарного потенциала, т.е. давления.

На объектах, которые занимают более низкий гипсометрический уровень, наблюдается повышенное горное давление по сравнению с объектами, находящимися на более высоком гипсометрическом уровне.

Поэтому дешифрованные признаки выделения разломов по рельефу варьируют в довольно широких пределах: на одних гипсометрических уровнях выступают одни признаки (например, контрастность рельефа), на других – другие (спрямленность элементов рельефа) и т.д.

Блочную структуру с помощью ЭВМ можно выделить тренд-методом [4, 9], который основан на разложении моделируемого явления на закономерную (тренд) и случайную составляющие.

Выявляя основную тенденцию изменения высот рельефа древней поверхности выравнивания в зависимости от географических координат с помощью тренд-метода в сочетании со структурным дешифрированием аэрофотоснимков и топографических карт, выделяют блоковые структуры, а также изображают тектонический рельеф в пределах выделенных блоков изолиниями. Это позволяет определить знак перемещения блока и его амплитуды в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В ходе вычислений на ЭВМ вершинное гипсометрическое поле высот описывается уравнением алгебраического полинома i -го порядка.

Сущность решения заключается в последовательном сопоставлении вершинной поверхности с аналитической формой уравнения соответствующих порядков.

В данном случае варьируют сглаженными высотами рельефа, блоки выделяют по принципу «от общего к частному», и сеть выделенных блоков постепенно сгущается.

Применение указанных выше методов для выявления блочной структуры при переходе на более крупные масштабы ограничено из-за малочисленности поверхностей выравнивания. Поэтому для выявления подвижной микроблочной структуры внутри блоков IV ранга рекомендуется использовать известные геоморфологические и морфометрические методы, базируясь на имеющуюся в районе блока эрозионную сеть: речки, ручьи, овраги, балки. При этом границы блоков IV ранга переносят на более крупные масштабы 1:10000, 1:5000 и 1:2000. Точность топографической съемки указанных масштабов должна быть такой, чтобы на топографическом плане были отображены все микроформы рельефа.

В работе В.П.Философова рассмотрены методы: градиентно-векторные модели рельефа, порядков долин и водораздельные линии, базисных поверхностей, остаточного рельефа, вершинных поверхностей, локальных размывов, разностных поверхностей, монобазисных и моновершинных поверхностей, асимметрии форм рельефа, гониобазит и гониогипсоит.

В табл. 7.2 приводится область применения указанных методов.

Таблица 7.2

Наименование метода	Область применения
1. Базисных поверхностей	Изучаются статические связи, существующие между морфометрическими поверхностями рельефа и тектоническими структурами без учета их развития
2. Вершинных поверхностей	
3. Остаточного рельефа	
4. Разностных поверхностей	Изучаются динамические связи в процессе развития рельефа. Устанавливаются связи рельефа с движениями земной коры и с другими процессами развития рельефа
5. Асимметрия форм рельефа	Специальные морфометрические методы, предназначенные для решения частных геолого-геоморфологических задач

Указанные методы используются геоморфологами для поиска тектонических структур при нефтегазопроисловых работах, при поисках россыпных месторождений и других полезных ископаемых. Они с успехом могут использоваться и для оценки геодинамического состояния массива горных пород как *дополнительные* методы на любой стадии

выделения блочной структуры и, прежде всего, они будут полезны на стадии выявления блоков IV, V рангов. Применение этих методов при выделении блоков высокого ранга, т.е. при использовании топографических карт мелкого масштаба может оказаться в ряде случаев не достаточно эффективным. Вопрос этот подлежит дальнейшему исследованию.

Использование скрытых топографических поверхностей для выявления и уточнения блочных структур

В случаях, когда рельеф земной поверхности является сильно выравненным и перепады высот в 1,0–1,5 м находятся в пределах точности построения горизонталей, а также в случаях нарушенного рельефа техногенной деятельностью, рекомендуется использовать скрытые топографические поверхности. К ним относятся поверхности коренных пород и различных напластований, в том числе планы залежей в изогипсах, изомощностях, изоглубинах в районе месторождений.

Скрытые топографические поверхности, как и поверхность рельефа, представляют собой сумму неровностей первичного и вторичного происхождения. Первичные неровности скрытой топографической поверхности – это формы рельефа, соответствующие определенной эпохе образования залежи, а вторичные неровности – это деформации, обусловленные современными тектоническими процессами. Составление карт блоковых структур соответствующей скрытой топографической поверхности можно вести, например, с использованием тренд-метода.

Наблюдения, выполненные Я.М.Грицюком, Г.М.Гелашвили, Н.Р.Урушадзе, в восьмидесятые годы в условиях Ткибули-Шаорского месторождения, позволили связать границы блоковых структур, выделенные по рельефу поверхности известняков, с их границами по гипсометрии угольного пласта и других маркирующих поверхностей, и этстраполировать эти границы на более глубокие горизонты.

Необходимо далее отметить, что гипсометрический уровень расположения, например, месторождения относительно высоты рельефа соседних участков, в значительной степени определяет его напряженное состояние, а, следовательно, и степень его удароопасности [4].

Месторождения полезных ископаемых расположены на разных высотных отметка, но в основном на равнинно-континентально геоморфологическом уровне. Угольные месторождения занимают более низкий гипсометрический уровень и здесь наблюдается наиболее повы-

шенное горное давление. Для рудных месторождений характерен более высокий гипсометрический уровень. Уменьшается боковой отпор и наблюдается потеря устойчивости и разрушение горного массива.

Поэтому, если для данного региона установить среднюю высоту рельефа H_{cp} , то месторождения, расположенные выше H_{cp} будут удароопасны с большей глубины, чем месторождения, расположенные ниже H_{cp} .

В работе [4] приводится классификация месторождений по степени их потенциальной удароопасности, в том числе и на указанном объекте.

При выявлении блочной структуры *по космическим снимкам* при перенесении границ блоков с планов мелких масштабов на более крупные они становятся «расплывчатыми». На данном этапе аэрофотоснимки (АФС) – более информативный материал, так как на них хорошо выделяются различные элементы ландшафта, которые, как известно, удовлетворительно сопоставимы с трещинно-разрывной тектоникой коренных пород. При этом виды индикаторов рельефа следует рассматривать по различным направлениям выражаемой ими трещиноватости. При изучении трещиноватости по АФС применяют масштабы 1:18 000, 1:5 000 и крупнее.

Если выделение подвижной трещиноватости по аэрофотоснимкам на шахтном поле затруднено из-за нарушения рельефа техногенной деятельностью, то рекомендуется использовать космические снимки, разрешающая способность которых позволяет исследовать участки местности в границах выделенных блоков.

Блочные структуры выделяют по индикационным признакам разломов, ограничивающих блоки, а их однородность оценивают по индикационным признакам самих блоков.

Индикационными признаками, отражающими проявление разломов в рельефе, могут служить линейно вытянутые гряды (понижения), прямолинейные уступы (неотектонические или денудационные), линейное смещение элементов рельефа (хребтов, гряд, оврагов, долин и т. д.), линейное расположение цепочек грязевых вулканов и т. д.

Индикационными признаками, отражающими проявление разломов в строении гидросети, могут служить коленообразные изгибы долин рек, спрямленные участки рек на фоне древовидного типа речной сети, перехват речных долин, резкая смена типов меандрирования цепочных озер, линейное расположение источников подземных вод, линейные границы между различно увлажненными участками, линейное расположение наледей в зоне многолетней мерзлоты и т. д.

Почвенно-ботаническими индикационными признаками разломов могут служить: линейное расположение полос почв в районах без растительного покрова, линейное расположение полос растительности,

линейная смена растительных сообществ, полосы угнетенной растительности и т. д.

Собственно блочными индикационными признаками, отражающими целостность блока, в каждом масштабе рассмотрения являются: общий гипсометрический уровень вершинной поверхности блока, единый тип речной сети, меандрирование, характер и глубина эрозионного вреза, близкий фототон изображения блока, вызванный одинаковой влажностью и единым природно-территориальным комплексом, сформировавшимся на его поверхности.

Процесс дешифрирования упрощается тем, что блоки слагают закономерные системы, обусловленные планетарным полем напряжений литосферы. Каждая система разломов имеет свою ориентировку и шаг между нарушениями. Учет этого явления в процессе дешифрирования упрощает решение задачи.

Сопоставление границ блоков с геологическими и геофизическими данными. Границы блоков, выделенные в результате геоморфологического анализа, должны уточняться сопоставлением с геологическими и геофизическими данными. При этом необходимо иметь в виду следующие тектонические, магматогенные и гидрогеологические признаки разломов:

смещения пород по разрывным нарушениям;

зоны дробления и интенсивной трещиноватости, которые пересекают, смещают и брекчируют все комплексы пород;

глинка трения, зеркала скольжения и зоны милонитизации;

минеральные жилы, заполняющие трещины;

родники, дающие начало ручьям и речкам;

фонтанирование воды из геологоразведочных скважин;

термальные воды.

Геофизические методы дают возможность выяснить тектоническое строение изучаемой площади и выявить вещественный состав пород и границы их распространения. При этом выполняют аэрогеофизическую и наземную съемки в масштабах 1:25 000, 1:10 000, 1:5 000, 1:2 000, проводят геофизические исследования в скважинах (картаж, межскважинное просвечивание), отбор и испытание в лабораторных условиях проб пород (кернавого материала, проб из шпуров, траншей), осуществляют эталонирование геофизических методов применительно к изучаемому региону на участках с известным геологическим строением (выходы нарушений на земную поверхность, зоны горных работ).

Исследования проводят с помощью грави-, магнито- и электро-разведки, варио- и радиометрии. В их основе лежит выделение участков с резко различающимися физическими полями – зонами аномалий (гравитационных, магнитных, электрических, радиоактивных). Выбор

комплекса геофизических методов для выделения геологических нарушений зависит от конкретных физических свойств исследуемого района: магнитной проницаемости пород, из электрической проводимости, плотности, радиоактивности.

Пространственное распределение геофизических полей позволяет осуществлять районирование данного региона, устанавливать и подтверждать основные блоковые структуры, особенно на междуфрагментарных участках, а также разделяемых геологическими нарушениями пликативного и дизъюнктивного характера. Комплексное изучение зон разломов позволяет оценить длительность их развития, проследить изменение амплитуды с глубиной, уточнить морфологию разлома.

При выделении разломов по сейсмическим данным критериями являются: вертикальное смещение или крутой уступ по горизонту, непрерывно коррелируемому по профилю; участки флексур, резкие изгибы осей складок, цепочки линейно вытянутых локальных складок и ограничения зон однотипных складок при анализе структурных карт по опорным и условным сейсмическим горизонтам; зоны аномального затухания преломленных волн; проявление на сейсмограммах многочисленных дифрагированных волн, фиксируемых на нескольких горизонтах или в самой глубокой части сейсмического разреза; зоны резкого изменения характера сейсмического разреза (прекращение прослеживания или проявления новых маркирующих горизонтов, значительные различия граничных скоростей, резкое изменение динамических особенностей записи); большое число смен волн (более 0,5 на 1 км профиля).

При выделении разломов по гравимагнитным данным критериями являются: протяженные линейно вытянутые зоны повышенных горизонтальных градиентов Δq (ΔT , Δz) или зоны максимумов W_{xz} , W_{yz} и их величины; крутое или резкое ограничение аномалий, «торцевое» сочленение одноименных различно ориентированных аномалий, рассечения аномалиями одного простирания одноименных аномалий другого простирания; цепочка узких линейных аномалий, смещение линейно вытянутых аномалий в плане; систематические вытягивающиеся вдоль прямых линий изгибы аномалий; границы участков со специфической гравиметрической характеристикой; границы участков с различной взаимосвязью магнитных и гравитационных аномалий; линейно вытянутые зоны пониженного магнитного поля среди положительных аномалий; степень изрезанности изолиний, знак аномалий и их интенсивность.

По электроразведочным данным критериями являются зоны повышенных (пониженных) градиентов на картах и разрезах, линейно

вытянутые зоны изменения различных типов кривых, участки разного расхождения ветвей кривых.

В некоторых случаях, когда месторождения расположены в районах с достаточно густой сетью сейсмических станций, для целей геолого-картировочного плана могут быть привлечены данные сейсмологических наблюдений. В качестве критериев для выделения границ блоковых структур используют:

уровень сейсмической активности, характеризующий сейсмический режим данного района, флуктуацию уровня во времени и пространстве;

корреляцию периодов, соответствующих максимальным амплитудам на записях местных и удаленных землетрясений, не зависящих от геологического строения региона в районе расположения сейсмостанций; нарушение формы проходящих волн определенного диапазона их спектра означает наличие в районе станции неоднородностей с размерами, сравнимыми с длиной волн; такими неоднородностями могут быть отдельные блоки и разделяющие их зоны разломов;

анализ тонкой пространственной структуры полей флуктуаций времени пробега телесеismicической волны; наличие аномалий времени пробега волны регионального и локального характера непосредственно связано с геологическими неоднородностями строения в районе наблюдений;

анализ код-волн, применяемых для изучения строения среды в районе расположения сейсмостанций;

спектральный анализ волнового поля (регулярных волн и код-волн);

анализ поляризационных характеристик сейсмических волн.

Сопоставление границ тектонических блоков с метеорологическими признаками проявления разломов. На снимках выделяются следующие аномалии облачности:

облачные массивы характерного рисунка, возникающие в результате обтекания воздушным потоком океанских островов;

повышенная повторяемость гроз на участках с обнаженными гранитоидами;

образование обычных гроз по границам глубинных разломов.

Так, главный Уральский разлом обнаружен на космическом снимке (КС) на фоне области, покрывающей Уральский хребет (исследования Л.И.Морозовой). На КС в мощном поле облачности видна узкая темная полоса – малооблачная зона, возникающая в результате размывания кучевообразной облачности.

Резкие границы облачных полей, безоблачные зоны внутри облачных массивов, гряды облаков в безоблачном пространстве отме-

чены на КС и над другими разломами. Эти природные процессы являются дополнительными индикаторами, свидетельствующими об активности и границах разломов, и потому могут быть использованы для подтверждения границ разломов, выделенных по геоморфологии.

Сопоставление границ тектонических блоков с данными микрогеодинамического картирования с использованием эманационной и электромагнитной съемок. Эманационная съемка фиксирует изменения в покровных рыхлых отложениях содержания изотопов радона, а электромагнитная – колебания анизотропии электромагнитных свойств рыхлых отложений и искусственных покрытий (асфальта). Характеристики эманационного поля и анизотропии электромагнитных свойств зависят от уровня напряженно-деформированного состояния среды не только количественно, но и качественно, что позволяет дифференцировать геодинамические процессы во времени. Об эффективности использования микрогеодинамического картирования для уточнения границ геодинамического районирования свидетельствует их проведение на Северо-Уральских бокситовых месторождениях [10].

Микрогеодинамическое картирование подтвердило наличие как разломов, выделенных при геодинамическом районировании, так и тектонических нарушений. Кроме того, микрогеодинамическим картированием устанавливается различный динамический характер их проявления. Активность может быть обусловлена собственной работой блоков (их взаимодействием) в результате формирования нового поля напряжений, пассивность тектонических нарушений объясняется локальным возмущением на фоне перераспределения общего поля напряжений [10].

7.3. ВЫЯВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКОВ

Общие положения. После установления границ блоков и построения блоково-структурной карты исследуемого месторождения необходимо определить динамику взаимодействия тектонических блоков. Выявить динамическое взаимодействие блоков – это значит, во-первых, установить характер их подвижности (поднятие, опускание, скручивание); во-вторых, определить, какими условиями нагружения (сжатия, растяжения, сдвига или их комбинаций) обусловлены такие движения; в-третьих, зарегистрировать вид напряженного состояния

нетронутого массива горных пород в зоне разлома, к которому приурочено месторождение.

По *геоморфологическим данным*. Динамическое взаимодействие блоков можно оценить по очертаниям речной сети: восходящие движения соответствуют центробежному или радиальному плану сети; нисходящие – центростремительному; параллельные – подвижным моноклиналям; увеличение овражного и овражно-балочного расчленения характерно для активных положительных морфоструктур; формирование выстилаемого или перестилаемого аллювия в речных долинах свойственно нисходящим или переменным движениям; аномальное увеличение ширины долины соответствует участкам прогибов; глубокий врез долин – участкам поднятий; выход источников грунтовых вод – линиям нарушений активных структур.

Динамическое взаимодействие блоков можно оценить геолого-геоморфологическими методами, применяемыми при изучении современных тектонических движений земной коры.

Площадь обследования ограничивается размерами подвижного блока, в котором расположено поле шахты (любого объекта). Для этой площади составляют схему рек с их названиями; для каждой реки строят профили – горизонтальный и вертикальный. На участках с постоянным уклоном измеряют показатель эрозионно-аккумулятивной деятельности рек через 500 м:

$$E = q + h + l + m.$$

Показатели q , h , l , m определяют согласно шкале в баллах [10].

По *данным повторного нивелирования*. Блоки земной коры перемещаются относительно зон разломов. Современные движения земной коры, выявленные по данным повторного нивелирования, могут являться его количественным показателем. При этом разломы могут фиксироваться перепадами значений скорости современных движений, градиентами и изоградиентами скоростей.

Это подтверждается исследованиями современных движений земной коры Кузбасса и сопоставлением с его блоковой структурой [10].

Наблюдения выполнены на специальных полигонах, заложенных в Таштаголе (Горная Шория) и Североуральске (Северо-Уральские бокситовые рудники).

Северо-Уральский геодинамический полигон создан под руководством авторов для изучения характера динамического взаимодействия блоков, выявленных при геодинамическом районировании месторождения СУБРа (рис. 7.3). Полигон заложен в 1985 г. в районе шахт 14 – 14-бис и 15 – 15-бис на земной поверхности и в шахте. В 1987 г. полигон был расширен [10].

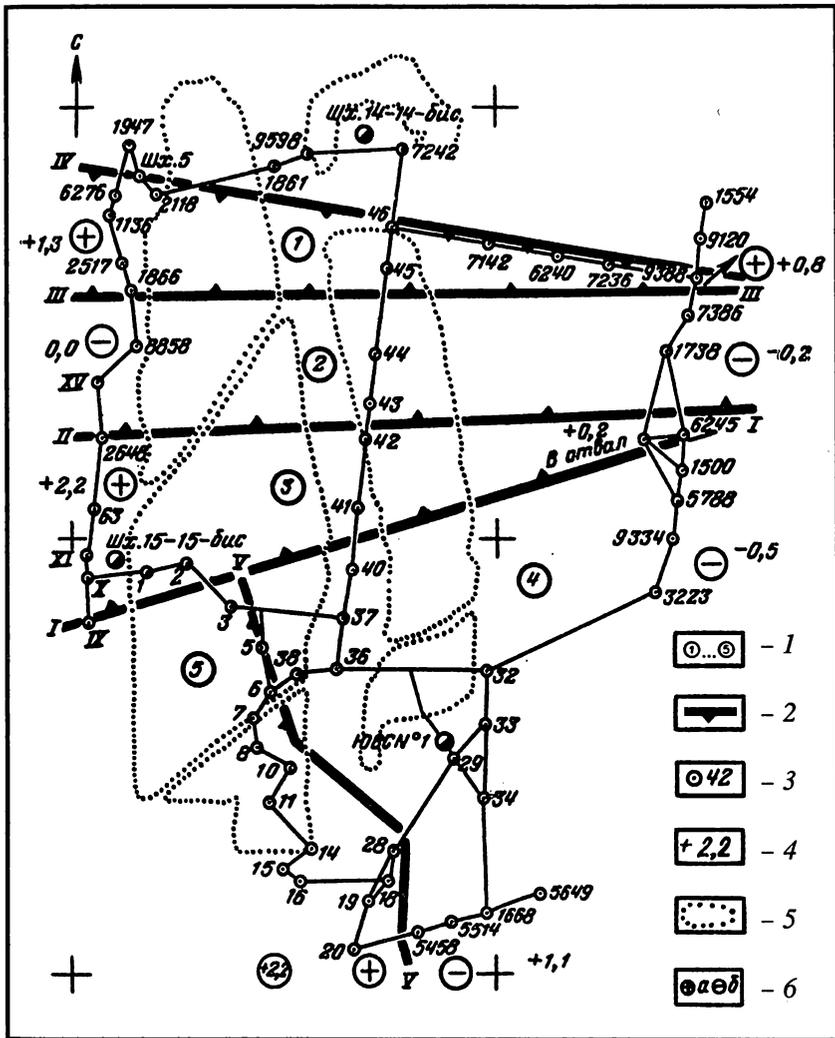


Рис. 7.3. План Северо-Уральского геодинамического полигона на земной поверхности:

- 1 - номера блоков;
- 2 - разломы IV ранга;
- 3 - репер на поверхности;
- 4 - скорости движения блоков, мм/год;
- 5 - границы горных работ;
- 6 - вертикальная направленность движения блоков

Маркшейдерско-геодезические наблюдения на поверхности проводили один раз в год в августе – сентябре, в шахте – два раза*.

Высотные измерения выполняли с помощью нивелира Ni-007, угловые – теодолитом Theo-010, линейные – светодальномером СП-2 «Топаз». Нивелирование на поверхности проводили по программе II класса, в шахте – III класса.

Средние квадратичные погрешности при нивелировании на земной поверхности составляют $\pm 0,97$ мм/км, при угловых измерениях – $\pm 1,8$ мм/км, при нивелировании в шахте – 3,6 мм/км.

Наблюдения на гор. – 320 м (шахта № 15 – 15-бис) показали движение блоков, разграниченных геологическими нарушениями. Скорость относительного движения блоков изменялась от +16,4 мм/год на юге до – 11,2 мм/год на севере. На гор. – 500 м (шахта № 14 – 14-бис) движение блоков менее выражено, и величина смещений изменялась от +2,7 на юге до +3,2 мм/год на севере.

Несмотря на выраженное в целом однонаправленное движение блоков относительно друг друга, отмечен скачкообразный характер деформирования массива горных пород после горно-тектонического удара 26 февраля 1987 г. с энергией $E = 1,34 \cdot 10^8$ Дж, гипоцентр которого находился в массиве подстилающих пород. При этом зафиксированы вертикальные деформации, свидетельствующие о неравномерных наклонах южного крыла сброса Северный. Сопоставление данных нивелирования с сейсмическими показало, что вертикальное смещение массива горных пород происходило по плоскости разрыва с азимутом простирания 42° и углом падения 37° . Амплитуда смещения составила 49 мм.

Скорости движений реперов, установленные по результатам нивелирования, в целом изменялись от -25,8 (репер 40) на подработанной территории до +20,6 мм/год (репер 46) в краевой части шахтного поля. Реперы 3–11, расположенные на подрабатываемой земной поверхности, оседали до 13 мм/год на южном участке (шахта № 15 – 15-бис); реперы 36–42 (в центральной части) до 25,8 мм/год; реперы 43–45 на северном участке полигона (шахта № 14-бис) – до 4,5 мм/год. На восточной линии реперов скорости движения за все время наблюдения изменялись незначительно, в среднем составляли для блоков 1, 2, 3, 4 соответственно: +0,8; -0,2; +0,2; -0,5 мм/год. Наибольшая вертикальная скорость движения (1 мм/год) зафиксирована между блоками 1 и 2. На западной линии реперов скорость движения в блоке 1 в среднем составила +1,3 мм/год, блок 2 находился в относительно

* В работах участвовали А.Я.Погинец, М.Н.Мамаева, И.В.Рыбак, Ю.М.Игнатов, Е.И.Микулин

неподвижном состоянии, скорость движения блока 3 равна +2,2 мм/год. Южная линия реперов позволила установить вертикальную скорость движения блока 4 относительно блока 5, которая составила 1,1 мм/год. Скорость движения блока 5 составила +2,2, а блока 4 – +1,1 мм/год (см. рис. 7.3). Для всех структурных блоков установлены направления их наклонов и градиенты скоростей [10].

Особенности проявления зон сжатия, растяжения и сдвига. При оценке динамического взаимодействия блоков необходимо знать условия нагружения на их границах.

Существует три типа взаимодействия литосферных плит и блоков меньше ранга: растяжение земной коры (спрединг, раздвиг, сброс); сжатие (субдукция, надвиг, взброс); скольжение или сдвиг (трансформный разлом, сдвиг).

Каждому типу границ блоков соответствует своя геодинамическая обстановка, которая характеризуется определенным глубинным строением, формированием тектонических структур, магматических, метаморфических и осадочных комплексов и полезных ископаемых.

Особенности глобальных зон растяжения, сжатия и сдвига, согласно концепции тектоники плит, а также проявляющиеся в геологических и геофизических полях признаки разломов, по которым можно оценивать положение зон сжатия, растяжения или сдвига в региональном масштабе, приведены в работе [10] и здесь не рассматриваются.

Результаты тектонофизического моделирования на однородных материалах сдвиговых структур, структур сжатия и растяжения свидетельствуют о том, что их формирование происходит строго в соответствии со способами приложения нагрузки и определенной ориентировкой структур к вектору нагружения.

Механизм образования блочного массива горных пород одинаков на любом масштабном уровне: глобальном, региональном и локальном. Согласно принятой методологии, закономерность взаимодействия блоков, выявленную на одном уровне в первом приближении, можно переносить на любой другой масштаб исследований.

Оценку условий нагружения блоков на основе изучения взаимодействия разломов производят, исходя из соотношения сил растяжения, сжатия, сдвига сочленяющихся разломов. Например, если одна из границ блока характеризуется сдвиговым перемещением, то другая, сопряженная с ним и находящаяся по направлению движения, будет являться границей сжатия. Граница, параллельная блоку, будет иметь сдвиговый характер. Определяют, какие границы выделенного блока будут примерно параллельны данному разлому. В соответствии с этим оценивают характер и направление перемещения пород вдоль границы выделенного блока.

7.4. КЛАССИФИКАЦИЯ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО НАПРЯЖЕННОСТИ И ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

7.4.1. По напряженности

При решении вопросов рационального использования минеральных и энергетических ресурсов, увеличения объемов промышленного и гидротехнического строительства, повышения безопасности труда и охраны окружающей среды существенную роль играет анализ напряженного состояния земной коры. Описание закономерностей распределения напряжений в земной коре чрезвычайно сложно.

С использованием метода геодинамического районирования была разработана предварительная классификация* участков земной коры по степени их напряженности (рис. 7.4):

I класс – на всю толщину земной коры, $\sigma_{гор} = 0$;

II – то же, $\sigma_{гор} \leq \sigma_0$ (здесь σ_0 – горизонтальные напряжения вблизи земной поверхности);

III – на глубину ведения горных разработок ($H = 2 \div 2,5$ км);

IV – на глубину освоения нефтяных и газовых месторождений ($H = 8 \div 10$ км);

V – на глубину бурения и использования скважин ($H = 15 \div 20$ км);

VI – на всю толщину земной коры ($H = H_c$);

VII и VIII – столкновение и скольжение плит;

IX – раздвиг плит;

X – поддвиг плит.

Эта классификационная таблица составлена, исходя из следующих основных положений.

В районах, в которых активные горизонтальные силы отсутствуют, массив горных пород находится в зонах растяжения, напряженное состояние оценивают по формулам (5.1).

Для районов, где действуют активные горизонтальные силы, расчет напряжений основывается на концепции о предельно напряженном состоянии массива горных пород [29]. Горизонтальное сжатие земной коры создает условия для деформирования ее части, прилегающей к земной поверхности, и установления предельно напряженного состоя-

* В разработке классификации участвовали В.С.Сидоров, А.С.Багугин, С.И.Петухов

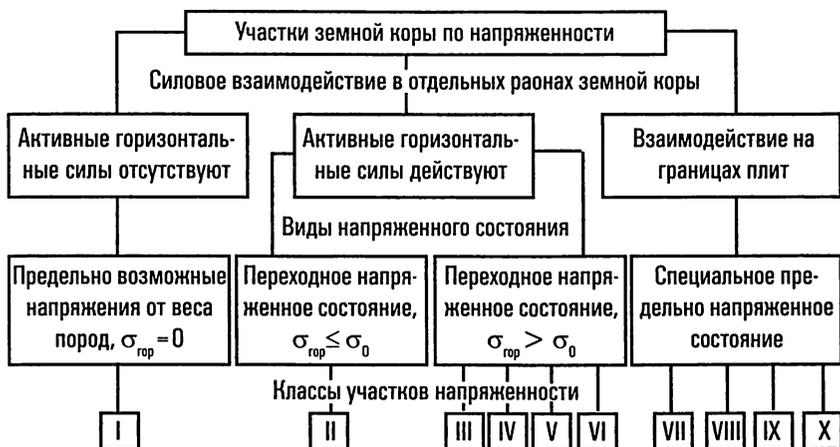


Рис. 7.4. Классификация участков земной коры по напряженному состоянию

ния в массиве горных пород. Это означает, что максимальную составляющую напряжений в массиве σ_1 образует активная сила, действующая в горизонтальной (или близкой к ней) плоскости.

Для этого случая напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 рассчитывают по формулам (5.3) и (5.4).

Средние значения горизонтальных напряжений σ_1 для общего упругопластического случая могут быть определены по формуле

$$\sigma_{ср} = \gamma H \left[\frac{\mu}{1 - \mu} + \frac{E_1(1 - 2\mu_2)}{E_2(1 - 2\mu) + E_1(1 - 2\mu_2)} \cdot \frac{R}{2h} \right], \quad (7.1)$$

где h – толщина земной коры на рассматриваемом участке, км; R – радиус Земли, км; E_1 и μ_1 – соответственно модуль упругости, МПа, и коэффициент Пуассона земной коры; E_2 и μ_2 – то же, подстилающих пород, МПа.

Величина E_1/E_2 существенно влияет на значение напряжений σ_1 . Начиная с некоторых значений отношения E_1/E_2 , величина σ_1 достаточно велика и может превзойти предел прочности горных пород при сжатии. Поэтому использование упругого решения для сферической оболочки при $E_1/E_2 > \beta$ (где β – значение отношения E_1/E_2 , отвечающего предельно напряженному состоянию массива горных пород), не является правомерным. Таким образом, величина горизонтальных напряжений σ_1 заключена в интервале $\mu(1 - \mu)\gamma H \leq \sigma_1 \leq \sigma^*$ (где σ^* – критическое значение напряжений σ_1 , соответствующих предельному

распределению напряжений в горном массиве). Поскольку при $\sigma_1 > \sigma_{\text{сж}}$ имеет место разрушение сферической оболочки, то земная кора (сферическая оболочка) будет представлять собой набор системы блоков с наличием ослабленных зон между блоками.

Обозначим h_0 – минимальное значение толщины земной коры, тогда горизонтальная сила

$$P_r = \sigma_{\text{ср}}^{\text{max}} h_0, \quad (7.2)$$

где $\sigma_{\text{ср}}^{\text{max}}$ определяется по формуле (7.1) при $H_r = h_0$.

При $h > h_0$, поскольку горизонтальные силы равны, имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ср}} h &= \sigma_{\text{ср}}^{\text{max}} h_0 \\ \text{или} \quad \sigma_{\text{ср}} &= \sigma_{\text{ср}}^{\text{max}} (h_0/h) \end{aligned} \quad (7.3)$$

Таким образом, имея карту изопахит мощности земной коры, можно по формуле (7.3) определить величину $\sigma_{\text{ср}}$ для рассматриваемого участка.

Если помимо карты изопахит мощности земной коры располагать сведениями относительно ее деформаций на каком-либо участке, то в этом случае средние горизонтальные напряжения могут быть вычислены по приближенной зависимости

$$\sigma_{\text{ср}} = \sigma_{\text{ср}}^0 - E_1(\varepsilon_r - \mu_1 \varepsilon_b) \quad (7.4)$$

где $\sigma_{\text{ср}}^0$ – определяется по формуле (7.2); E_1 и μ_1 – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона рассматриваемого участка земной коры; ε_r и ε_b – соответственно горизонтальная и вертикальная деформации рассматриваемого участка земной коры.

Формула (7.4) позволяет приближенно учитывать сближение и раздвиг плит.

Оценка напряжений для VIII и X классов представляет интерес при анализе процесса формирования и развития скольжения плит, их раздвига и зон субдукции, когда идет поглощение литосферных плит в результате их поддвигания под соседние плиты.

Общий механизм этого явления рассмотрен в [18]. Разрушение земной коры происходит от сжатия активными горизонтальными силами P_r . Возникает вертикальная подъемная сила

$$P_b = P_r \operatorname{tg} \alpha. \quad (7.5)$$

Угол α изменяется в пределах от $45^\circ - \rho/2$ вблизи земной поверхности с учетом постепенного обращения в нуль угла внутреннего трения ρ на глубине $H_{\text{пл}}$, где угол α становится равным 45° . Ниже глубины $H_{\text{пл}}$ угол α также равен 45° .

Средние горизонтальные напряжения, необходимые для среза, должны удовлетворять следующему условию паспорта прочности:

$$\tau_n = c + \sigma_n \operatorname{tg} \rho, \quad (7.6)$$

где τ_n и σ_n – соответственно касательные и нормальные напряжения на площадке среза;

$$\sigma_n = \sigma_{cp} \sin^2 \alpha + \sigma_b \cos^2 \alpha, \quad \alpha \approx 45^\circ; \quad \tau_n = |\sigma_{cp} - \sigma_b|/2; \quad (7.7)$$

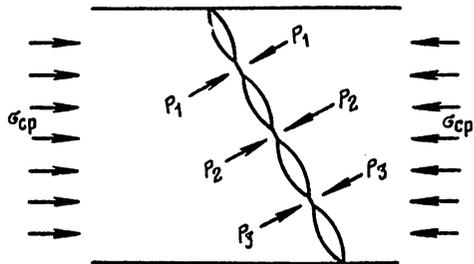
σ_b – вертикальные напряжения, действующие на площадку среза в данной точке; c – сцепление на площадке.

Отметим, что при деформировании реализуется дискретный (толчкообразный) характер разрушения по поверхности среза (рис. 7.5). За счет неровных контактов на поверхности разрушения имеют место выступы, несущие повышенные нагрузки, и вдающиеся части, представляющие зоны разгрузки. Поэтому в первую очередь будет происходить смятие и срез выступов, причем вначале этот процесс начнется в зонах предельного состояния, прилегающих к земной поверхности, и далее будет проникать в глубь земной коры. Следует ожидать, что этот процесс будет происходить толчкообразно, т. е. в некоторых местах он будет затухать, а в других возобновляться.

За счет того, что коэффициенты трения покоя и движения при срыве спаек на контактных поверхностях различны, будет иметь место скачкообразное выравнивание поля напряжений на одних участках и резкое изменение на других. Продвижение фронта разрушения вдоль и в глубь земной коры будет напоминать в каком-то смысле «эффект движения сороконожки». Поэтапное движение фронта разрушения приведет к постепенному срезу земной коры по всей ее толщине.

Таким образом, из анализа приведенной на рис. 7.4 классификационной таблицы следует, что на участках I класса напряжения можно оценивать по формулам (5.1), на участках II класса – по формулам (5.12), (7.3), на участках III–IV классов – по формулам (5.3) и (5.4). На участках VII, IX классов оценку величин главных напряжений можно производить по формулам (7.3) и (7.4), на участках VIII и X классов – по формуле (7.6).

Рис. 7.5. Схема к механизму дискретного (толчкообразного) деформирования при срыве сцепления в ослабленной зоне между плитами



В заключение отметим, что, несмотря на весьма приближенный характер предложенных зависимостей, они могут быть полезны для предварительной оценки степени напряженности отдельных участков земной коры. В то же время эти формулы, безусловно, требуют уточнения, которое в дальнейшем может идти по нескольким направлениям:

совершенствование геомеханической модели напряженно-деформированного состояния отдельных участков земной коры;

анализ имеющейся экспериментальной картины распределения напряжений в верхних слоях земной коры для уточнения величин физико-механических констант с учетом изменения влияния температуры;

анализ глубинных сейсмических наблюдений для уточнения упругих характеристик отдельных участков земной коры и подстилающих пород;

уточнение существующих и изыскание новых критериев отнесения участков земной коры к тому или иному классу.

7.4.2. Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности*

Рост масштабов человеческой деятельности, вмешательства в природу, все более обостряет проблему обеспечения геодинамической безопасности как самого человека, так и природных и инженерных объектов. Известно, что под *опасностью* понимают «состояние природы или техносферы, при котором возможно возникновение явлений и процессов, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду» [1]. Тогда под *геодинамической опасностью* можно понимать опасность, связанную с геодинамическим состоянием земной коры и техногенным внешним воздействием на недра и земную поверхность. *Основной геодинамической опасностью* в этом случае можно назвать такую, которая может привести к крупной аварии или катастрофе.

Геодинамическая опасность реализуется в такой форме, как аварии (инциденты) и чрезвычайные ситуации в недрах и на земной поверхности, связанные с динамическими проявлениями горного и газового давления, техногенными землетрясениями, оползневыми явлениями, другими геодинамическими явлениями (горные удары, внезапные выбросы, повреждения магистральных трубопроводов, линий электропередач, железнодорожного полотна, метрополитена, герметичности подземных сооружений и др.).

* Батугин А.С. Классификация участков земной коры по степени геодинамической безопасности. Сб. тр. ВНИМИ, 1997. С. 206–213.

В этой главе сделана попытка систематизировать фактический материал по разным регионам в рамках классификации участков земной коры по степени их геодинамической опасности. В качестве основного классификационного признака предлагается использовать мощность сейсмоактивного слоя земной коры в пределах мегаблоков 1–2 порядка.

Район исследований охватывает территорию Евразии, для которой автором составлен макет карты степени геодинамической опасности для выделенных методом геодинамического районирования мегаблоков земной коры. Всего на карте показано четыре типа участков, различающихся степенью геодинамической опасности.

Согласно гипотезе проф. И.М.Петухова, в земной коре в слое толщиной от земной поверхности до некоторой глубины породы находятся в предельно напряженном состоянии, которое возникает в естественных условиях под влиянием глобальных сил сжатия. Геомеханические процессы, происходящие в этом слое, аналогичны процессам, протекающим в окрестностях горных выработок [3, 4]. Эти представления, а также результаты исследований предельно напряженных пород в окрестностях горных выработок [4], факты существования глобальных закономерностей проявления горных ударов, исследования автора по геодинамическому районированию недр, выполненные в различных географических районах, послужили основой для построения названной выше классификации.

Синтезируя теоретические представления о зонах предельно напряженных пород, можно отметить:

чем выше уровень внешних напряжений, тем шире зона предельно напряженных пород;

в зоне предельного напряженного состояния массива пород (зоне предразрушения) происходит деформирование массива путем перемещения отдельных его частей (блоков) относительно друг друга [4]. При этом внутри перемещающихся блоков может сохраняться упругое состояние;

в условиях запредельного деформирования, соответствующих «падающему» участку диаграммы «напряжение–деформация», происходит снижение несущей способности массива и дальнейшее развитие деформаций (относительных перемещений блоков) может происходить при все более низких значениях напряжений;

перемещение блоков относительно друг друга происходит толчкообразно, поэтому одним из признаков существования в земной коре слоя предельно напряженных пород является проявление сейсмичности;

сейсмическая активность массива постепенно снижается при приближении к зоне максимума опорного давления.

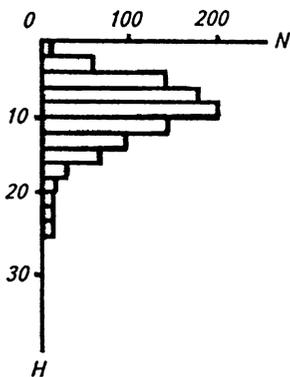


Рис. 7.6. Распределение числа землетрясений N по глубине H района Восточного Китая

Перечисленные особенности зон предельно напряженного состояния массива позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, чем выше напряжения в земной коре (чем больше мощность слоя предельно напряженных пород), тем больше раздробленность ее верхней части, тем легче по имеющимся поверхностям скольжения (границам блоков) могут возобновиться подвижки. Т.е. чем больше мощность слоя предельно напряженных пород, тем выше степень геодинамической опасности участка земной коры.

Во-вторых, чем больше мощность слоя предельно напряженных пород, тем больше максимальные глубины очагов коровых землетрясений. В подтверждение этого приведем рисунок с характерной гистограммой распределения гипоцентров коровых землетрясений одного из сейсмоактивных районов Китая (рис. 7.6). Далее из рис. 7.6 можно видеть распределение очагов землетрясений, как и динамических явлений в зонах предельно напряженного состояния пород на месторождениях.

Поскольку мощность земной коры H_k разная для различных регионов и колеблется в пределах от 15–20 до 60–70 км, то слой предельно напряженных пород одной и той же мощности в одном случае будет означать, что в предельно напряженном состоянии находится вся земная кора, а в другом – лишь ее часть. Поэтому для оценки мощности этого слоя более целесообразно использовать относительную, а не абсолютную характеристику. Такой характеристикой, по аналогии с мощностью «сейсмоактивного» слоя, может быть процентное отношение мощности слоя предельно напряженных пород H_s к мощности земной коры H_k .

Автором построен макет карты мощности слоя предельно напряженных пород для территории Евразии с учетом геометрии мегаблоков земной коры. Анализ этой карты позволяет выделить четыре типа участков земной коры соответственно с мощностью слоя предельно напряженных пород (сейсмоактивного слоя H_s): 0; 0–25; 25–50; > 50 %, рис. 7.7. Соответственно выделенным градациям выделяется четыре типа участков земной коры по степени геодинамической опасности, табл. 7.3.

В соответствии с представлениями об иерархичности в проявлении свойств и строения блочного массива выделяемые опасные участки

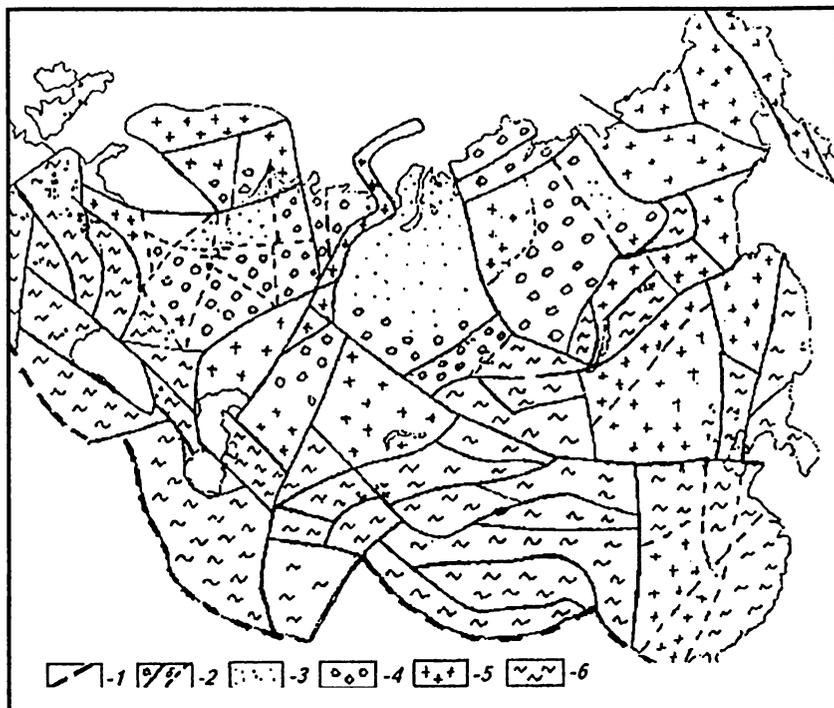


Рис. 7.7. Районирование геодинамической опасности мегаблоков Евразии:

1 - границы литосферных плит; 2 - границы мегаблоков I (а) и II (б) порядков; 3-6 - соответственно I-IV степеней геодинамической опасности

Таблица 7.3

Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности

Степень геодинамической опасности	Мощность слоя предельно напряженных пород земной коры, H_s/H_k , %	Область распространения
1	0	Европейская равнина, Западно-Сибирская низменность
2	до 25	Кузбасс, Донбасс, Воркута
3	до 50	Урал, Юг Западной Сибири, Апатиты, Дальний Восток
4	> 50	Юг Сибири, Кавказ, районы Средней Азии и Китая, Памир

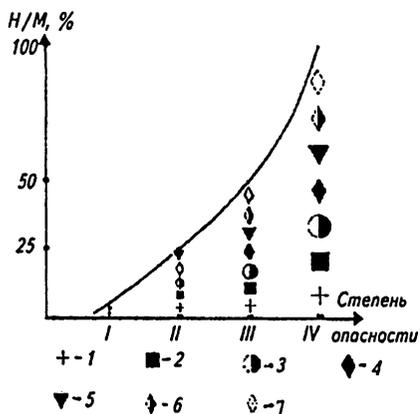


Рис. 7.8. Зависимость степени геодинамической опасности участков земной коры от мощности слоя предельно напряженных пород:

1 – аварийные зоны на линейных объектах; 2 – удароопасные угольные месторождения; 3 – удароопасные рудные месторождения; 4 – горно-тектонические удары на угольных месторождениях; 5 – горно-тектонические удары на рудных месторождениях; 6 – техногенные землетрясения; 7 – оживление тектонических нарушений при ведении горных работ

(блоки) могут включать в себя менее опасные подучастки (блоки меньшего ранга). Т. е. наиболее опасные участки 4-й степени опасности могут включать в себя подучастки 3, 2 и 1-й степеней опасности; участки 3-й степени опасности могут включать в себя подучастки 2-й и 1-й степеней опасности; участки 2-й степени опасности могут включать в себя подучастки 1-й степени опасности.

Для подтверждения работоспособности предлагаемой классификации ниже рассмотрено глобальное проявление геодинамической опасности по участкам.

Для этого на основе карты степени геодинамической опасности участков земной коры (см. рис. 7.7) и практических данных составлена табл. 7.4 и построен рис. 7.8. В табл. 7.4 отражено различие в проявлении геодинамической опасности для участков земной коры 1–4 степеней опасности (для ряда мегаблоков Евразии).

Из табл. 7.4 видно, что наблюдается нарастание геодинамической опасности от участков 1-й степени опасности к участкам 4-й степени. На трассе продуктопровода Сургут–Самара, пересекающего несколько географических районов, потенциально аварийных зон выделено: в участках 1-й степени опасности – 2; на участках 2-й степени опасности – 3; на участках 3-й степени опасности – 5.

Если удароопасных рудных и угольных месторождений в участках 1-й степени опасности нет, на участках 2-й степени опасности они уже встречаются (север Кузбасса, месторождения Норильского ГМК), то в пределах участков 4-й степени их находится подавляющее большинство. Горно-тектонические удары характерны только для участков 3-й и 4-й степеней опасности. От участков 1-й степени к участкам 4-й степени геодинамической опасности увеличивается и сейсмическая опасность территорий и т. д.

Таблица 7.4

Характеристика геодинамической опасности участков земной коры

Проявление геодинамической опасности на участках по степеням	Формы геодинамической опасности						
	Наличие потенциально аварийных участков на линейных объектах: продуктопровод Сургут–Самара, % от общего числа выделенных аварийных участков	Наличие удароопасных угольных месторождений, %	Минимальная глубина проявления горных ударов, м	Наличие удароопасных рудных месторождений, %	Проявление горно-тектонических ударов	Проявление техногенных землетрясений, баллы	Интенсивность максимального расчетного землетрясения, баллы
1	20	0	0	0	Нет	5	5
2	30	4	200–700	10	Нет	5–6	6
3	50	22	150–200	40	Есть	6	6–7
4	Не пересекает	76	150	50	Есть	> 6	> 10

Более наглядное представление о характере нарастания геодинамической опасности от участков 1-й степени к участкам 4-й степени опасности дает рис. 7.8, построенный на основе анализа данных в табл. 7.4. Чем более характерна та или иная форма опасности для участка какой-либо степени опасности, тем более крупным условным знаком это показано. На рис. 7.8 видно, что чем больше мощность предельно напряженного слоя пород, тем сильнее проявляется геодинамическая опасность такого участка.

На основе данных, представленных в табл. 7.4 и рис. 7.8 составлена общая краткая характеристика участков 1–4 степеней геодинамической опасности.

Участки 1-й степени геодинамической опасности характеризуются спокойным тектоническим режимом и располагаются преимущественно в пределах платформ. Однако лишь часть платформ представлена этими участками. Для рассматриваемой территории участок 1-й степени опасности выделяется, прежде всего, в пределах Западно-

Сибирской низменности. Работы по геодинамическому районированию трасс продуктопровода Сургут–Самара (1990 г.) и железной дороги Москва–Кемерово (1991–92 гг.) позволили привлечь внимание к тому, что аварии на линейных объектах группируются в районах активных границ блоков. Для трассы продуктопровода Сургут–Куйбышев нами было выделено 10 опасных зон, две из которых расположены в пределах участка 1-й степени геодинамической опасности. На участке Бологое–Березайка железной дороги Москва–С.-Петербург в зоне активного разлома произошло около 10-ти аварий, в том числе несколько крушений пассажирских поездов. Ряд опасных зон выделен нами для трассы трубопровода Ямал–Белосток.

В пределах участков 2-й степени геодинамической опасности уже возможно существование крупных тектонически напряженных зон с предельно напряженным состоянием пород. В участки этой степени опасности попадают части угольных месторождений Кузбасса, Донбасса, нефтяные провинции Удмуртии, Татарии и др. Для шахт Северного Кузбасса отмечены случаи горных ударов, внезапных выбросов, описано возникновение опасных тектонически напряженных зон вдоль крупных дизъюнктивных нарушений, проявление у границ блоков зон сквозной трещиноватости, к которым приурочены многочисленные завалы лав. Для Чутырско-Киенгопского месторождения нефти (Удмуртия) отмечено перераспределение флюидов в залежи с отжиманием их в тектонически разгруженные зоны, в районе Ромашкинского месторождения нефти происходят мелкофокусные техногенные землетрясения.

В участках 3-й степени геодинамической опасности расположены удароопасные месторождения Урала, юга Кузбасса и Горной Шории, Дальнего Востока, Кольского полуострова. К настоящему времени для Кузбасса зафиксировано более пятисот естественных землетрясений энергетического класса $K > 7$ и около двух тысяч горных ударов. В последнее время отмечены случаи горно-тектонических ударов. Шахтные поля осваиваемого Ерунаковского месторождения также тяготеют к зоне 3-й степени опасности, здесь уже отмечены динамические проявления горного давления при проходке наклонных стволов.

Горно-тектонические удары, «оживление» тектонических нарушений в зоне ведения горных работ отмечены на шахтах и рудниках Урала.

По имеющимся данным, более 60 % аварий на трубопроводах происходит в зонах активных разломов. Так, по трассе газопровода Бухара–Урал все аварии по причине коррозии металла, дефекта труб, брака сварки и т. д. происходят только в зонах разломов. В районе г. Красноуральска (Северный Урал) в зоне границы крупных блоков на протяжении 30 км произошло более десятка аварий на шести нитках газопровода.

Участки 4-й степени геодинамической опасности охватывают наиболее тектонически активные области Евразии. В эти области попадает большинство удароопасных рудных и угольных месторождений. Для многих из них известны случаи горно-тектонических ударов, «оживления» тектонической нарушенности, проявление техногенных землетрясений. Примером может служить угольное месторождение Бейпяо, где подвижки по нарушениям при горно-тектонических ударах происходят в направлениях, совпадающих с направлениями смещений по разломам разных рангов.

Таким образом, фактический материал по проявлению геодинамической опасности может быть систематизирован в рамках рассматриваемой классификации. Последняя может быть использована при решении целого ряда вопросов обеспечения геодинамической безопасности, в том числе при предварительной оценке опасности неосвоенных территорий.

7.5. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО И ГАЗОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Следующим важным звеном метода геодинамического районирования являются разработка и широкое внедрение аналитических методов расчета напряженного и газогидродинамического состояния массива горных пород с учетом его блочного строения.

Наличие прогнозных карт естественного напряженного и газогидродинамического состояния блочного массива горных пород позволит принять объективное решение на этапе проектирования и строительства, например: при выборе месторасположения шахтных стволов или эксплуатационных скважин для добычи нефти и газа, мест заложения гидроэлектростанций, атомных станций, захоронения химических и радиоактивных веществ; при проектировании протяженных продуктопроводов и железных дорог.

Прогнозные карты напряженного состояния массива горных пород около выработок позволят, например, установить порядок разработки пластов в свите и последовательность отработки шахтных полей, выбрать месторасположение подготовительных и капитальных выработок, найти предельные размеры целиков, построить зоны повышенного горного давления, опасные по проявлениям горных ударов и выбросов.

Один из способов определения напряженно-деформированного и газогидродинамического состояний – математическое моделирование геомеханических процессов.

Достоверность расчета напряжений в массиве горных пород определяется выбором надежных аналитических методов и правильным заданием граничных условий. Все расчетные программы основаны на реализации метода граничных интегральных уравнений (ГИУ) [41]. Теоретическое обобщение результатов шахтных инструментальных наблюдений, выполненных в широком диапазоне горно-геологических условий отработки месторождений твердых полезных ископаемых, позволило создать методику задания граничных условий на почве очистных выработок. По этой методике, на основе изучения информации о месторождении, оперативно могут быть сформулированы граничные условия для любых горно-геологических ситуаций нового месторождения.

Разработанные аналитические методы позволяют рассчитывать поля напряжений: в блочном массиве горных пород, не тронутым горными работами; в блочном массиве пород около выработок; в массиве пород около очистных выработок произвольной формы в плане при отработке свиты пластов; в массиве пород около очистных выработок при отработке свиты пластов для разрезов вкрест простирания, а также определять характеристики проницаемости и влагогазоемкости пород с учетом изменения поля напряжений [17].

Естественное поле напряжений в пределах разрабатываемого месторождения является результатом взаимодействия элементов блочной системы.

Смещения блоков одного относительно другого, так же как и деформирование самих блоков, имеют решающее значение для определения напряженного состояния нетронутого массива и оценки его поведения при горных разработках. Создание методов расчетов, которые учитывали бы блочное строение массива, представляет актуальную и важную задачу, затрагивающую все проблемы геомеханики.

Необходимые формы ГИУ для системы блоков при сложных условиях на контактах основаны на свойствах некоторых граничных уравнений для отдельных блоков. Граничное интегральное уравнение для отдельного блока должно соответствовать следующим условиям:

1. Быть сформулированным в прямой форме, т. е. содержать только механические величины, а не фиктивные нагрузки или смещения.
2. Содержать величины, испытывающие разрыв на границе только под знаком интеграла.
3. Тожественно удовлетворяться для точек вне блока, если ГИУ выполняется на границе.

Уравнения нужного типа для задачи о системе взаимодействующих блоков с произвольными условиями на контактирующих поверхностях получены и реализованы на ПЭВМ [41].

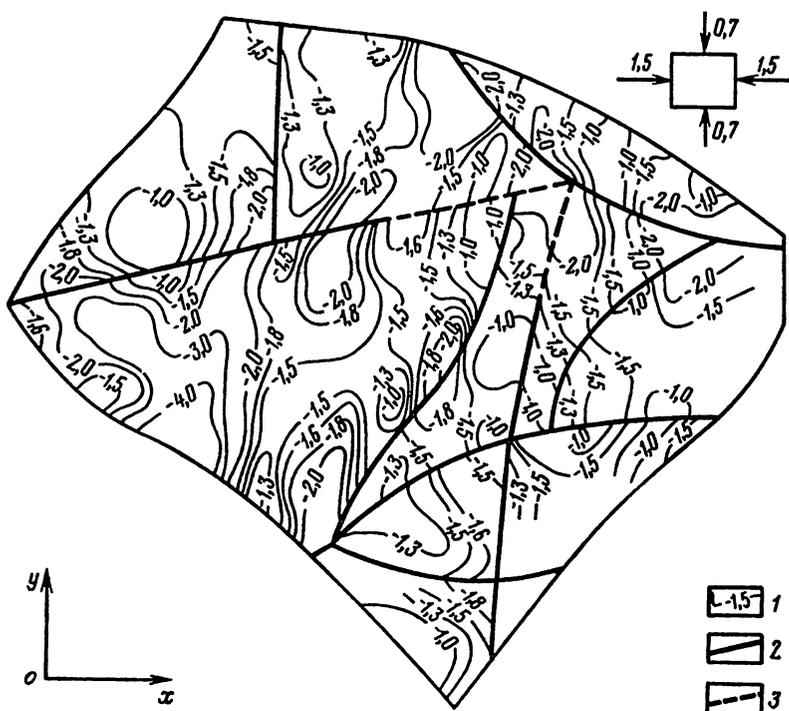


Рис. 7.9. Изменение напряженного состояния пород в блочной системе: 1 – изолинии напряжений σ_x ; 2 – разломы; 3 – тектонически напряженные зоны

Практика расчетов на ЭВМ по разработанной программе свидетельствует о том, что при переходе от сравнительно небольшого числа блоков с усложненными граничными и контактными условиями результаты вычислений нередко ухудшаются. Поэтому представляется целесообразным иметь набор специальных алгоритмов для определенного круга условий. Кроме того, в структуре алгоритма следует учесть физические особенности указанных условий.

Имея полную картину напряженного состояния блочного массива горных пород, можно выполнить геофильтрационный прогноз нетронутого массива в условиях тектонически нарушенных месторождений. В качестве гидродинамического аналога пород принимают модель плановой фильтрации в некотором слое с заданной мощностью. При этом считается, что продуктивный слой представлен квазиизотропными трещинно-пористыми коллекторами с хаотическим распределением систем трещин. Формулы для главных компонент

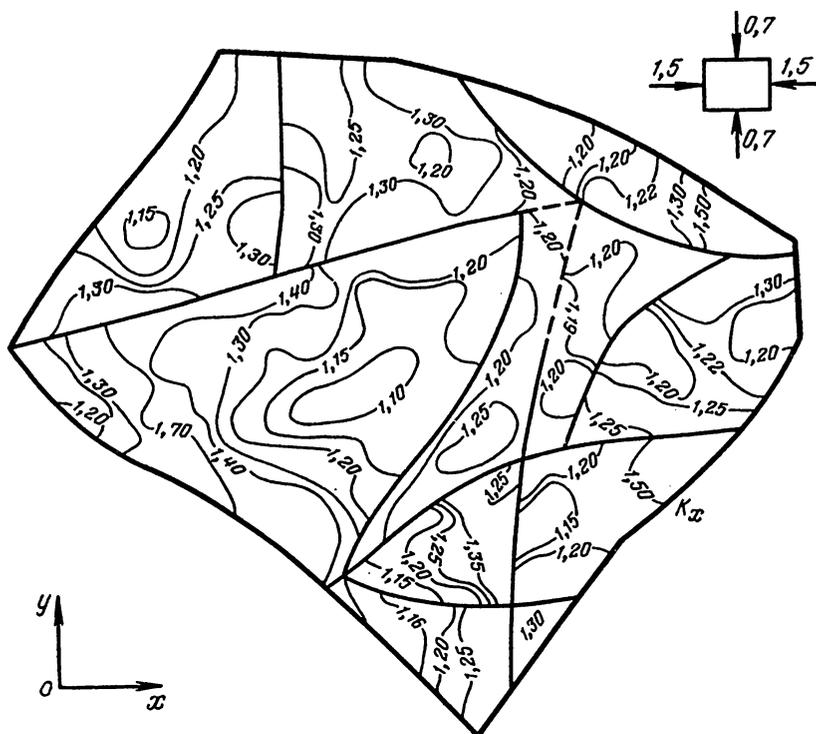


Рис. 7.10. Изолинии проницаемости пород K_x в блочной системе

тензора проницаемости для пород с хаотической трещиноватостью опубликованы ранее в [41].

В качестве исходных данных для оценки проницаемости используются значения напряжений σ_1 и σ_2 , полученные на первом этапе решения задачи, например, (рис. 7.9). На рис. 7.10 приведены изолинии проницаемости K_x выделенной блочной структуры.

Значения даны в долях проницаемости, отвечающей варианту расчета без учета тектонической структуры месторождения. Из анализа результатов расчетов следует, что учет мобильности отдельных элементов тектонической структуры существенно оказывает влияние на картину распределения геофильтрационных характеристик блока. В частности, наблюдается заметное отклонение проницаемости при удалении от зон концентрации напряжений.

Для проведения анализа геомеханического состояния массива пород и установления необходимости тех или иных мероприятий по безопасному и эффективному ведению горных работ на месторожде-

нии необходимо иметь пакет программ по оценке напряженного состояния массива пород около выработок.

При оценке напряженного состояния массива пород около очистных выработок задают геометрию очистных работ, мощность пластов и междупластий, глубину ведения горных работ, а также угол наклона пластов свиты. Это позволяет учитывать при формулировании граничных условий ширину выработанного пространства, глубину ведения очистных работ, угол наклона пластов свиты, вынимаемую мощность пластов и способ управления кровлей.

Плоская задача. Анализ различных вариантов плоской задачи о напряженном состоянии массива горных пород около нескольких очистных выработок важен и полезен, так как позволяет выявить закономерности распределения напряжений в породах и определить значение различных факторов, характеризующих условия отработки свит пластов.

Породы, попавшие в зону полных сдвижений, передают свой вес на почву выработки. Однако кроме пород зоны полных сдвижений, получивших опору на почву выработки, часть своего веса передают на почву и зависшие породы. Поэтому давление пород кровли на почву, задаваемое углами φ , несколько выше, чем то, которое определяется углами полных сдвижений. Углы давления, тесно связанные с углами полных сдвижений, зависят от прочностных свойств подрабатываемых угленосных массивов [41].

Процедуры вычислений напряженного состояния при отработке свиты пластов оформлены в двух вариантах, различающихся областями приложения и временем счета. Первый из них представлен программой SHVARS, основанной на численной реализации метода последовательных приближений. Он требует меньших затрат машинного времени, но имеет меньшую область сходимости по сравнению со вторым вариантом, реализованным в программе SUIT2D, использующей метод граничных интегральных уравнений [15].

Наличие таких двух методов позволяет определить напряженное состояние массива горных пород около выработок при произвольном расположении последних. Для большого числа выработок, расположенных на достаточно удаленных пластах, лучше использовать программу SHVARS, а для сближенных пластов и при небольшом числе выработок – метод интегральных уравнений (программа SUIT2D).

Пространственная задача. Очистная выработка, проведенная в массиве пород, рассматривается как разрез в упругом пространстве, повторяющий в плане форму выработки. Верхнему и нижнему берегам разреза отвечают соответственно кровля и почва выработки. Противоположные берега разреза загружены равными по величине и противоположными по направлению усилиями. Связь между напряжениями

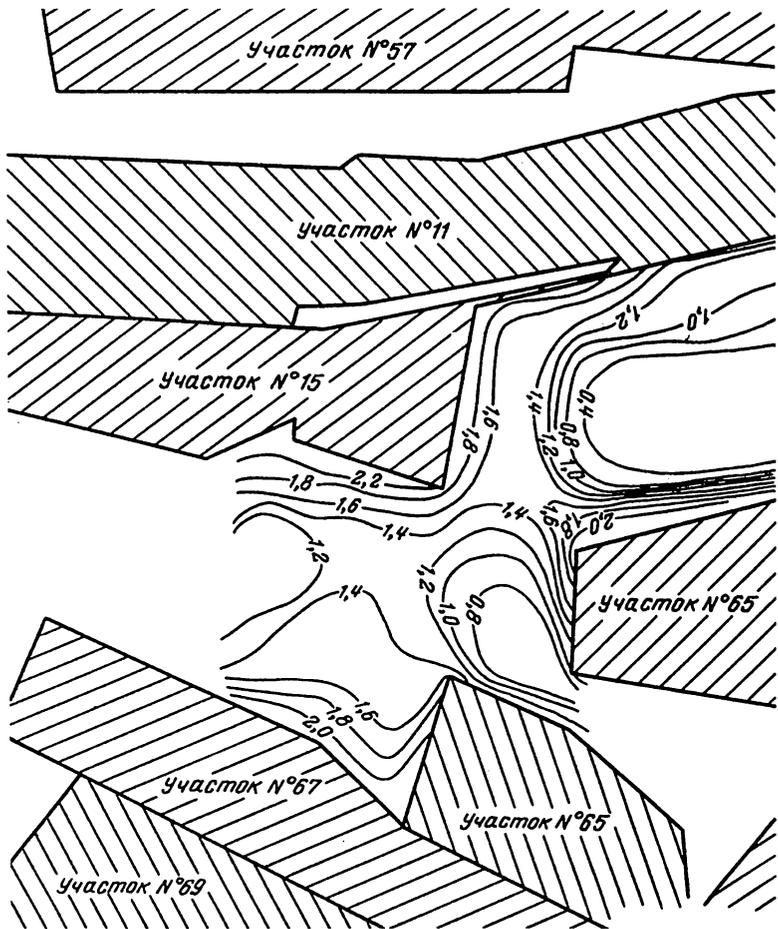


Рис. 7.11. Прогнозная карта напряженного состояния пласта «Коксовый» и разностью смещений берегов разреза дается граничными интегральными уравнениями специального вида. Эти уравнения реализованы в программе SUIT3D [15].

Для проведения расчетов необходимо иметь следующую информацию: геологические данные о залегании пласта, его мощность, угол наклона, глубину отработки, прочностные свойства пласта и вмещающих пород, геометрию выработанного пространства и целиков.

Расчет для типовых схем отработки пластов позволяет установить характер изменения напряженного состояния массива горных пород в зависимости от того или иного параметра горнотехнической ситуации.

Расчеты же для реальных схем отработки свиты пластов дают полную картину влияния всех основных горнотехнических факторов.

На рис. 7.11 приведена прогнозная карта напряженного состояния пласта «Коксовый» (нормальные к напластованию напряжения) в районе отработки лавы № 15. Целики, оставленные на пластах «Десятый», «Андреевский» и «Петровский», оказывают продавливающее действие и создают зоны повышенной концентрации напряжений на пласте «Коксовый». Лава № 15, проведенная по пласту «Петровский», оказывает разгружающее действие на массив пород впереди фронта очистных работ лавы № 15 пласта «Коксовый» (на расстоянии 300 м от забоя $\sigma_y / (\gamma H) < 1$). Таким образом, при проведении лавы № 15 вначале забой попадает в зону повышенного горного давления, где концентрация напряжений колеблется от 1,8 до 1,2 γH , а затем, примерно через 100 м, переходит в зону разгрузки. При прогнозе степени удароопасности вдоль забоя лавы № 15 зафиксировано наличие I–II категорий. Это требует проведения мероприятий по предотвращению горных ударов. В нижней части лавы № 15 (до 35–40 м от конвейерного штрека) отмечалась повышенная удароопасность. Концентрация напряжений здесь составляла $1,8 \div 2 \gamma H$, что соответствует I категории удароопасности.

При текущем прогнозе напряженного состояния по мере развития очистных или подготовительных работ оценка опасного состояния производится по критерию γH_0 [41], где γH_0 – нормальные к напластованию напряжения, действующие на ударо- или выбросоопасный пласт до его отработки; H_0 – минимальная глубина возникновения горных ударов или выбросов на данном шахтопласте.

Возможность расчета напряжений, проницаемости, а при необходимости и влагоемкости пород фактически для любых условий массива горных пород позволяет не только производить оценку его геомеханического состояния, но и осуществлять прогноз изменения этого состояния в результате предполагаемого техногенного воздействия в будущем.

7.6. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НЕДР

Метод геодинамического районирования недр стал использоваться при исследовании напряженно-деформированного состояния удароопасных рудных месторождений с 1978 г., на угольных месторождениях – с 1980 г., нефтяных – с 1989 г. и на линейных объектах – с 1990 г.

С 1991 г. метод начали применять на угольных и нефтяных месторождениях Китая. С 1994 г. – при выборе площадок для АЭС.

В Подмосковье метод геодинамического районирования используется в том числе и для нужд сельского хозяйства.

Имеются патенты по совершенствованию с использованием результатов геодинамического районирования разработки нефтяных месторождений, захоронению вредных, в том числе радиоактивных отходов, осушению месторождений, выбору опасных мест при строительстве особо важных объектов.

Применение метода геодинамического районирования в горном деле и других областях дает качественно новые результаты, которые ранее не были получены другими методами, что позволяет по-новому взглянуть на исследуемый объект и увидеть новые пути решения существующих проблем освоения недр и земной поверхности.

Несмотря на широкое разнообразие объектов, где применялся метод, подход к изучению геодинамического состояния массива и методике существенно не различался и в целом соответствовал приведенной выше схеме.

Остановимся кратко на результатах применения метода геодинамического районирования на различных объектах.

7.6.1. На рудных месторождениях

Для железорудного Таштагольского месторождения в результате геодинамического районирования установлено, что месторождение целиком расположено в крупной тектонически напряженной зоне, сформированной в промежутке между двумя фрагментами подвижного разлома, которому было дано название Северо-Таштагольский (рис. 7.12). Разлом Северо-Таштагольский хорошо фиксируется в рельефе земной поверхности, причем, если его фрагменты геологически выражены по обе стороны от месторождения, то на самом месторождении сквозное тектоническое нарушение вдоль разлома отсутствует.

Можно полагать, что через месторождение, сложенное более прочными породами, разлом не «пророс», но этот процесс идет, и ведение горных работ ускоряет его. В частности, именно на одном из концов «прорастающего» фрагмента зарегистрировано 6-балльное землетрясение (пос. Кочура), вызвавшее аварийную остановку работы рудника. На месторождении отмечались горно-тектонические удары с подвижками пород по сместителям нарушений. Так, в 1982 г. в результате горно-тектонического удара произошло смещение пород с разрывом рельсов по сместителю, ориентированному параллельно Северо-Таштагольскому разлому.

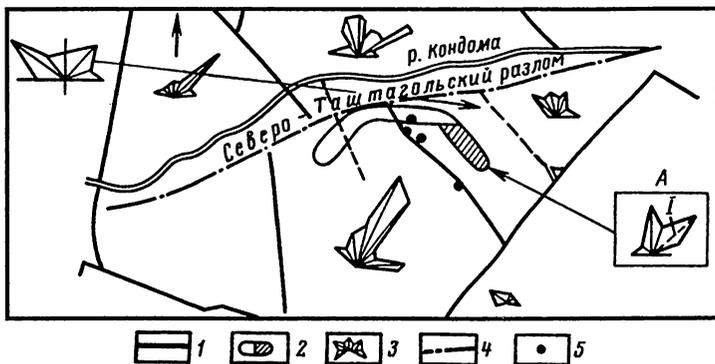


Рис. 7.12. Схема блоково-структурных форм Таштагольского месторождения:

1 – границы подвижных блоков; 2 – рудное тело (заштрихована отработанная часть); 3 – роза трещиноватости, выделенной по аэрофотоснимкам; 4 – формирующийся разлом; 5 – стволы шахт; А – роза трещиноватости, выделенной в зоне провала по аэрофотоснимку; I – направление смещений блоков при горном ударе 25 декабря 1982 г.

Таким образом, результаты геодинамического районирования с выделением блоков I–II рангов позволили обосновать причины существования на руднике высоких напряжений в массиве горных пород и связать это с проявлениями горных ударов.

Более детальные исследования позволили установить, что четыре ствола рудника попадают в зону выявленного при геодинамическом районировании разлома Холодный III ранга (рис. 7.13). Влиянием

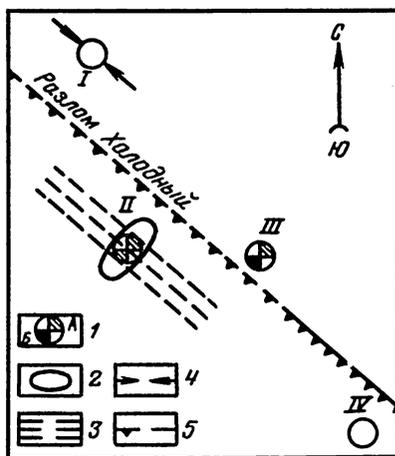


Рис. 7.13. Схема расположения стволов относительно зоны разлома и проявления их деформаций:

I – деформация в стволе (А – трещины; Б – стреляние пород); 2 – рекомендуемая ВостНИГРИ форма ствола; 3 – рассланцевание породы; 4 – ориентировка напряжений; 5 – зона подвижного разлома; I–IV – стволы соответственно «Северный», «Новокапитальный», «Западный» и «Южный»

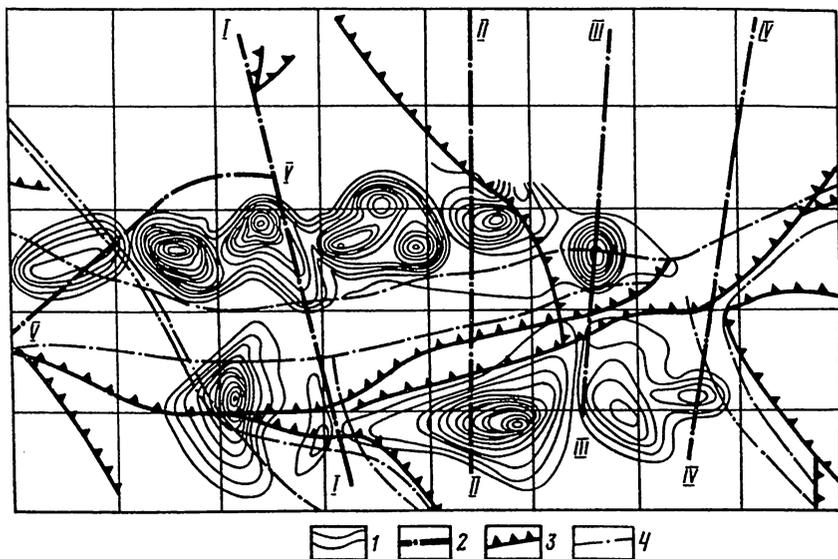


Рис. 7.14. Плотность очагов сейсмической активности в районе шахт № 14 и 15.

1 – изолинии плотности; 2 – подвижные разломы; 3–4 – геологические нарушения в шахте

разлома Холодный было объяснено, почему эти стволы периодически находятся в аварийном состоянии и подвергаются постоянному деформированию. Из-за неудовлетворительного состояния имеющихся стволов на руднике было принято решение о строительстве нового ствола. Однако работы по геодинамическому районированию показали, что и новый ствол расположен в зоне влияния более крупного Северо-Таштагольского разлома, на основании чего были даны рекомендации о переносе площадки под строительство в другое место. Тем не менее, работы по строительству были начаты на ранее выбранном месте, и уже при строительстве многократно отмечались различные явления (горные удары, прорывы воды и др.), что подтвердило наличие выделенного ранее разлома.

Таким образом, исследования по геодинамическому районированию позволили по-новому взглянуть на причину повышенной напряженности массива, на условия и механизм горно-тектонических ударов, причины деформирования капитальных выработок. Дальнейшие исследования на организованном геодинамическом полигоне позволили выявить тектонически напряженные зоны, уточнить ряд теоретических и методических вопросов.

На Северо-Уральском месторождении бокситов работы по геодинамическому районированию проводились с конца 70-х годов. Для месторождения было установлено, что поля наиболее удароопасных шахт № 14 и 15 расположены не в одном, а в нескольких блоках IV ранга, границы которых непосредственно пересечены горными выработками (рис. 7.14). На месторождении был выполнен ряд сопоставительных работ по изучению трещиноватости и нарушенности массива, характера площадного проявления сейсмичности, заложен геодинамический полигон. Эти работы позволили установить следующее.

Часть границ блоков представлена чередованием сместителей крупных нарушений, вскрытых горными выработками. Прежде всего это граница блоков (разлом) *I-I*, которая на поле шахты № 15 представлена сместителем нарушения с амплитудой до 30 м (в западном крыле Восточного сброса), а на поле шахты № 14, в восточном крыле Восточного сброса, – серией сместителей нарушений с амплитудой до 60 м. На поле шахты № 15 указанное нарушение долгое время оставалось наиболее сейсмически активным, по нему неоднократно происходили внезапные подвижки при горно-тектонических ударах. Как показали измерения ориентировки штрихов скольжения на сместителе этого нарушения, в направлениях смещений при горных ударах наблюдается унаследованность от предыдущих тектонических смещений. Это указывает на то, что именно современные тектонические напряжения заставляют «работать» это нарушение, когда горными работами создаются для этого благоприятные условия. Граница блоков (разлом *V-V*) или разлом Крутой Лог также выражены в массиве крупным тектоническим нарушением, обнаруженном геологоразведочными работами. При подходе к разлому *I-I* сместитель разлома *V-V* не выражен как единая поверхность смещения, но он имеет продолжение в северном крыле *I-I* как нарушение с амплитудой 15 м. Это нарушение также отличалось в периоды ведения горных работ высокой сейсмической активностью и подвижками при горно-тектонических ударах. Еще две границы блоков *II-II* и *III-III* не находят прямого тектонического подтверждения как сквозные сместители нарушений или серии таких сместителей. Однако присутствие этих границ в массиве находит отражение в характере более мелкой нарушенности и трещиноватости.

Ориентировка основных систем трещин изменяется при переходе через границы блоков. Это зафиксировано при съемке трещин на двух горизонтах (-275; -320) по полевым штрекам при расположении точек замеров через каждый метр.

Ориентировка осей напряжений, полученных тектонофизическими методами при анализе нескольких сотен мелких нарушений, изменяется при переходе из блока в блок (рис. 7.15).

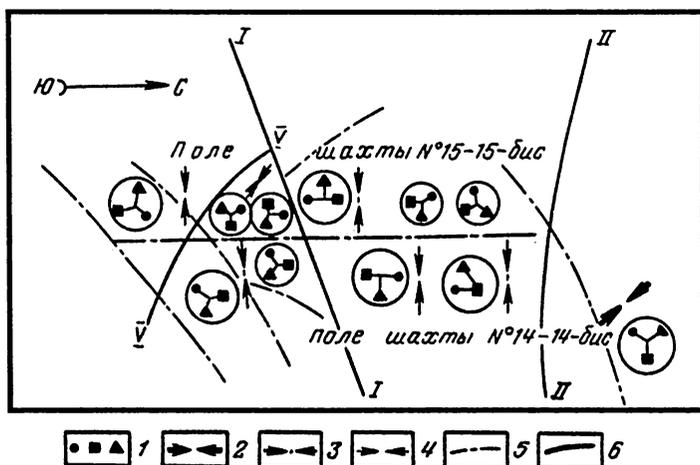


Рис. 7.15. Реконструкция направлений действия главных напряжений на СУБРе:

1 – проекции σ_1 , σ_2 и σ_3 по геологическим данным; 2, 3 и 4 – направления максимальных сжимающих напряжений, определенные соответственно по методам разгрузки, гидроразрыва и сейсмическому методу; 5 – тектонические нарушения; 6 – активные разломы (I, II и др.)

Геометрия максимумов сейсмической активности увязывается с геометрией блоков.

Одновременно для месторождения было отмечено, что сейсмически активными становятся множество различно ориентированных нарушений, не увязывающихся с положением границ блоков. Более поздние исследования на других месторождениях позволили объяснить механизм перехода нарушений в активное состояние.

Действительно, подвижка по нарушению может произойти только тогда, когда касательные напряжения в плоскости сместителя превысят силу трения покоя между крыльями*:

$$\tau_n \geq \tau_{кр} = \sigma_n k,$$

где τ_n – касательные напряжения на сместителе с нормалью n ; $\tau_{кр}$ – критические напряжения, при которых может произойти подвижка по нарушению; σ_n – нормальные напряжения в плоскости сместителя; k – коэффициент трения покоя (для плоских, отполированных до зеркал скольжения сместителей коэффициент трения k оценивается как $\text{tg} 10^\circ - \text{tg} 12^\circ$ (И.А.Воронин и др.)).

* Оценка активности тектонических нарушений. – СПб.: ВНИМИ, 1995.

В работе А.С.Батугина показано, что отношение $\tau_n/\tau_{кр}$ для произвольно ориентированного сместителя не зависит от абсолютных величин главных напряжений, а определяется лишь их соотношениями $\sigma_{max}/\sigma_{min}$ и

$$\mu\sigma = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\sigma_3 - \sigma_1) - 1.$$

Расчеты для теоретических стереограмм показывают, что при $\sigma_{max}/\sigma_{min} = 2,5 \div 3$ отношение $\tau_n/\tau_{кр} > 1$ для большого диапазона ориентировок сместителей. Это означает, что практически для нарушения любой ориентировки создаются условия для развития смещений крыльев нарушения по сместителю. Пока существует дефицит свободного пространства и крыльям нарушения некуда смещаться, процесс деформирования массива современными тектоническими силами локализуется вдоль только некоторых наиболее благоприятно расположенных направлений (активных разломов границ блоков). При ведении горных работ с образованием выработанных пространств возможность для смещений в их направлении возникает и у других нарушений, которые ранее не проявляли активности. Таким образом возникает эффект техногенной сейсмичности на месторождениях с неравнокомпонентным полем напряжений. Для Северо-Уральского бокситового месторождения активными становятся практически все нарушения, для которых выполняется условие $\tau_n/\tau_{кр} > 1$.

Исследования по геодинамическому районированию на месторождении позволили проследить изменение геомеханического состояния

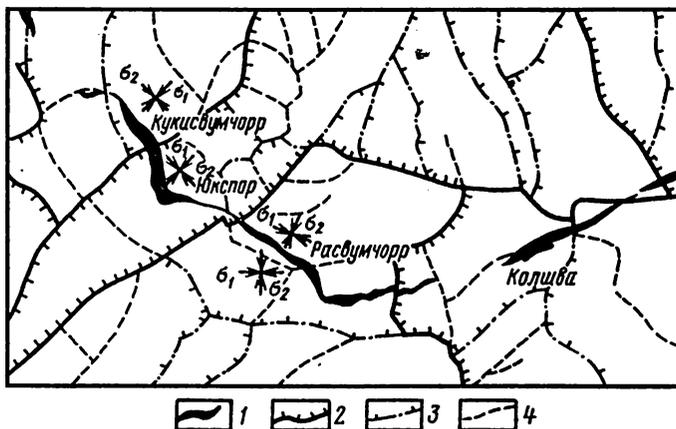


Рис. 7.16. Блочная структура месторождения апатитов (по В.М.Трапичину):

1 – апатитовые руды; 2, 3, 4 – разломы соответственно II, III, IV рангов

массива от блока к блоку, выделить наиболее опасные участки в пределах тектонически напряженных зон IV ранга, разработать часть теоретических и методических положений геодинамического районирования.

Помимо Таштагольского и Северо-Уральского удароопасных месторождений метод геодинамического районирования применялся на рудных месторождениях Норильского ГМК, Южно-Уральском бокситовом руднике, Кольском полуострове (рис. 7.16).

На всех перечисленных объектах получены новые сведения о структурном строении недр, особенностях геомеханического состояния массива, причинах деформирования горно-капитальных выработок и возникновения горно-тектонических ударов.

7.6.2. На угольных месторождениях

На угольных месторождениях метод геодинамического районирования применялся во всех крупных бассейнах страны. Рассмотрим результаты его использования для проектируемой шахты «Анжерская-Южная» (Кузбасс), длительно эксплуатируемой шахты им. Калинина (Донбасс) и одном из месторождений в Китае.

Шахта «Анжерская-Южная» в Кузбассе входит в объединение «Северокузбассуголь». Геологоразведочными работами на шахтном поле выявлены согласные с простираем угольной толщи взбросы. Однако при геодинамическом районировании обнаружена и другая – поперечная система границ блоков, имеющих по геоморфологическим признакам сдвиговую составляющую (рис. 7.17). На основе выявленной блочной структуры и с учетом плана развития горных работ на 2, 5 и 10-летний периоды были получены данные, необходимые для математического моделирования техногенного поля напряжений.

Кроме того, анализ детальной тектоники соседних шахтных полей позволил дать следующую интерпретацию выделенным поперечным границам блоков. Действительно, на шахте «Анжерская», расположенной к северу от поля «Анжерской-Южной», при ведении горных работ встречено пять крупных поперечных нарушений сдвигового типа с амплитудой до 20 м, не зафиксированных геологической разведкой. Все эти нарушения отнесены к опасным по горным ударам.

На шахте «Березовская», расположенной к югу от исследуемого района, геологом Р.Г.Коломиным описаны внезапно встречающиеся зоны сквозной поперечной трещиноватости, к которым на шахте приурочены многочисленные завалы лав. Следовательно, выделяемые на поле шахты «Анжерская-Южная» поперечные границы блоков, по-видимому, выражены в массиве в виде поперечных нарушений типа сдвигов либо зонами сквозной поперечной трещиноватости.

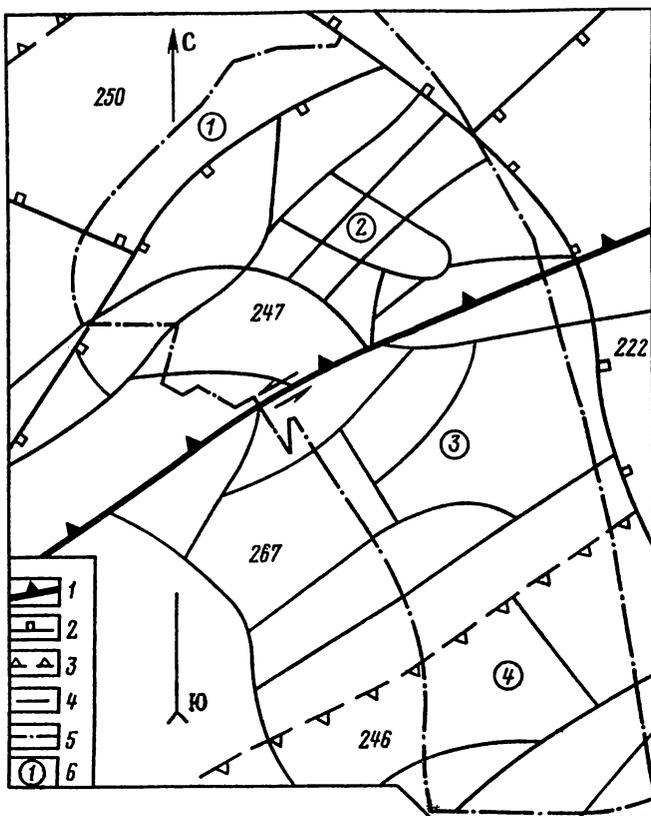


Рис. 7.17. Схема блочного строения шахты «Анжерская-Южная» с разломами II–V рангов:

1, 2, 3 и 4 – разломы соответственно II, III, IV и V рангов; 5 – границы шахтного поля; 6 – номер блока.

Таким образом, применение метода геодинамического районирования для поля шахты «Анжерская-Южная» позволило дополнить структурную схему месторождения и составить прогнозный план в изолиниях напряжений на планируемом к отработке горизонте.

В Донбассе проводились работы на шахтах им. Калинина и им. газеты «Социалистический Донбасс». В результате проведения исследований выяснилось, что шахтные поля пересечены разломами (границами блоков) III, IV и V рангов. Геологическая интерпретация границ блоков показала следующее. Как известно, крупные надвиги района (Французский, Калининский, Мушкетовский и др.) изогнуты в пространстве и представляют собой чередование фрагментов с

разными азимутами и углами падения. Сопоставление геологической схемы со схемой блоков показывает, что многие из крупных надвигов не выражены в рельефе как активные разломы, но, те их фрагменты, которые имеют углы падения более чем 50° , являются частями границ блоков III–V рангов, т.е. активизированы современным полем напряжений.

Геометризация плотности очагов внезапных выбросов, происшедших на шахте, показала, что максимумы плотности приурочены к одному из разломов III ранга, а также к узлам сопряжений границ блоков и пересечений их с геологическими нарушениями. Таким образом, проведенные работы показали, что блочная структура, выявляемая методом геодинамического районирования, оказывает реальное влияние на условия ведения горных работ.

Угольное месторождение Бейпяо в провинции Ляонин является одним из наиболее ударо-, выбросоопасных на северо-востоке Китая. В течение ряда лет на месторождении происходят крупные динамические явления, сопровождаемые подвижками по тектоническим нарушениям, а также сотни более мелких явлений с выбросом угля, породы и газа. Начальная глубина проявлений внезапных выбросов – 130 м. Наиболее сейсмически активным является район сопряжения поля шахты «Тай-ди» с полем шахты «Гуаншань» (рис. 7.18).

В результате проведения в 1991–1993 гг. работ по геодинамическому районированию установлено, что месторождение приурочено к крупному разлому I ранга. Этот разлом, названный впоследствии разлом Бейпяо, (на рисунке заштрихован), выделен А.С. Батугиным впервые и на китайских картах ранее не был показан. Его существование подтверждено сейсмологическими данными и полевыми работами. Непосредственно в районе месторождения разлом Бейпяо кулисообразно смещен так, что возникающая перемычка между смешанными фрагментами представляет собой тектонически напряженную зону I ранга. По-видимому, тектонически напряженная зона захватывает два блока IV ранга (210 и 212), поскольку именно в их пределах происходит основная масса динамических явлений. В современном поле напряжений, параметры которого оценены методами тектонофизики, разлом Бейпяо и параллельные ему границы блоков работают как левые сдвиги, а сопряженные с ними разломы ССВ ориентировки – как правые.

В геологической структуре шахтного поля наиболее отчетливо фиксируются две системы тектонических нарушений: СЗ простирания с правосдвиговой составляющей (по характеру смещения пластов) и ССВ ориентировки с левосдвиговой составляющей. Однако под воздействием современного поля напряжений по геологическим нарушениям стали развиваться реверсивные подвижки в строгом соответствии с

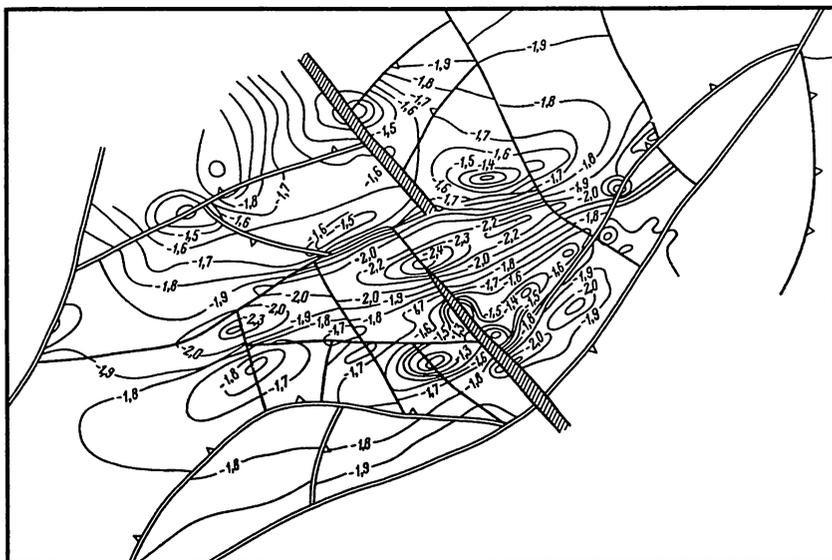


Рис. 7.18. Распределение исходного поля горизонтальных напряжений в долях γH в блочном массиве горных пород шахты «Тай-ди» (Китай)

закономерностями, установленными для границ блоков при геодинамическом районировании. Под воздействием современных напряжений по нарушениям СЗ ориентировки происходят левосдвиговые техногенные подвижки, а по нарушениям ССВ ориентировки – правосдвиговые. Причем активным крылом при таких подвижках, сопровождаемых горно-тектоническими ударами, является то, которому есть куда двигаться, т. е. в сторону выработанного пространства. У другой части нарушений указанной ориентировки наблюдаются рои очагов внезапных выбросов на их окончаниях.

Применение метода геодинамического районирования на этом месторождении позволило по-новому взглянуть на структурную схему шахтных полей, установить причину и определить механизм динамических явлений, создать основу для разработки практических рекомендаций по безопасному ведению горных работ.

7.6.3. На нефтяных месторождениях

Для месторождений углеводородов исследовалось влияние напряженного состояния блочного массива на условия размещения и фильтрации флюидов. В настоящее время такие работы выполнены для ряда месторождений Удмуртии, Татарии, Китая.

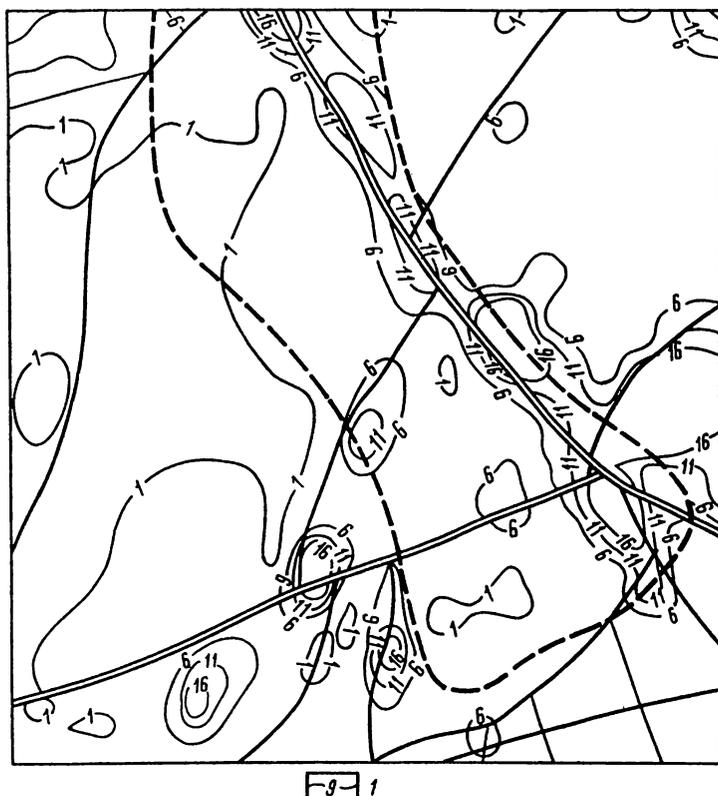


Рис. 7.19. Прогнозная карта проницаемости горных пород в районе Чутырско-Киенгопского нефтяного месторождения:

1 – изолинии проницаемости в условных единицах; пунктиром показан контур нефтяной залежи

Рассмотрим результаты применения метода геодинамического районирования на Чутырско-Киенгопском месторождении в Удмуртии.

Для месторождения была выделена блочная структура, оценено напряженное состояние, проницаемость продуктивного пласта, произведены сопоставительные работы. Исследования показывают, что месторождение приурочено к разлому II ранга, имеющему сдвиговую составляющую. Кроме разлома II ранга месторождение пересекают границы блоков III ранга.

Выполненные во ВНИМИ модельные расчеты показали, что в блочном массиве под влиянием неравнокомпонентного поля напряжений происходят закономерные изменения проницаемости и влагоемкости пород: в тектонически напряженных зонах уменьшение их

величин, а в тектонически разгруженных – увеличение. Для реальных условий Чутырско-Киенгопского месторождения по данным многолетней эксплуатации были составлены карты в изолиниях средне-суточных дебитов и суммарного дебита скважин. Максимумы дебитов скважин (рис. 7.19) тяготеют к тектонически разгруженным зонам, где проницаемость пород наибольшая. В тектонически напряженных зонах, наоборот, наблюдается уменьшение суммарных дебитов скважин из-за снижения в них проницаемости пород.

В результате выполненных работ по геодинамическому районированию месторождения Та-ань (Китай) установлены границы не только крупных блоков, но и мелких, динамическое взаимодействие которых во многом определяет состояние массива пород. При этом определены формирующиеся разломы, выделение которых другими методами затруднено (рис. 7.20).

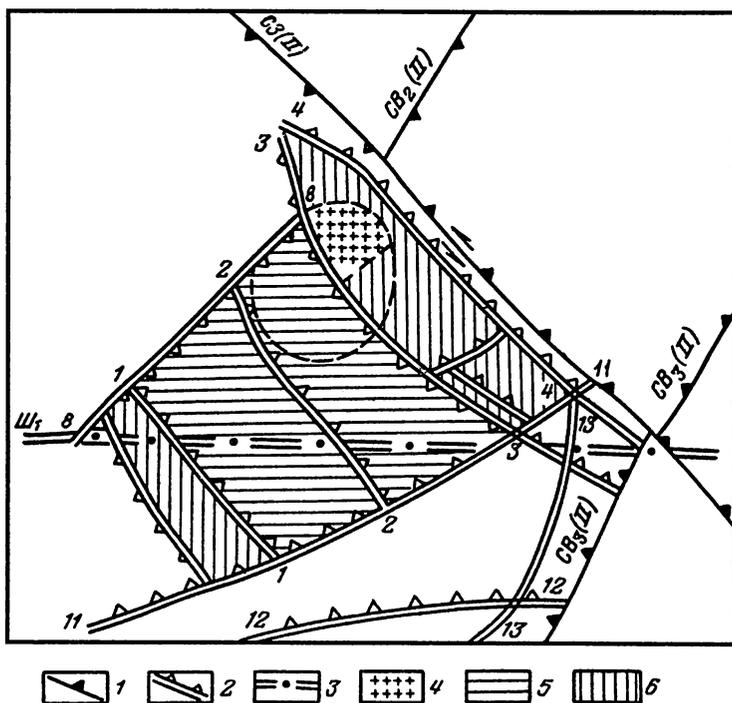


Рис. 7.20. Блочная структура III ранга района месторождения Та-ань (Китай):

1 и 2 – разломы соответственно II и III рангов; 3 – широтный разлом; 4 – зона наибольшей проницаемости; 5 и 6 – поднимающиеся и опускающиеся блоки соответственно

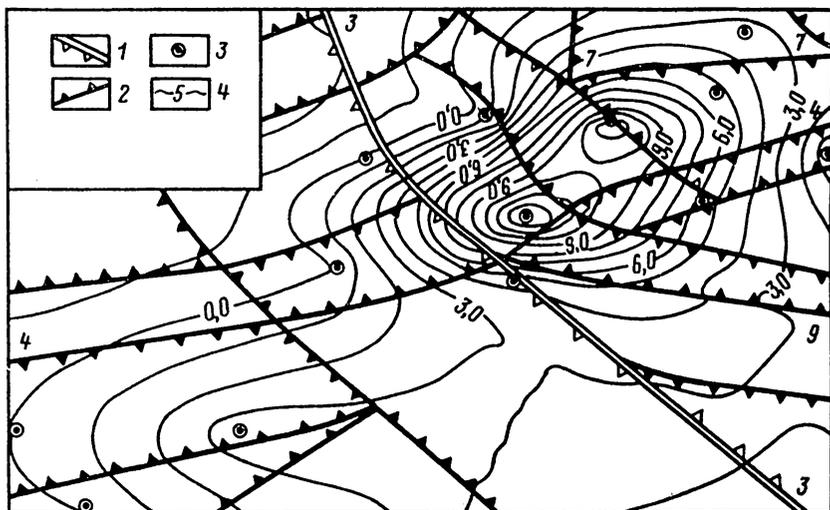


Рис. 7.21. Схема наложения границ блоков на карту изолиний мощности нефтяной залежи:

1 и 2 – разломы соответственно III и IV рангов; 3 – скважины; 4 – изолинии мощности пласта

Месторождение Та-ань расположено в зоне влияния разлома II ранга северо-западного простирания СЗ(II). При этом выявленные четыре разлома III ранга (1-1, 2-2, 3-3, 4-4) соответствуют ориентировке этого разлома, а один разлом (8-8) является продолжением разлома II ранга северо-восточного простирания СВ(II). Наиболее напряженный участок месторождения приходится на зону стыковки разломов II ранга СЗ и СВ направлений СЗ(II) и СВ(II). По мере детализации района геодинамического районирования участки повышенных напряжений в районе месторождения характеризуются более детальной стохастической мозаикой блоков.

На основании результатов районирования проведено предварительное сопоставление выявленных разломов с геологоразведочными данными. При этом ориентировка сейсмоструктур в большинстве случаев совпадает с ориентировкой выявленных разломов. Кроме того, намечается совпадение куполов.

Сопоставление нефтеносности пластов по данным геологоразведочных скважин с результатами геодинамического районирования иллюстрируется рис. 7.21.

Анализ ситуации показывает, что выявленные посредством геодинамического районирования, разломы контролируют запасы нефти как на региональном (III ранг), так и на локальном (IV ранг) уровнях.

Таким образом, применение метода геодинамического районирования на месторождениях углеводородов (нефти и газа) позволяет осуществлять прогноз наиболее проницаемых, влаго- и газоемких зон, планировать с учетом напряженного состояния блочного массива порядок отработки месторождения, места заложения скважин, более обоснованно применять меры по повышению коэффициента нефтеотдачи.

7.6.4. На линейных объектах

На линейных объектах выявлялась связь опасных по аварийности участков с блочным строением массива. Выполненный во ВНИМИ анализ аварий на железных дорогах, нефте- и газопроводах показывает, что аварийные участки расположены по площади неравномерно, наблюдается группирование аварий в определенных местах. Более 60 % аварий происходит в зонах активных разломов.

В 1990 г. в результате геодинамического районирования территории трассы продуктопровода Сургут–Куйбышев выделено десять опасных участков.

В 1991–1992 гг. проводились работы по геодинамическому районированию участков трассы железной дороги Санкт-Петербург–Москва–Кемерово. Как показали исследования, вдоль всей указанной трассы наблюдается около 20 опасных участков, один из которых располагается и вблизи ст. Бологое, где произошла авария пассажирского поезда. По заданию РАО «Газпром» ведутся работы по геодинамическому районированию территории вдоль трассы проектируемого газопровода Ямал–Западная Европа.

7.6.5. При анализе условий и механизма проявлений землетрясений

Работы по геодинамическому районированию территории Кавказа и непосредственно района проявления Спитакского землетрясения проводились с конца декабря 1988 г. до середины февраля 1989 г.

Карта блоков I ранга (рис. 7.22) охватывает территорию от Каспийского моря на востоке до Черноморского побережья на западе и от озера Резайе на юге до северного склона Большого Кавказа на севере. Среди разделяющих блоки разломов устанавливаются разломы кавказского и транскавказского направлений. При этом Большой Кавказ поделен на более мелкие блоки, вытянутые вдоль основного хребта.

На карте блоков I ранга видно, что землетрясение произошло в пределах блока А в результате действия горизонтального сжатия в близком к меридиональному направлении.

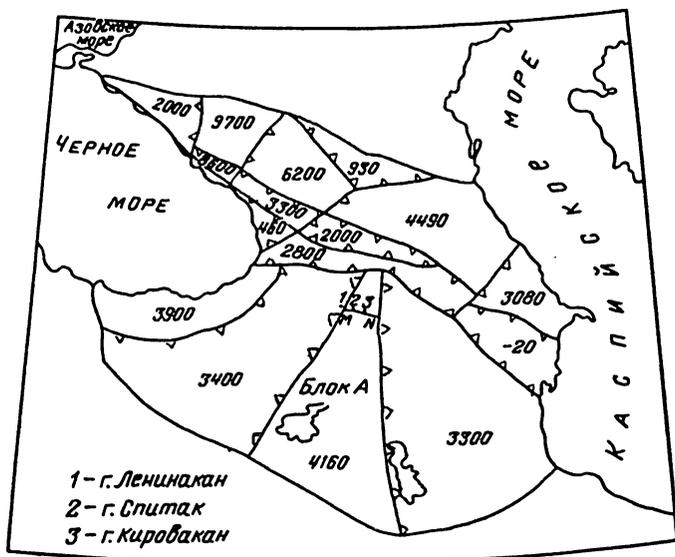


Рис. 7.22. Структурная карта блоков I ранга территории Кавказа.

Простирание линии разрушения земной коры совпадает с направлением развивающегося разлома, проходящего севернее озера Севан (рис. 7.23)

Под воздействием меридионального сжатия в блоке А произошло разрушение по линии MN (см. рис. 7.22) и поднятие северного борта с максимальной амплитудой у земной поверхности до 2 м (такова же предположительно величина перемещения и в горизонтальной плоскости). Длина зафиксированной земной поверхности трещины около 30 м. Схема проявления землетрясения, по-видимому, соответствует схеме, приведенной на рис. 4.8.

Спитакское землетрясение может рассматриваться как начальная стадия образования очередной зоны субдукции или как одно из разрушений, на базе которых возникает затем генеральное разрушение.

Большой Кавказ выполняет роль подпорной стенки по отношению к Малому Кавказу, расположенному на 1000 м ниже. Не исключено, что здесь имеет место зона субдукции: Малый Кавказ поддвигается под Большой Кавказ. Во-первых, раздробленность территории Большого Кавказа на блоки, в три-четыре раза меньшие, чем блоки Малого Кавказа, вызвана, по-видимому, разрушающим действием поддвигающихся блоков Малого Кавказа. Во-вторых, зафиксировано поднятие Большого Кавказа со скоростью 2–12 мм/год, особенно в районе Главного хребта, и опускание территории Малого Кавказа со скоростью

2–4 мм/год и более (Ереван до 2 мм/год, Ленинакан, расположенный севернее Еревана, – более 4 мм/год). Если предположить, что в этом случае имеет место субдукция, то Тбилиси находится ниже границы субдукции и расположен на породах, срезаемых с подползающей плиты Малого Кавказа. Об этом свидетельствует, в частности, поднятие города со скоростью до 2 мм/год.

Если верно то, что совершается поддвижение Малого Кавказа под Большой, то возможно и существование каскада разрушений типа взбрососдвига. В этом случае и при Спитакском землетрясении разрушение блока А (см. рис. 7.20) можно отнести также к виду, изображенному на рис. 4.8.

Предположение о зоне субдукции в районе Кавказа подтверждает представления В.Г.Трифонова, А.С.Караханяна и А.И.Кожурина о том, что разрыв на земной поверхности при Спитакском землетрясении протяженностью 37 км находится в зоне влияния Памбак–Севанского разлома северо-западного направления, расположенного севернее Спитака, и является одним из результатов проявления общей тенденции в последние десятки тысяч лет по всем крупным разломам

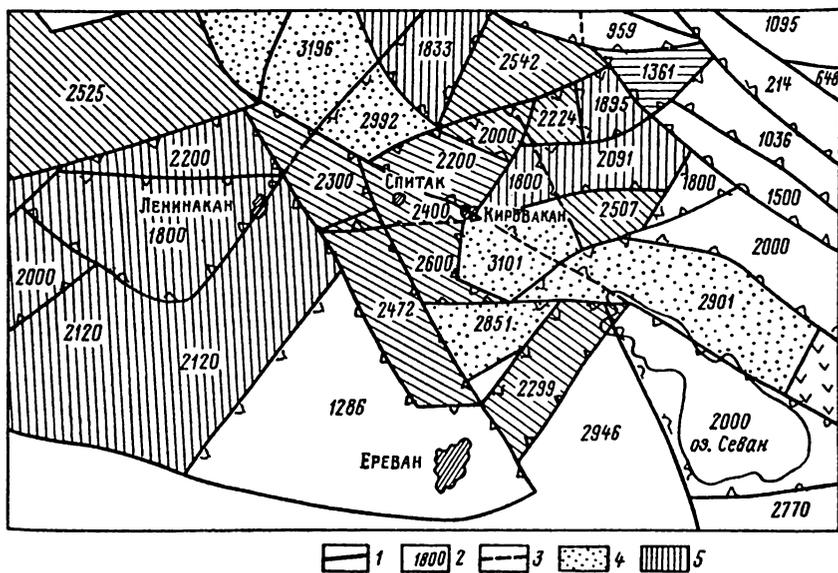


Рис. 7.23. Карта геодинамического районирования территории Спитакского землетрясения:

1 – разломы II ранга; 2 – высота блока; 3 – тектонически напряженная зона на продолжении разлома, проходящего севернее озера Севан; 4 и 5 – соответственно приподнятые и опущенные блоки

Закавказья и Ближнего Востока: северная и южная части Кавказа сближаются и территория укорачивается в меридиональном направлении. По мнению авторов, такое поведение земной коры в этом районе достаточно убедительно подтверждает наличие зоны субдукции.

7.6.6. При экспертизе выбора места заложения АЭС

По заданию Госатомнадзора в 1994 г. И.М.Батугиной было выполнено геодинамическое районирование территории в районе одной из проектируемых АЭС с целью оценки геодинамической устойчивости, выбранных для строительства площадок. Как следует из рис. 7.24, площадка Южная находится непосредственно в зоне разлома II ранга, и поэтому не рекомендуется для размещения АЭС. Размещать АЭС следует на площадке Северной, так как она располагается в устойчивой зоне. В данном случае подтвердилось заключение изыскательской организации, выполнявшей работы в течение нескольких лет. На проведение геодинамического районирования потребовалось лишь 4,5 мес.



Рис. 7.24. Схема выбора площадки для строительства АЭС:

1 и 2 – разломы II и III рангов соответственно

7.6.7. При выделении тектонически напряженных зон

Положение разломов на местности фиксируется не сплошной линией, а отдельными ее фрагментами (например, сопряженными участками рельефа, уступами), которые находятся на значительном расстоянии друг от друга, но намного сближаются на топокартах и

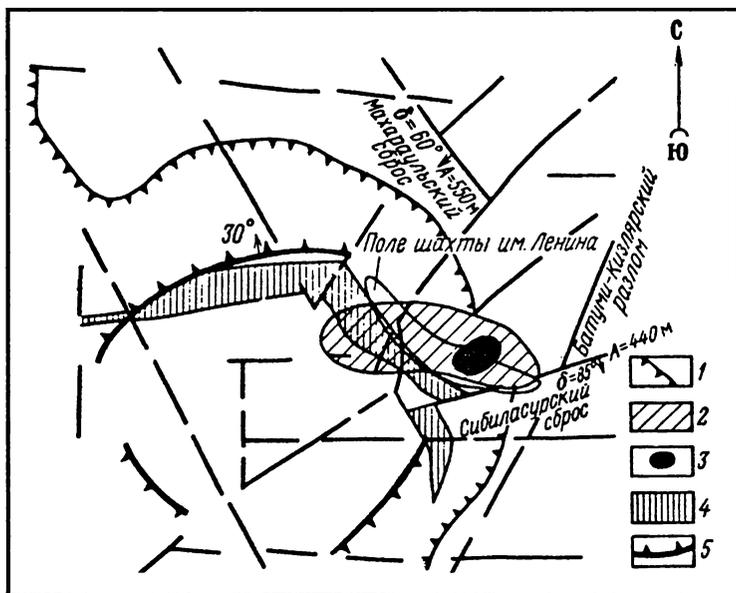


Рис. 7.25. Схема блоково-структурных форм Ткибули-Шаорского месторождения:

1 – карниз Накеряльского хрета; 2 – эпицентральная область мелкофокусных землетрясений ($H = 5$ км); 3 – область проявления горных ударов; 4 – угольный пласт; 5 – фрагменты кольцевого подвижного разлома

аэрофотоснимках и даже сливаются, образуя сплошную линию разлома, при большом уменьшении масштаба. Участок разлома, расположенный между этими индикаторами, может не отличаться видимой нарушенностью шахтного поля, если оно окажется в этом районе. Разлом здесь только формируется. Однако зона разлома на этом участке будет наиболее неблагоприятной с точки зрения ведения горных работ. Примером может служить рудник «Таштагол», где все действующие стволы оказались в зоне подвижного разлома типа сброса-сдвига (см. рис. 7.12), в результате чего они постоянно подвергаются деформации.

При районировании Таштагольского месторождения оказалось, что разрабатываемая рудная залежь примыкает на севере к Северо-Таштагольскому разлому, зону которого наследуют спрямленные элементы р. Кондома. На этом отрезке такой разлом не выявлен (см. рис. 7.12, пунктирная линия), геологоразведочным бурением и картированием выработок не зафиксирован. Данный участок разлома представляет собой ослабленную зону, наличие которой подтверждено мелкой тушиноватостью в рельефе и на глубине.

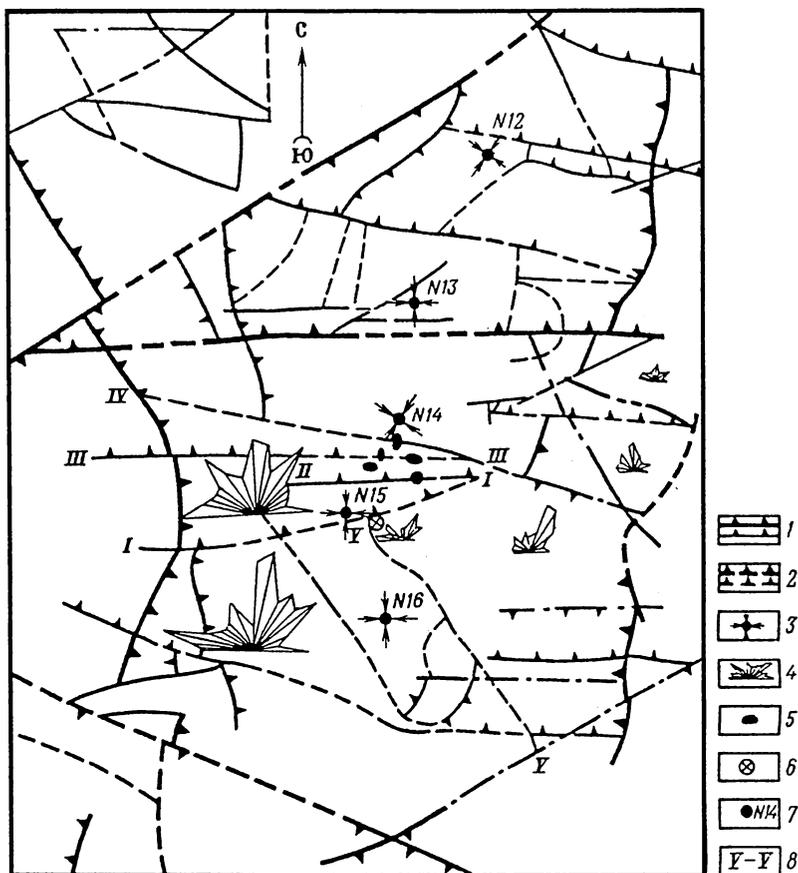


Рис. 7.26. Схема геодинамического районирования СУБРа:

1 – сформировавшиеся разломы III и IV рангов; 2 – формирующиеся разломы III и IV рангов; 3 – ориентировка напряжений по методу разгрузки; 4 – роза трещиноватости, выявленной по аэрофотоснимкам; 5 – участки концентрации напряжений по регистрации сейсмических импульсов; 6 – концентрация горных ударов; 7 – номера шахт; 8 – номера разломов

Таким образом, район разрабатываемый рудной залежи прилегает к разлому глубинного заложения, который на данном участке только формируется, создавая зону повышенных напряжений в массиве. Это, видимо, является одной из причин повышенной удароопасности Таштагольского месторождения.

Аналогичная ситуация наблюдается на Ткибули-Шаорском угольном месторождении. Здесь наиболее удароопасные шахты распо-

ложены между фрагментами формирующегося кольцевого разлома. Эпицентральная область мелкофокусных землетрясений, выделенная на (рис. 7.25) штриховкой, как бы формирует недостающее звено кольцевого разлома, наследуя его ориентировку. Область горно-тектонических ударов приурочена также к участкам разрушающегося массива вдоль диагональных нарушений.

В районе месторождения Красная Шапочка (СУБР) наиболее опасными являются поля шахт 14-14 и 15-15. Районирование этого месторождения на тектонически подвижные блоки показало, что поля этих шахт пересекают четыре субширотных разлома IV ранга: 1-1, 1-2, 3-3, 3-4, 5-5 (рис. 7.26), из которых разломы 3-4 и 3-3 на этих участках являются полностью «прорастающими», а разломы 1-2 и 1-1 – частично. Анализ удароопасной ситуации по данным сейсмостанции «Североуральск» показал, что очаги этих явлений группируются или непосредственно у зон разломов или в зоне их влияния. Горные работы как бы активизируют естественное разрушение массива.

Исследование причин дискретного проявления разломов в рельефе заставило обратиться к механизму возникновения тектонически напряженных зон, к поиску объяснения этого явления и обобщению имеющихся исследований. Результаты обобщения исследований работ М.В.Гзовского, С.А.Федотова, А.А.Никонова, Д.Райса, В.А.Букринского, А.В.Михайловой и других исследователей по фрагментарному механизму образования разломов, выявляемых по геологическим признакам, позволили установить, что этот механизм присущ и разломам, выявляемым по рельефу земной поверхности [4]. Это легло в основу разработанного авторами метода геодинамического районирования недр и земной поверхности*.

Таким образом, тектонически напряженные зоны возникают в блочном массиве горных пород как в процессе образования разломов, тектонических нарушений (в этом случае они приурочены к местам не проявившихся участков разломов, нарушений), так и при деформировании блочного массива посредством перемещения по неровным поверхностям, разделяющим блоки (см. рис. 3.4), в том числе при деформировании блочного массива под влиянием горных работ. Позднее было установлено, что тектонически напряженные зоны могут быть обусловлены наличием в массиве горных пород жестких включений, например, линз песчаника. При этом размеры таких зон могут изменяться от многих километров до десятков метров.

* Профилактика горных ударов с учетом геодинамики месторождений. Методические указания. – Л., ВНИМИ, 1980, 16 с. / Петухов И.М., Батугина И.М. и др.

При движении очистного забоя в сторону уступной части имеет место более сильное наложение тектонически напряженной зоны от влияния включения и зоны опорного давления впереди очистного забоя.

Наблюдения показывают, что проявление тектонически напряженных зон часто связано с изменением направления простирания (или падения) сместителя нарушения. Причем, чем на больший угол отклоняется плоскость сместителя, тем сильнее влияние тектонических напряжений.

Например, крупное тектоническое нарушение Ж–Л₁ в районе лавы № 513 на шахте «Воркутинская» резко изменило направление простирания. Оно огибает линзу песчаника с максимальной мощностью 20 м и повторяет далее по конфигурации изопахиту 14 м. В направлении первоначального простирания сместителя прослеживается серия малоамплитудных нарушений, большинство которых фиксируется по разрыву кровли. Зона повышенной напряженности установлена на протяжении 500 м поддвига лавы. Непосредственно в зоне продолжения нарушения произошел горный удар.

Изменение напряженного состояния угольных пластов вдоль сместителей связано с перераспределением поля напряжений при образовании и развитии разрыва. Об этом свидетельствует и тот факт, что наличие тектонически напряженных зон фиксируется при проведении подготовительных выработок вне зон влияния очистных работ. Напряженное состояние массива неоднородно даже в пределах одного нарушения и может значительно изменяться по простиранию и глубине. При этом сохраняется приуроченность признаков опасных и неопасных тектонических нарушений к напряженным и разгруженным участкам одного и того же разрыва.

7.6.8. Выполнение геодинамического районирования недр на территории крупных регионов земной коры

Как отмечалось выше, в основе геодинамического районирования заложен принцип «от общего к частному». В идеале это означает, что работы по геодинамическому районированию должны выполняться, начиная с составления карты-схемы всей территории земной коры, затем – карт литосферных плит, карт мегаблоков и только потом – осуществлять геодинамическое районирование с выделением блоков I, II и других рангов.

Учитывая, что контуры литосферных плит к настоящему времени в большинстве случаев установлены, геодинамическое районирование на первом этапе можно считать законченным. Поэтому главной задачей здесь является определение силового взаимодействия плит (см. п. 4.4).

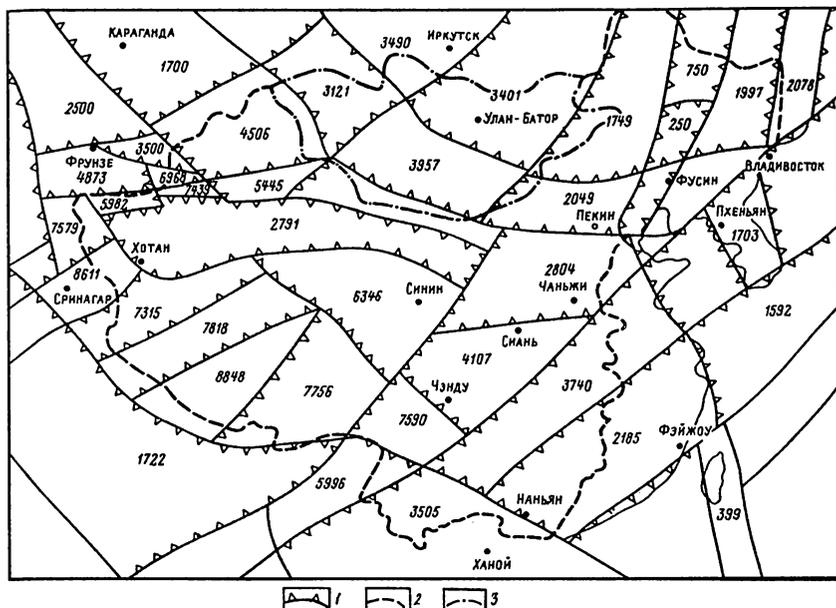


Рис. 7.28. Карта-схема (макет) к геодинамическому районированию территории Китая и прилегающих к нему территорий других государств: 1 – разломы земной коры; 2 и 3 – границы соответственно Китая и Монголии

Если это так, то на ближайшее время должна ставиться задача выполнения работ по геодинамическому районированию самих литосферных плит.

В этом плане под руководством авторов ведутся работы по созданию карт-схем для Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит с выделением внутри них крупных мегаблоков, как основных структур, подчиненных общему напряженно-деформированному состоянию соответствующих литосферных плит.

Представляется, что такой общий подход к работам может уточнить ранее полученные данные для многих мелких регионов, более определенно привязать эти регионы к общей блочной структуре соответствующей литосферной плиты.

Не считая возможным привести в данной книге все разработанные к настоящему времени карты-схемы, в том числе по Евразийской плите и территории России, на рис. 7.28 для иллюстрации характера этих материалов приведена карта-схема, разработанная применительно к территории Китая и некоторых прилегающих к нему территорий.

Карта-схема разработана авторами с участием А.С.Батугина и С.И.Петухова и передана Фусинскому горному институту в лице проф. Фань Суэли для использования при проведении дальнейших работ по геодинамическому районированию Китая. Авторы воздерживаются от комментариев по содержанию приведенной карты-схемы впредь до ее уточнения при дальнейших работах по геодинамическому районированию этой территории.

Карты-схемы (макеты) геодинамического районирования для всех территорий мира, по мнению авторов, должны разрабатываться из единого центра, в то время как само геодинамическое районирование территорий зарубежных стран может выполняться своими национальными специалистами при соответствующей консультативной помощи российских специалистов.

Выполнение геодинамического районирования по принципу «от общего к частному» на всей территории земной коры, включая регионы, занятые океанами, позволит решать многие крупные задачи, связанные с техногенной деятельностью человека, с максимально возможным соблюдением экологической и геодинамической безопасности, с одной стороны, и с достижением наиболее производительной и экономически выгодной деятельностью при освоении недр и земной поверхности, – с другой.

Одновременно, используя эту общую основу, следует продолжать геодинамическое районирование и решение практических вопросов освоения недр и земной поверхности применительно к отдельным регионам. На территории Московской области, начиная с 1996 г., такого рода работы ведутся под патронажем Администрации области (А.С.Тяжлов, Н.В.Гаранькин) лабораторией геодинамики недр МГГУ под руководством проф., д-ра техн. наук И.М.Батугиной и Н.В.Гаранькина. К настоящему времени заканчивается составление карт геодинамического районирования всей территории в масштабах 1:200 000 и 1:50 000, разрабатывается «Руководство» по их использованию для решения всех вопросов освоения недр и земной поверхности в регионе с максимально возможным обеспечением экологической и геодинамической безопасности. Авторы надеются, что такой комплексный подход может оказаться наиболее эффективным и экономически оправданными для других регионов России.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ДНА ОКЕАНА

8.1. ОСБЕННОСТИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТИХОМУ ОКЕАНУ [44]*

Геодинамическое районирование является одним из важнейших направлений исследования океанического дна и его ресурсов. Именно выделение блочной структуры океана, выявление активных разломов, установление условий и характера динамического взаимодействия элементов блочной структуры позволяет сделать обобщения, полезные для поиска и освоения полезных ископаемых, часто приуроченных как к зонам отдельных разломов, так и к местам их пересечения. Кроме того, это позволит проводить районирование флоры и фауны в океане, а также решать многие другие вопросы, например, прокладка трубопроводов по океаническому дну.

Порядок геодинамического районирования океанического дна остается таким же, как и при районировании суши [4, 10, 42], а именно: выявление блочной структуры по принципу от общего к частному; оценка динамического взаимодействия блоков; оценка напряженного состояния блочной структуры.

Целью геодинамического районирования океанического дна является выявление мегаблоков I–III рангов и блоков I ранга.

Выявление разломов II, III и т. д. рангов, как это обычно принято для суши, на территории океанического дна в большинстве случаев (за исключением островов и шельфа) не представляется возможным осуществить ввиду того, что точность составления карт рельефа дна океана не достаточно высокая.

* Составлено с участием С.И.Петухова и В.С.Сидорова

Формы рельефа океанического дна, используемые при геодинамическом районировании, приведены в табл. 8.1.

Необходимо отметить, что в современном рельефе дна прослеживаются все крупные структуры фундамента, для которого характерно блоковое строение. Наиболее отчетливо это проявляется в районе срединно-океанских хребтов (СОХ) и в зонах абиссальных холмов, где осадочный чехол невелик. Большинство разломов, которые хорошо прослеживаются в рельефе абиссальных холмов, уже почти скрыты осадочным чехлом в зонах абиссальных равнин, тогда как в рельефе

Таблица 8.1

Формы рельефа морского дна

Формы рельефа	Характеристика форм рельефа
Отрицательные формы рельефа	
Абиссальная долина	Линейно-вытянутая крутосклонная, плоскодонная депрессия
Котловина	Депрессия океанического дна, имеющая изометрические очертания
Пучина	Наиболее глубокая часть какой-либо депрессии
Глубоководная долина	Вытянутая ложбина
Глубоководная терраса	Террасовидная ступень
Глубоководный желоб	Вытянутая глубоководная и узкая депрессия на дне океана
Впадина	Удлиненная, но относительно широкая депрессия
Подводный уступ	Вытянутый крутой склон
Зоны разломов	Гряды и узкие желобообразные впадины, перпендикулярные к СОХ
Положительные формы рельефа	
Срединно-океанские хребты (СОХ)	Система гряд и поднятий, приуроченная к осям разрастания океанического дна
Плато	Обширная возвышенность
Поднятие	Вытянутая широкая возвышенность с пологими склонами
Хребет	Вытянутое поднятие с крутыми склонами
Подводная гора	Изолированное поднятие с высотой не менее 900 м
Подводный холм	Изолированное поднятие с высотой менее 900 м
Гайот	Плосковершинная подводная гора
Порог	Подводный хребет, разделяющий два частично замкнутых бассейна

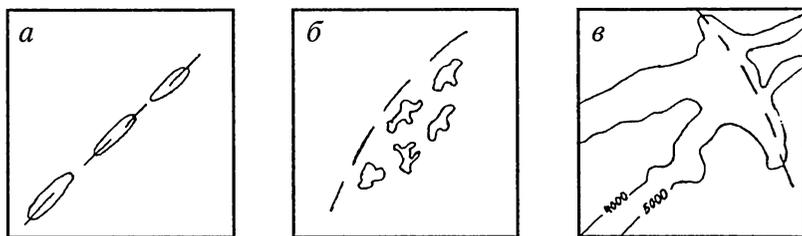


Рис. 8.1. Выделение разломов по рельефу дна океана (в плане):
а – по локальным депрессиям; *б* – по коралловым островам; *в* – по конфигурации изобат

фундамента они прослеживаются до континентальных окраин и переходных зон.

Анализ рельефа показывает, что наиболее устойчивыми структурами являются океанические плиты (талассоплены), которые испытывают преимущественно нисходящие движения.

При проведении геодинамического районирования океанического дна берутся все высотные отметки выровненных поверхностей, в том числе и наиболее глубоких участков.

Для выявления мегаблоков I–III и блоков I рангов используются следующие дешифровочные признаки (элементы рельефа) (рис. 8.1 и 8.2): глубоководные желоба, участки линейно вытянутых изобат,

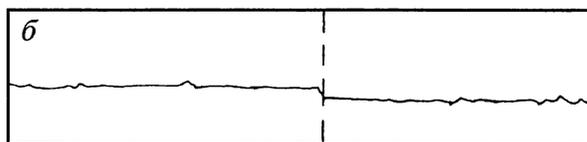
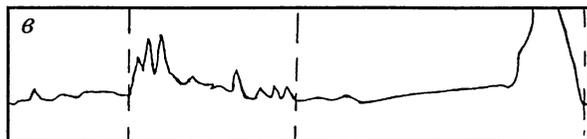


Рис. 8.2. Выделение разломов по рельефу дна океана (в профиле):

а – по глубоководному желобу; *б* – по подводному уступу; *в* – по цепочке вулканических гор



характеризующие уступы, цепочки локальных погружений, линейные участки коралловых островов, подножия хребтов, конфигурация изобат.

Выявление мегаблоков и блоков проводится по методике, применяемой при геодинамическом районировании суши.

После выявления мегаблоков I–III и блоков I рангов выполняются сопоставительные работы. При сопоставительных работах используются: геофизические материалы, геологические карты, тектонические карты, карты донных осадков, данные, полученные при бурении скважин. В результате сопоставительных работ уточняются границы блочной структуры.

Выявить *динамическое взаимодействие блоков* – это значит, во-первых, установить характер их подвижности (поднятие, опускание, скручивание); во-вторых, определить, каким из преобладающих условий нагружения (сжатия, растяжения, сдвига или их комбинаций) обусловлено это движение.

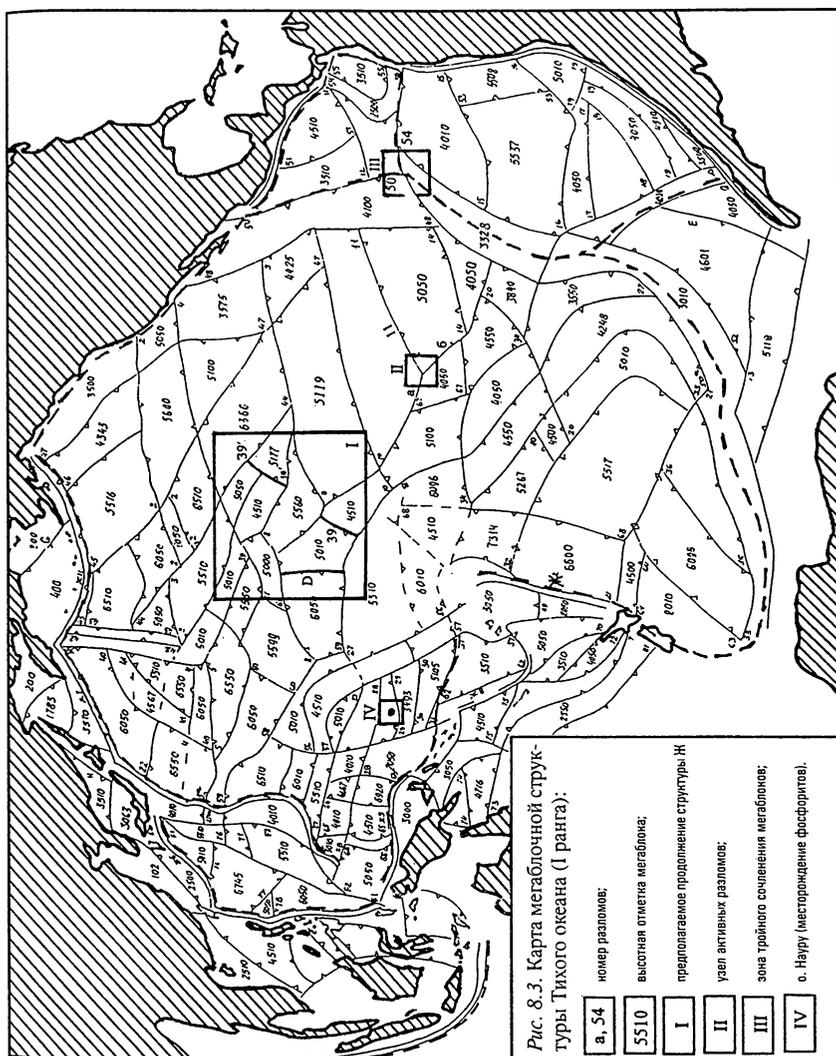
В пределах океанического дна динамика взаимодействия блоков выявляется: по картам геодинамического районирования путем анализа рельефообразующих разломов, которые позволяют установить характер их подвижности, а также по формам блоков; по картам плотности распространения коралловых и вулканических островов, которые несут информацию о геодинамической активности участков океанического дна в различное геологическое время; по картам сейсмичности океанического дна.

Для уточнения выводов привлекаются и другие вспомогательные материалы: сеймотектонические карты; геофизические данные; результаты математического моделирования напряженного состояния дна.

На рис. 8.3 приведены результаты выделения мегаблоков I ранга дна Тихого океана, выполненные по карте рельефа в масштабе 1:40 000 000.

Карта геодинамического районирования океанического дна строилась в двух вариантах. В первом варианте поле высот определялось по возвышенным участкам, при этом не учитывались отметки днищ впадин. Для второго варианта карта строилась с участием поля отметок днищ впадин. При наложении полученных карт оказалось, что многие структуры совпали. Характерно, что карта, построенная с учетом поля отметок днищ впадин, имеет блоки более правильной геометрической конфигурации и более выдержанную протяженность рельефообразующих разломов. Поэтому за основу принимается карта, построенная с учетом гипсометрического поля отметок впадин.

Достоверность построения карты геодинамического районирования оценивалась по специально построенным вспомогательным картам плотности распространения возвышенностей и впадин. Анализ показал



совпадение выделенных разломов с инвариантными линиями плотности размещения возвышенностей и впадин, что свидетельствует о достоверности выбранных дешифровочных признаков и проведения границ блоков.

С целью оценки динамического взаимодействия блоков проводились также сопоставительные работы с картами плотности размещения подводных вулканов и островов. При этом выявлено совпадение

границ блоков с инвариантными линиями плотности размещения вулканов и вулканических островов, а также выявлены активные разломы, например, узел разломов *a, б, II* (рис. 8.3, объект II).

Закономерности динамического взаимодействия блочной структуры выявлялись также по картам сейсмической активности дна океана. В результате геометризации очагов сейсмоактивности и сопоставлений с выделенными разломами были выявлены участки, где происходит образование новых структур, например, узел разломов *50, 54, 50a* (рис. 8.3, объект III). Этот узел разломов свидетельствует об образовании структур тройного сочленения мегаблоков. Участок тектонически напряженной зоны, образовавшейся при формировании разлома, находящегося на продолжении желоба J_2 , маркируется разломами *D, 39* и *39'* (рис. 8.3, объект I).

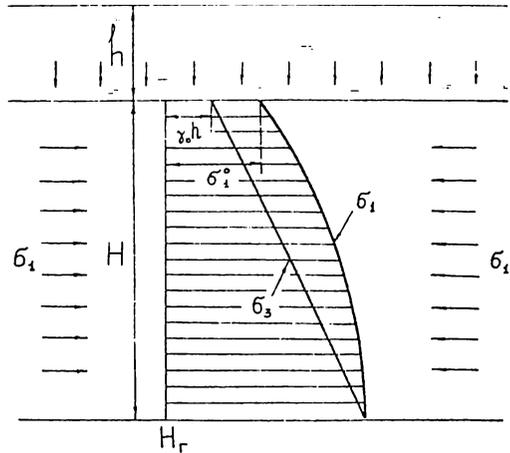
При промышленном освоении ресурсов океана первостепенным, кроме материкового шельфа, являются работы на океанических островах и их шельфах. Поэтому при геодинамическом районировании океанических островов следует учитывать, что основная их часть находится под водой. Исходя из принципа «от общего к частному», вначале проводится геодинамическое районирование участка океанического дна, на котором располагается остров, а затем непосредственно самого острова. Таким образом, при выделении мегаблока, в котором находится остров, применяется методика геодинамического районирования дна, а при выделении блоков более низкого ранга непосредственно на территории острова – методика, применяемая на суше.

При решении вопросов рационального использования минеральных ресурсов океана, особенно при разработке глубоких месторождений, необходимо знать, хотя бы ориентировочно, картину распределения напряжений в горном массиве.

Некоторое представление о напряженном состоянии горного массива ниже океанического дна можно получить, если воспользоваться следующим подходом.

При оценке напряжений на участках земной коры, испытывающих сжатие или сдвиг и прилегающих к океаническому дну, может быть использован подход, основанный на концепции о предельно-напряженном состоянии массива горных пород в этих районах. Поскольку на этих участках действует нормальная пригрузка от веса водной толщи, то следует еще в большей степени ожидать, что максимальную составляющую напряжений в массиве горных пород σ_1 образует активная сила, действующая в горизонтальной плоскости. Действие этих напряжений уравнивается за счет влияния веса горных пород до земной поверхности и веса водной толщи. Действующие в вертикальном направлении напряжения $\sigma_3 = \gamma_h h + \gamma h$, где γ – средняя

Рис. 8.4. Схема распределения напряжений в земной коре (на участке предельно напряженного состояния, расположенного под океаном)



плотность горных пород; H – расстояние от рассматриваемой точки горного массива до океанического дна (рис. 8.4.). Промежуточное напряжение σ_2 , действующее в горизонтальной плоскости, будет определяться как боковой отпор от напряжений σ_1 и σ_3 : $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$.

Принятая для расчета модель горного массива приводится на рис. 8.4.

Вблизи поверхности дна океана значение принимается равным

$$\sigma_1 = \sigma_0 + [(1 + \sin\rho)/(1 - \sin\rho)]\gamma_h h, \quad (8.1)$$

где σ_0 – предел прочности массива горных пород на одноосное сжатие; ρ – угол внутреннего трения пород, для практических расчетов можно принимать $\rho = 30^\circ$; γ_h – плотность воды; h – величина водной толщи.

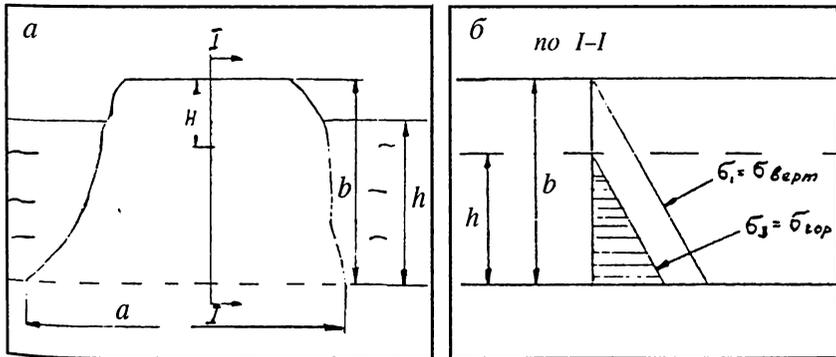


Рис. 8.5. К расчету напряжений в горном массиве острова:
 а – общий вид; б – распределение вертикальных и горизонтальных напряжений по сечению I-I

На глубине $H_{\text{пл}}$ ($H_{\text{пл}}$ – глубина начала пластического течения), условие предельно-напряженного состояния горных пород в формуле Кулона-Мора переходит в условие идеальной пластичности, характеризующееся тем, что угол внутреннего трения пород ρ равен или близок к нулю, т.е. сопротивление сдвигу не зависит от величины приложенных напряжений.

На глубине $H_{\text{пл}}$

$$\sigma_1 = \gamma H_{\text{пл}} + \gamma_{\text{в}} h + 2 \tau_{\text{max}}, \quad (8.2)$$

где τ_{max} – сопротивление пород сдвигу по паспорту прочности в условиях идеальной пластичности на глубине $H_{\text{пл}}$.

На глубине H_r (H_r – глубина начала гидростатического поля напряжений) наступает гидростатическое распределение поля главных напряжений

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma_{\text{в}} h + \gamma H. \quad (8.3)$$

В процессе дальнейших исследований приведенные зависимости могут быть уточнены.

В частности, зависимость распределения главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 на участке от океанического дна до глубины $H_{\text{пл}}$ может быть охарактеризована аналитической зависимостью, следующей из условия Кулона-Мора для предельно-напряженного состояния массива горных пород.

Условие Кулона-Мора а достаточной для практики точностью описывается уравнением эллипса:

$$\tau = \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 + 16k^2(p^2 - \beta^2)}}{16k^2}, \quad (8.4)$$

где $\beta = p - \gamma_{\text{в}} h - \gamma H$; p – вертикальные напряжения на глубине $H = H_{\text{пл}}$; $p = \gamma_{\text{в}} h + \gamma H_{\text{пл}}$; $k = \tau_{\text{max}} / \sigma_1^0$.

Главные напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma_{\text{в}} h + \gamma H + 2\tau; \\ \sigma_2 &= \gamma_{\text{в}} h + \gamma H + \tau; \\ \sigma_3 &= \gamma_{\text{в}} h + \gamma H. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Эти зависимости можно использовать для оценки главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 в области предельно-напряженного состояния массива горных пород до глубины $H = H_{\text{пл}}$.

Значение $H_{\text{пл}}$ может быть принято равным $(0,3-0,4)H_r$. Значение H_r , при котором устанавливается гидростатическое поле напряжений, зависит от температуры и среднего предела прочности горного массива.

Сопротивление сдвигу (предел «текучести») τ^1 при $H > H_{\text{пл}}$ будет уменьшаться и стремиться к нулю при $H \rightarrow H_r$, поскольку в жидком

состоянии $\tau^1 = 0$. Если принять при $H > H_{пл}$ линейную зависимость изменения τ^1 с глубиной, то

$$\tau^1 = \tau - (H_r - H)/(H_r - H_{пл}). \quad (8.6)$$

Тогда главные напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma_b h + \gamma H + 2\tau^1; \\ \sigma_2 &= \gamma_b h + \gamma H + \tau^1; \\ \sigma_3 &= \gamma_b h + \gamma H. \end{aligned} \quad (8.7)$$

Таким образом, разность $\sigma_1 - \sigma_3$ растет с удалением от океанического дна за счет повышения всестороннего сжатия, а затем она постепенно уменьшается вследствие снижения предела текучести горных пород. При $H \rightarrow H_r$ эта разность стремится к нулю вследствие того, что в жидком состоянии горные породы не выдерживают касательных напряжений. При $H > H_r$ распределение главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 в зоне сжатия земной коры будет гидростатическим.

Пользуясь приведенными зависимостями для задания граничных условий, в отдельных точках дна океана, можно рассчитать напряженное состояние всей блочной структуры горного массива, залегающего ниже дна океана уже известными методами.

К оценке напряженного состояния горного массива острова можно подойти, исходя из следующих соображений. Распределение вертикальных напряжений σ_1 и σ_3 по среднему сечению $I-I$ островной части показано на рис. 8.5.

В данном случае максимальными главными напряжениями σ_1 будут вертикальные напряжения $\sigma_{верт}$, которое определяется по формулам:

$$\sigma_{верт} = \sigma_1 = \begin{cases} \mathcal{H} & \text{при } a > 1,5b \\ 0,8 \mathcal{H} & \text{при } a < 1,5b \end{cases} \quad (8.8)$$

Коэффициент 0,8 отражает разгрузку массива горных пород за счет наличия боковых граней острова.

Минимальными σ_3 будут горизонтальные напряжения $\sigma_{гор}$, поскольку подпор со стороны толщи океана $\gamma_b H$ будет значительно (примерно в 2,5 раза) меньше столба горных пород γH (γ_b – плотность воды 1 т/м^3).

Горизонтальные напряжения $\sigma_{гор}$ определяются по формулам

$$\sigma_{гор} = \sigma_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } H < b - h \\ \gamma_b H & \text{при } H > b - h \end{cases} \quad (8.9)$$

Таким образом, напряженное состояние горных пород, расположенных во внутренней части острова, может быть оценено по приведенным выше формулам.

Первые работы по геодинамическому районированию океанического дна показали, что их продолжение может дать новые возможности

в раскрытии закономерностей в истории развития океанического дна, в поисках и освоении его ресурсов. Геодинамическое районирование недр, как никакой другой метод отвечает своему назначению в раскрытии тайн строения и напряженного состояния земной коры, поиска богатейших ресурсов океана, включая флору и фауну. Преимущества метода состоят в том, что с помощью его при минимальных затратах на само геодинамическое районирование, привлекая для сопоставления имеющиеся данные многих отраслей наук, районировав их в соответствии с полученной блочной структурой, представляется возможным сделать глубокие обобщения и практические выводы.

По результатам геодинамического районирования строится карта блочного строения океанического дна, которую возможно использовать при: прогнозной оценке металлогении; выявлении нетрадиционных ресурсов; оценке напряженного состояния отдельных участков океанического дна; разработке твердых полезных ископаемых под морским дном с целью управлением горным массивом и безопасной отработке месторождений; разработке углеводородов, выявлением на шельфе зон повышенной проницаемости; закладке продуктопроводов и других коммуникаций по дну океана для определения наиболее безопасных мест.

8.2. ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ В ЦЕЛЯХ ИЗУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОГЕНИИ МИРОВОГО ОКЕАНА*

На рис. 8.6 представлена карта мегаблочной структуры Мирового океана, составленная по результатам морфоструктурного анализа рельефа в масштабе 1:25 000 000. Карта построена в целях изучения металлогении Мирового океана.

На карте штриховкой показаны блочные структуры, относящиеся к различным этапам развития океанического дна. Выделяется протяженная линейная зона (I), состоящая из узких вытянутых блоков разделенных ортогональными к ним разломами. Так проявляется мегаблочная структура срединно-океанического подвижного пояса. Цепочка блоков этой планетарной системы прослеживается по всем океанам. Можно отметить, что влияние срединно-океанических хребтов (СОХ), как структурообразующего фактора не одинаково для всех океанов, что отражается и на различиях блочного строения регионов. Например, если характер мегаблочной структуры Атлантического океана практически полностью определен действием срединно-атлан-

* Составлено С.И.Андреевым и С.И.Петуховым

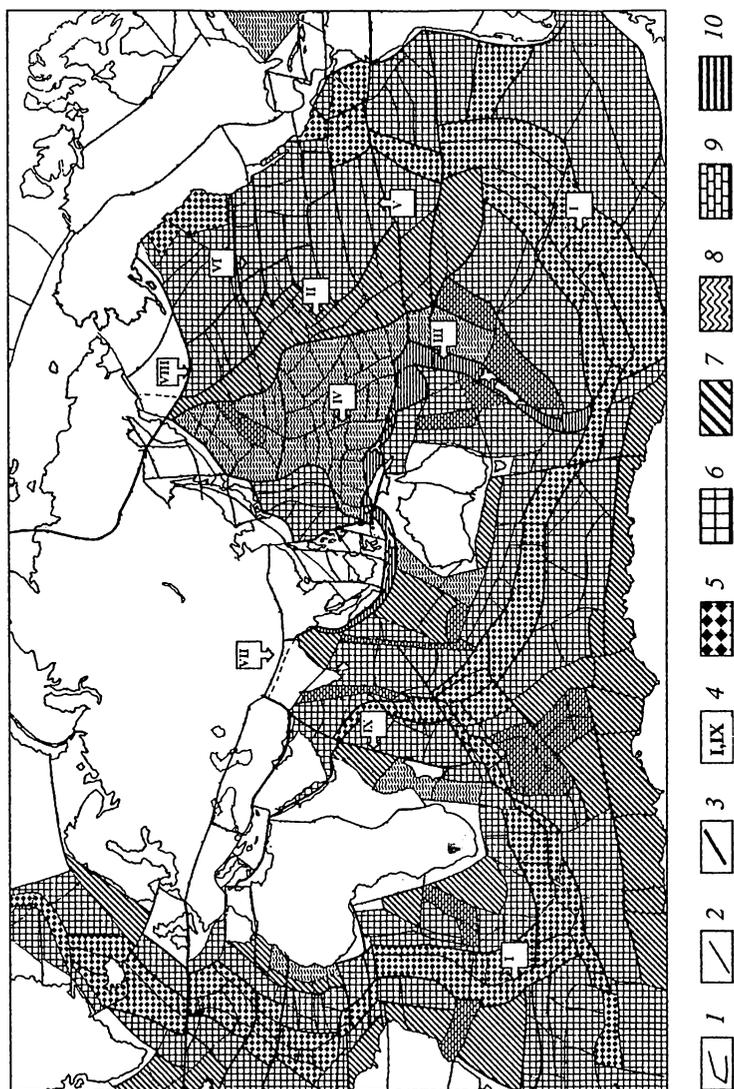


Рис. 8.6. Карта-схема блочной структуры Мирового океана:

1 – контуры материков и островов; 2 – границы мегаблоков; 3 – границы мегаблочных структур; 4 – номера приведенных в тексте примеров; 5 – срединно-океанический подвижный пояс; 6 – «молодые» плиты (линейный спрединг); 7 – переходная зона от «молодых» к «старым» плитам; 8 – «старые» плиты (рассеянный спрединг); 9 – океанические поднятия; 10 – зона сочленения Тихоокеанской и Австрало-Индийской плит

тического хребта (САХ), то в других океанах влияние срединно-океанических хребтов на характер мегаблочной структуры не так однозначно. Там, где скорости спрединга меньше, наблюдается более согласное с простиранием СОХ строение мегаблочной структуры. В Тихом океане унаследованность блочной структуры от СОХ можно проследить только до разломной зоны «Великого геораздела» (II). Эта структура представлена мегаблоками имеющими секущее по отношению к СОХ простирание, что связано с иными геодинамическими режимами развития Мирового океана (меловой период).

В отдельных регионах прослеживается сходство в строении мегаблочных структур, как для океанов, так и для континентов, что вызвано едиными более древними геодинамическими процессами. Так, например, разломная зона Алеутского желоба находит свое продолжение в разломах северо-восточной Азии и хр. Гаккеля (III).

В северо-западной части Тихого океана можно выделить мегаблочную структуру (IV), расположенную в пределах «старой» океанической плиты, которая сформировалась в геодинамическом режиме рассеянного спрединга [1]. Эта структура ограничена с востока протяженными разломами «Великого геораздела», относящимся к меловому периоду. На юге она граничит со структурным поясом (V), образованным узкими мегаблоками субширотного простирания пересекающими весь Тихий океан (от острова Новая Гвинея до Южной Америки). Разломы этого широтного пояса имеют свое продолжение в Южной Америке и Центральной Атлантике, и далее выходят на Африканский континент. В западном направлении разломы этой широтной структуры, возможно, имеют свое продолжение в желобе Юг. Восточной Азии и стыкуются с разломами Альпийско-Гималайского складчатого пояса (VI).

Приблизительно по 35 градусу северной широты, по которому предположительно проходит граница «шапки среза», выделяется широтная мегаструктура (VII). Она пересекает весь Тихий океан, а контролирующие ее разломы выходят на Американский материк. На Евразийском континенте разломы этой структуры прослеживаются до Гималайского пояса. Можно предположить, что геодинамический режим, создавший мегаблочные структуры Гималайского пояса, контролирует развитие некоторых структур субширотного простирания в Тихом океане.

Сложное блочное строение имеет Индийский океан. Это связано с развитием в этом океане трех звеньев СОХ, каждое из которых, создавая свой геодинамический режим, перестраивает в нескольких направлениях предыдущий структурный план. На мегаблочную структуру Индийского океана накладываются геодинамические процессы, проходящие в Африканском регионе, так некоторые разломы можно

проследить через этот континент до структур южной части океана. Разлом Оуэн (IX) выходит на Азиатский континент и доходит до Гималайского хребта.

Геодинамический режим переходной зоны между Тихоокеанской и Австралоиндийской плитами выделяется на карте узкой полосой приподнятых по отношению к ним мегаблоков (III). VIII – зона Алеутского желоба.

По результатам анализа полученной карты можно сделать вывод, что характер рисовки блочной структуры того или иного участка океанического дна определяется геодинамическим режимом, господствующим в данном регионе. По особенностям блочного строения можно судить не только о свершившихся геодинамических событиях, но и предугадывать пути их развития. Это позволит определить участки океанического дна, которые станут ареной деятельности развивающихся геодинамических процессов.

Ниже предпринята попытка увязать полученные данные геодинамического районирования дна Мирового океана с его металлогенией.

Как известно, главным полезным ископаемым океана являются железомарганцевые конкреции и корки. Эти руды богаты Ni, Cu, Co, Mn, Pt, PЗЭ и Mo*. Их размещение и состав связан со структурно-возрастными особенностями океанического дна и соотношением глубины залегания рудных объектов с физико-химическими элементами водной толщи океана – слоем кислородного минимума и глубиной критического карбонакопления, определяющим и положение продуктивных батиметрических горизонтов. Крупные скопления железомарганцевых конкреций и корок образуются тогда, когда продуктивные батиметрические горизонты водной толщи совпадают с благоприятными для их формирования участками дна. Важно, чтобы обширные поверхности дна оказывались в их пределах, а это возможно благодаря блочной его структуре. Примерами благоприятного сочетания продуктивных горизонтов и положения поверхности океанического дна являются почти все конкреционные поля. Особенно это четко наблюдается в поле Кларион-Клипертон. Оно располагается в пределах блока между одноименными разломами в Тихом океане. Блок опущен по ним на 200–300 м и его поверхность оказывается в продуктивном интервале от 4300 до 5000 м водной толщи, где формируются богатые металлами конкреции. В той же мере это условие должно быть выдержано для кобальтоносных корок, которые формируются на меньших глубинах от 600 до 3500 м.

* Андреев С.И. Металлогения Мировой талассогеогенной системы. // В сб. «Литосфера океанов»: состав, строение, развитие, прогноз и оценка ресурсов. ВНИИОкеангеология, СПб., 1995, часть II, с. 162–185.

Подводные горы, верхние склоны которых обычно покрываются корками, занимают в отношении этого продуктивного горизонта оптимальное положение благодаря вертикальному перемещению основания. Положение в ходе рудоотложения может меняться по амплитуде, что приводит к образованию многослойных корок или может приостановить процесс вообще. В какой-то геологический отрезок времени подводные горы могут быть выведены на поверхность океана, эродированы, а затем вновь опущены. Образовавшиеся таким образом гайоты-горы со срезанными вершинами, особенно благоприятны для коркообразования. В Тихом океане под воздействием блоковых перемещений плоские поверхности многих гайотов заняли оптимальное положение относительно продуктивного горизонта на глубинах 1400–1500 м, что привело к формированию крупных рудных скоплений корок, богатых Co, Mn, Pt и PЗЭ.

Геолого-экономические оценки показали, что железомарганцевые конкреции и корки образуют в океане месторождения, представляющие реальный промышленный интерес и вопрос их освоения дело обозримого будущего.

Развитие металлогенических идей в Мировом океане изначально связано с тектоникой плит. Независимо от того насколько эта теория оказалась правильной, она повлияла на эволюцию геологических воззрений в XX столетии кардинальным образом. Мы имеем достаточно редкий случай, когда стройная логическая система умозаключений в короткий срок подчинила себе разрабатываемые десятилетиями эмпирические концепции, базирующиеся на огромном фактическом материале.

В нашей стране металлогения и новая глобальная тектоника получила толчок к совместному развитию в 1973 г. на одноименном совещании*, проходившем в г. Ленинграде во ВСЕГЕИ с участием ведущих металлогенистов и тектонистов: В.И.Смирнова, Д.В.Рундквиста, П.Н.Кропоткина, А.А.Ковалева, В.Н.Хаина, Л.П.Зоненшайна, М.И.Кузьмина, Д.И.Мусатова, М.А.Фаворской, И.Н.Томсона и многих других. Стремясь остаться в русле передовых идей, почти все участники искали и прогнозировали пути дальнейшего развития металлогенических построений не только в Мировом океане, но и на континентах.

В последующем эта тенденция нашла свое наиболее полное отражение в монографии Л.П.Зоненшайна, М.И.Кузьмина, В.М.Моралева «Глобальная тектоника, магматизм и металлогения», изданной в 1976 г. За рубежом работа аналогичного характера «Глобальная тектоническая

* Металлогения и новая глобальная тектоника. Краткая тезисы докладов к Всероссийскому научно-техническому совещанию Проблемы металлогении в свете идей новой глобальной тектоники. ВСЕГЕИ, Л., 1973, 156 с.

позиция минеральных месторождений» А. Митчелла и М. Гарсона выходит в 1981 г. и переводится на русский язык в 1984 г.

Общим для этих научных трудов является признание спрединга в качестве главного ингредиента геологического развития и приоритета геодинамического фактора. Особо важная роль, как геоисторическому хронометру, придается магнитному полю и магнетизму горных пород, позволяющим датировать основные этапы формирования океанической коры. В основу нового воззрения на историю развития геологических структур, прежде всего, океана, были положены три постулата: существование литосферных плит самых крупных тектонических таксонов этого типа; формирование океанического дна в пределах этих плит за счет раздвижения; поглощение избытка океанической коры в зонах глубоководных окраинных желобов и возможно других разновидностей переходных зон от океана к континентам. Легко заметить, что основополагающими элементами геологического строения в этом случае являются тектонические блоки и разломные структуры различного ранга. На уровне выделения литосферных плит – это дивергентные и конвергентные зоны крупнейших на планете глубинных структур. Внутри литосферных плит – трансформные разломы, подразделяющие пространства океанического дна на блоки с различным скоростным режимом формирования. На более локальном уровне, например, в пределах отдельных сегментов срединно-океанического хребта или в районе внутриокеанических поднятий проявляются разломы других генетических типов, связанные с нетрансформными явлениями или местным вулканизмом. Если говорить о Мировом океане, как о геологической мегаструктуре – Мировой талассогенной системе (С.И. Андреев, 1993), то для нее доминанта блокового строения и разломных структур является как бы руководящим признаком, в отличие от континентов, где главенствующая роль принадлежит не только дизъюктивным элементам, но и изостатически разноуровневной мозаике геологических структур, выполненных мощными вулканогенно-осадочными толщами [1].

Сущность всего сказанного сводится к признанию для океанических пространств особо важного значения разломов как на этапе обособления океанических мегабассейнов, так и на этапе их внутреннего развития. Это значит, что при тектоническом районировании океанического дна мы сталкиваемся, прежде всего, с его блоковым строением, отражающим неоднородность устройства и различный характер геодинамического формирования отдельных частей. Подобная постановка вопроса имеет некоторую предысторию. Схему размещения литосферных плит одним из первых предложил У. Дж. Морган (1959). Позднее она видоизменялась и дополнялась. Были выделены мегаплиты с корой океанического и континентального типа или только с корой океанического

типа; мезоплиты с континентальной и океанической корой и буферные мезоплиты с корой переходного типа. Наиболее интересными с металлогенических позиций являются микроплиты. Среди них Истер, Хуан-Фернандес, Кокосовая. Они располагаются в осевой части срединно-океанического хребта Тихого океана. Через эти сводообразные структуры проходят мощные тепловые потоки и, можно предполагать, имеет место активный, вполне вероятно, рудогенный теплоперенос.

Неоднородность строения литосферы и деления ее на геоблоки составляют основу работы Л.И.Красного*. Два положения, вытекающие из этой работы, представляются плодотворными при решении металлогенических задач. Современная геоблоковая делимость океанов и континентов по мнению автора, связана с протопланетной стадией развития Земли и имеет унаследованный характер. В первую очередь, сказанное относится к таким грандиозным структурам как рифтовые зоны срединных хребтов и вулканически активные зоны островных дуг. Второе положение состоит в определении металлогенической специализации различных геоблоков. Такой подход открывает возможность увязки геологической истории и металлогении доокеанического этапа с этапом формирования суперглобальной структуры современного Мирового океана. Он позволяет реализовать весьма плодотворные идеи, работающие в русле нелинейной металлогении А.Д.Щеглова и И.Н.Говорова**. Решению этой задачи благоприятствует специфический характер макрорельефа океана, являющийся отражением его глубинной тектоники, своеобразной вершиной «айсберга», внутреннее устройство которого геологически познано слабо, но достаточно изучено геофизическими методами. Опосредованная связь рельефа и глубинного строения дна океана содержит веские предпосылки к успешному применению морфоструктурного метода, как средства выделения блоков различных порядков, исходя из амплитудных скачков и батиметрической выдержанности характеристических верхних поверхностей. Результаты применения этого метода приведены на рис. 8.6, представляющем блочную структуру Мирового океана, и элементы возможной ее связи с мегаблочной структурой континентов. Сопоставление этой схемы с тектонической схемой Мирового океана позволяет начать металлогенический очерк с геоисторического анализа мегаблочной океанической мозаики. Обращает на себя внимание, что казалось бы хаотическое расположение блоковых ансамблей находится в хорошем согласии со структурно-возрастными особенностями дна океана.

* *Красный Л.И.* Глобальная система геоблоков. М.: Недра, 1984, 222 с.

** *Щеглов А.Д., Говоров И.Н.* Нелинейная металлогения и глубины Земли. – М., Наука, 1985, 321 с.

Четыре типа границ разного возраста, отмечаемые амплитудным скачком в положении разноуровневных плоскостей океанического дна, четко намечаются в мегаструктуре Мировой талассогенной системы.

Первая отвечает переходу от континентального склона (в пределах пассивных окраин) или желоба (в пределах активных окраин) к абиссальным котловинам, представленным старыми океаническими плитами. Возраст последних средняя юра – апт (171–119 млн. лет). Эта часть океана формировалась, в основном, в режиме неупорядоченного спрединга. Некоторые участки, примыкающие к континентам и характеризующиеся «спокойным» магнитным полем, могли образоваться и по другой схеме. Вторая граница, ограничивающая блоки, составляющие старые океанические плиты, соответствует переходу к неспрединговой меловой зоне, которая образовалась в середине мела (апт-кампан), в абсолютном летоисчислении, в интервале 119–80 млн. лет. Вдоль второй границы или вблизи нее размещаются многочисленные вулканические и вулкано-тектонические поднятия, сложенные базальтами, начиная от примитивных толеитов до субщелочных их разновидностей.

Блочная структура меловой неспрединговой зоны отчасти наследуется от старых океанических плит, отчасти контролируется вулканическими поясами, имеющим самое различное простирание: от согласующегося со структурами океана, до секущего по отношению к разновозрастным тектоническим элементам Мировой талассогенной системы. Примерами последних могут быть такие системы вулканогенных поднятий как Маркус-Неккер в Тихом океане, Азоро-Гибралтарская система разломов и вулканических поднятий в Атлантике, Восточно-Индийское поднятие в Индийском океане. Эти крупные дискордантно расположенные по отношению к общему тектоническому плану океана структуры могут иметь свои «корни» на сопредельных континентах, как правило, более древнего возраста.

Последнее представляет металлогенический интерес, поскольку позволяет реализовать идеи сквозного во времени унаследованного рудообразования, связанного с более ранними (доокеаническими) этапами развития в пределах современного океана. Блочный характер устройства старых океанических плит и меловой неспрединговой зоны осложняют структуры особого типа – поднятия, называемые океанскими землями. Они находят выражения в виде обособленных неправильной формы приподнятых блоков (поднятия Шатского, Хесса, Манихики, Онтонг-Джава и др.), вероятно фиксирующих наиболее инертные участки подокеанического субстрата. Здесь ожидается специфическая для океана металлогения, характерная для дифференцированных комплексов базит-ультрабазитового состава: собственно магматические сульфидные месторождения никеля, меди и кобальта.

Третья граница отделяет меловую неспрединговую зону от молодых океанических плит, сформировавшихся в режиме линейно-упорядоченного спрединга от единого центра разрастания. Возраст кампан – верхний олигоцен (80–26 млн. лет). Мегамегаблочная структура для молодых океанических плит определяется, прежде всего, трансформными разломами – их первой генерацией, самыми протяженными и четко и выраженными в рельефе дна. Некоторые из этих разломов выходят за пределы молодых плит и вторгаются в меловую неспрединговую зону, придавая ей местами (например, к востоку от поднятия Хесса) клавишное строение.

Начиная с миоцена (26 млн. лет) океанический фундамент испытывает поднятие. Сначала после некоторого нарушения линейной регулярности раздвижения происходит небольшой подъем мантии (граница Мохо) и нижней границы литосферы. В позднем миоцене (10 млн. лет) этот процесс сменяется воздыманием дна на 2–3 км. с образованием крупнейшей планетарной морфоструктуры – срединно-океанических хребтов. В тектоническом плане это активный подвижный пояс – подводная горная страна талассиды, испытавшая на себе процессы, и чем-то сходные с орогенезом суши. В ее пределах проявился мощный вулканизм и произошла последующая сегментация с образованием в постолигоценное время семейства новых трансформных разломов на фоне спредингового формирования океанической коры. На последних этапах развития талассид, уже в четвертичное время, отмечается существенное усиление гидротермальной деятельности, что с металлогенических позиций наделяет эту океаническую суперструктуру высочайшим рудным потенциалом. В ее пределах на протяжении последних 100–150 тыс. лет закладываются и функционируют мощные рудно-гидротермальные системы, крупнейшие по своим размерам, интенсивности и регулярности глубинной теплоотдачи.

В настоящее время в пределах осевой рифтовой зоны талассид установлено несколько десятков крупных и мелких сульфидных рудопроявлений меди и цинка, сопутствуемых золотом и серебром.

Наиболее крупные из них (рудное поле Полярное, Марк, ТАГ в Атлантики; Галапогосское рудное тело в одноименном хребте, группа рудопроявлений в хребте Хуан-де-Фука, Эксплорер в Тихом океане; рудоносные илы и рассолы глубоководных впадин Красного моря) в перспективе рассматриваются, как объекты, имеющие практическое значение. Критерии выявления гидротермальных систем и сульфидного оруденения в осевых зонах срединных хребтов, в большой степени основаны на анализе блочного строения – сегментации, заключающейся в выделении блоков с различной конфигурацией верхней поверхности; разломов, смещающих борта рифтовой долины; неспредин-

говых нарушений, блоков сложенных экзотическими породами ультраосновного состава, вероятно, третьего океанического слоя.

По окраинам Мировой талассогенной системы, как резонансовые по отношению к новым океаническим плитам и талассидам, начиная с мела, развиваются активные переходные зоны – транзитали [1], представленные блочными ансамблями таких геологических структур, как островодужные поднятия, обычно рассеченные системой поперечных разломов, впадины внутренних окраинных морей, усложненные поднятиями. Металлогения транзиталей значительно разнообразнее металлогении талассид. Здесь, кроме сульфидных рудопроявлений Zn, Cu и Pb сопутствуемых как и в океанах Ag и Au, известны крупные скопления пиритовых руд, самородной серы, ртути, самородной меди. В латерали, на островах, блоковая тектоника существенно влияет на распределение продуктов абразионного разрушения и формирование россыпей, чаще всего представленных оксидами Fe и Ti.

Анализируя эту ситуацию с позиции расширения минерально-сырьевых ресурсов океана, следует обратить внимание на такие геологические объекты, как «горячие точки». Их в Мировом океане более 50 [1]. Они характеризуются высоким тепловым потоком, активным вулканизмом, размещаются, как правило, в узлах разрывных нарушений разной ориентировки, на стыке различных блоков.

Многие «горячие точки» тяготеют к теневым зонам, дискордантно расположенным по отношению к структурам океана, указывая на их глубинное заложение. Рудоносность «горячих точек» изучена слабо, но известно, что с ними связаны рудопроявления сульфидов Cu (г. Лоихи, Тихий океан), РЗЭ (о-ва Зеленого Мыса), выявлены карбонатиты (Канарские о-ва, о-ва Зеленого мыса, о Таити). Схема блочного строения океана (см. рис. 8.6) позволяет определить общетектоническую позицию «горячих точек», наметить возможную связь с металлогенией суши, уточнить конкретное положение в современной структуре океана, связав установленные признаки рудогенеза с характером спрединга в данном районе, направлением разломов, конфигураций блоков и рудно-геохимической специализацией магматических пород.

Иными словами, результаты геодинамического районирования океанического дна на основе анализа морфоструктурного плана не только могут служить повышению эффективности изучения известных типов океанических руд Мирового океана, но и открывают возможности металлогенического анализа в плане расширения его рудного потенциала.

ПРИРОДА И КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

9.1. ПРИРОДА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

За последние пятьдесят лет российская горная наука, как отмечалось выше, выполнила крупные работы по решению проблем горных ударов, выбросов угля, породы и газа при разработке угольных, рудных, соляных месторождений. Приоритет успешного решения этих проблем признается в мировой горной науке и практике.

При постановке этих работ в начале пятидесятих годов, прежде всего, вставал вопрос о природе этих явлений, об их энергетическом балансе. Именно его решение могло обеспечить научно-обоснованное создание мер прогноза динамических явлений (горных ударов, выбросов) и их предотвращения.

Начиная с 1951 г., применительно к шахтам Кизеловского бассейна, а затем – к шахтам и рудникам всех бассейнов и месторождений СССР под общим научным руководством ВНИМИ были выполнены широкие комплексные исследования с использованием методов геомеханики и геофизики, прежде всего, в целях выработки представлений о природе явлений.

Уже в начале пятидесятих годов была разработана [37] рабочая гипотеза или геодинамическая модель горного удара, которая впоследствии легла в основу создания энергетической теории горных ударов [39].

Остановимся на этом несколько подробнее. Начнем с общеизвестных способов испытания горных пород на прессе. Ранее не обращали внимания на то, что при испытании образца горной породы деформируется не только образец, но и сама система пресса.

В действительности же вся система пресса под действием нагрузки, которую она передает на образец, подвергается упругому сжатию. В момент разрушения образца пресс мгновенно восстанавливает свою

форму, причем, надо полагать, в первый момент в результате мгновенной разгрузки будет иметь место даже быстро затухающая вибрация. Мгновенная упругая деформация прессы проявится в виде удара по начавшемуся разрушаться образцу угля. В этом, очевидно, одна из главных причин того, что разрушение прочных образцов пород или угля на прессе сопровождается измельчением и разбрасыванием материала образца.

Особенности деформирования и разрушения образцов горных пород на прессах, отмеченные еще в начале 1950-х годов, позднее вызвали необходимость проведения исследований образцов на специальных, так называемых жестких прессах, чтобы исключить возможность поступления энергии извне. Большие работы на жестких прессах выполнены во ВНИМИ Б.Г.Тарасовым и Е.В.Лодусом.

Аналогия с разрушением образца горной породы на обычном («мягком») прессе была использована при разработке рабочей гипотезы, объясняющей механизм и энергетические особенности горных ударов [37]. Именно такого же вида силы и деформации имеют место при разрушении целика угля в шахте, когда в почве и кровле его залегают мощные слои упругих пород, представленных, например, кварцевыми песчаниками.

Поскольку нагрузки на предельно напряженном целике угля к середине его возрастают, то и в момент разрушения целика большее упругое восстановление кровли совершается вдали от кромки целика. Происходит как бы разбрызгивание целика угля в результате более интенсивного удара в его средней части, менее интенсивного – по краям.

Деформация вследствие разгрузки боковых пород может быть весьма значительной. Она окажется в прямой зависимости от площади боковых пород, на которой сказывалось влияние разрушенного целика угля, от величины и распределения нагрузок на целике, а также от модулей упругости толщи боковых пород.

Таким образом, упругое воздействие боковых пород способствует выбросу угля из целика и проявляется в форме удара с соответствующим звуковым сигналом.

Этим же объясняется возникновение сейсмических волн, распространяющихся по земной поверхности в радиусе до нескольких километров от места горного удара, и сильное измельчение угля при горных ударах, вплоть до появления на контакте с кровлей слоя тончайшей угольной пыли.

Принимая во внимание, что в момент горного удара имеет место мгновенное упругое колебание боковых пород, нетрудно объяснить появление при каждом сильном горном ударе щели между кровлей и разрушенным целиком угля. Образование щели происходит вследствие

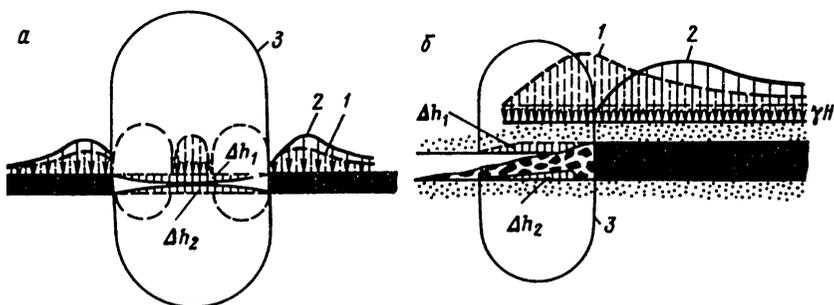


Рис. 9.1. Участие боковых пород в притоке энергии при горных ударах:

a и *б* – соответственно в целике и очистном забое; Δh_1 и Δh_2 – соответственно смещения кровли и почвы в результате упругого расширения массива горных пород в зонах разгрузки; 1 – зоны опорного давления и разгрузки до горного удара; 2 – то же, после горного удара; 3 – область, из которой идет приток энергии

того, что деформация угля, получившего мгновенный удар, в силу инерции несколько больше, чем сближение кровли и почвы, тем более, что в первый момент, очевидно, происходит еще и выпучивание кровли и почвы в сторону разрушенного целика угля, которое затем исчезает.

Согласно принятой геодинамической модели горный удар представляется, как хрупкое разрушение участка угольного пласта или горных пород, находящегося в предельно напряженном состоянии, когда скорость изменения напряженного состояния на данном участке угольного пласта или пород превышает максимально возможную скорость выхода его из-под нагрузки*. При этом обязательно имеет место приток потенциальной энергии из окружающих пород. При горном ударе с разрушением в целике угля приток энергии совершается из области образовавшейся при этом зоны частичной разгрузки 3 (рис. 9.1, *a* и *б*). При стрельянии пород (рис. 9.2, *a*) разрушение совершается по *AM* и *NB* в виде среза и движения по неровным поверхностям с возникновением критических напряжений отрыва на участке *MN*, достаточных для завершения явления стрельяния с выделением энергии из прилегающего объема породы. При срезе (рис. 9.2, *б*) также возникает перераспределение энергии в определенном объеме пород.

Разрушительная сила горного удара определяется коэффициентом динамичности

$$K_d = W_{\text{ин}} / W_p, \quad (9.1)$$

* Диплом на открытие № 337.

где $W_{\text{пр}}$ – величина притока энергии извне; W_p – энергия, необходимая для разрушения пород в очаге горного удара.

Величина $K_{\text{л}}$ изменяется от 0 до 10 и более. Динамическое явление происходит тогда, когда $K_{\text{л}} > 0$.

Остановимся кратко на балансе энергии горного удара. Отличие нашей постановки этого вопроса состоит в том, что энергия, участвующая в горном ударе, складывается из энергии упругих деформаций, накопленной угольным пластом, и энергии, накопленной боковыми породами. Таким образом, запас полной потенциальной энергии, участвующей в горном ударе,

$$W = W_y / W_n, \quad (9.2)$$

где W_y – потенциальная энергия, заключенная в угольном пласте; W_n – потенциальная энергия в массиве горных пород.

Значение W_y ориентировочно может быть подсчитано по формуле

$$W_y = \sigma_{\text{ср}}^2 / 2E_2 V_y, \quad (9.3)$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение, действующее в пласте; E_2 – модуль упругости угля; V_y – объем угля, подвергшегося разрушению при ударе.

Потенциальную энергию упругого сжатия в горных породах, участвующей в проявлении горного удара, можно определить, исходя из того, что при горном ударе боковые породы в результате расширения сближаются на величину l_0 и, следовательно, при этом совершается работа

$$A = 1/2 \sigma_{\text{ср}} S l_0, \quad (9.4)$$

(S – площадь разрушенного целика).

Половина здесь берется потому, что в процессе сближения пород на величину l_0 сила изменяется от $\sigma_{\text{ср}} S$ до нуля. Сближение l_0 может быть подсчитано по формуле

$$l_0 = 0,4 \cdot 2x_0 \varepsilon_0, \quad (9.5)$$

где $2x_0$ – ширина выработки (в данном случае – ширина области разгрузки пород при ударе); ε_0 – максимальное относительное расширение пород при разгрузке.

Таким образом, упругая потенциальная энергия, которая заключена в массиве пород, окружающем целик угля,

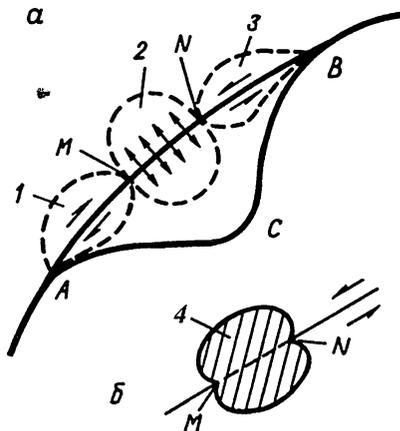


Рис. 9.2. Приток энергии:
а – при стрельянии пород из областей 1, 2 и 3; б – при срезе из области 4

$$W_y = 1/2 \sigma_{cp} S l_0. \quad (9.6)$$

Отсюда общий запас потенциальной энергии при горном ударе определится из выражения [37]

$$W_y = \sigma_{cp} S \left(\frac{\sigma_{cp} h}{E_2} + 0,4 x_0 \varepsilon_0 \right), \quad (9.7)$$

где h – мощность пласта угля.

В работе [37] рассчитана потенциальная энергия, проявившаяся при игорном ударе 12 мая 1963 г. на шахте им. Калинина Кизеловского бассейна. Полная потенциальная энергия рассматриваемого удара составляет $W = 8,4 \cdot 10^9$ Дж. Потенциальная энергия, сосредоточенная в целике угля, $W_y = 6,2 \cdot 10^9$ Дж.

Из расчета следует, что в данном случае в угле заключено лишь 7,3% полной потенциальной энергии горного удара.

При неизвестном значении ε_0 оно может быть определено по выражению $\varepsilon_0 = \sigma_{cp} / E_1$.

Формула (9.7) в этом случае запишется в следующем виде:

$$W = \sigma_{cp}^2 S \left(\frac{h}{E_2} + 0,4 \frac{x_0}{E_1} \right), \quad (9.8)$$

где E_1 – модуль упругости пород, МПа.

Несколько слов следует сказать об отличиях в природе так называемых горнотектонических ударов и выбросов, отнесенных к отдельному классу динамических явлений*.

Горнотектонический удар – это горный удар, вызванный приходом волны энергии от толчка (сотрясения) в массиве.

Рассмотрим баланс энергии динамических явлений типа горного удара. На рис. 9.3 в координатах «нагрузка P – деформация ε » представлена полная диаграмма OAB разрушения элемента массива горных пород для энергопоглощения при обычных условиях. Линия AC – это диаграмма реализации энергии окружающих пород.

При достижении разрушаемым элементом предела прочности, после которого снижается его несущая способность на нагружающей системе, накапливается энергия, численно равная площади треугольника ABC . Разрушаемый элемент способен поглотить энергию, численно равную площади треугольника ABB . Сравнение накопленной и поглощаемой энергии показывает, что при обмене выделяется энергия, численно равная площади треугольника ABC . Это энергия и вызывает горный удар.

* В анализе принял участие Е.В.Лодус.

Иная ситуация наблюдается при горнотектоническом ударе. До подхода волны энергии система располагается в точке K (рис. 9.3). Приход волны энергии сопровождается ударной пригрузкой системы и переводом ее в точку M . Это объясняется свойством большинства горных пород к скоростному упрочнению при повышении скорости энергоподвода. При повышении скорости деформирования диаграмма деформирования приобретает вид OMT . Переход нагружающей системы в точку M сопровождается изменением ее энергозапаса и энергопотребления разрушаемым элементом. Энергозапас на системе будет характеризоваться площадью VMH , а энергопотребление – площадью фигуры BMT . Линия MH получается путем параллельного переноса линии AC , а запредельная диаграмма деформирования большинства пород характеризуется возрастанием модуля спада при повышении скорости нагружения. Таким образом, из сравнения диаграммы энергопотребления и энергоподвода видно, что избыток энергии (площадь TMH) при горнотектоническом ударе значительно больше, чем при обычном ударе (площадь ABC). Волна энергии повышает энергозапас на системе в большей степени, чем увеличивает энергопотребление разрушаемого элемента. Катастрофичность горнотектонического удара возрастает по сравнению с обычным ударом, не инициированным волной энергии толчка.

Горнотектонический выброс – это выброс угля (породы) и газа, вызванный приходом волны сотрясения в массиве. Послойное разрушение материала при выбросе требует больших энергетических затрат. Дополнительная энергия, необходимая для послойного разрушения, создается давлением газа, сосредоточенного в объеме разрушаемого элемента. В обычных условиях измельчение материала при выбросе и перемещение частиц производится давлением газа, окружающие породы вследствие сравнительно медленного послойного разрушения не «успевают» создавать избыток энергии на нагружающей системе.

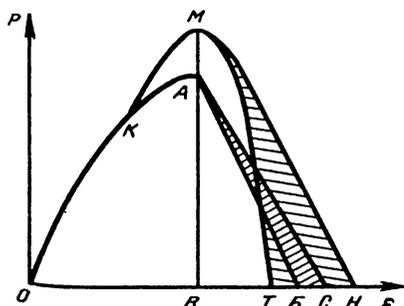


Рис. 9.3. Условия энергообмена при горнотектоническом ударе

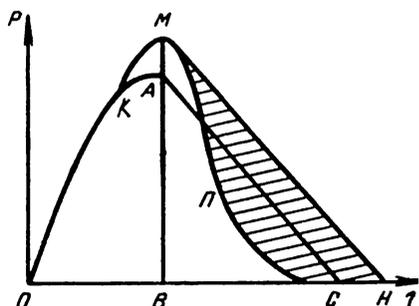


Рис. 9.4. Условия энергообмена при горнотектоническом выбросе

На рис. 9.4 представлена диаграмма *OAC* деформирования элемента при послойном его разрушении. Линия *AC* показывает реализацию энергии окружающими породами, что практически соответствует энергопотреблению, так как избыток энергии упругого восстановления окружающих пород почти не образуется.

Однако при инициировании выброса волной энергии толчка обстановка не изменяется. До подхода волны энергия система располагается в точке *K* (см. рис. 9.4). Приход волны энергии переводит систему в точку *M*. Причины именно такого перехода системы при поступлении волны энергии рассмотрены выше.

Резкое увеличение нагрузки в момент прихода волны энергии (точка *M* на рис. 9.4) значительно повышает энергозапас на нагружающей системе: вместо энергии, численно равной площади фигуры *ABC*, образуется энергия, численно равная площади фигуры *MBH*. Кроме того, приход волны энергии изменяет характер деформирования газонасыщенного материала: вместо послойного разрушения под воздействием энергии газа происходит ударное его нагружение и разрушение, одновременно по значительному объему. Ударная волна имеет существенно большую скорость деформирования материала, чем при послойном нагружении с участием газа, и газ не успевает принять активное участие в разрушении.

Переход от послойного разрушения к одновременному разрушению больших объемов требует меньших затрат (график *MPC* запредельного деформирования (см. рис. 9.4). Сравнение графиков *MPC* энергопотребления при нагружении по большому объему и *MH* (энергоотдачи) показывает, что в системе образовался большой избыток энергии упругого деформирования (площадь фигуры *MPCN*). Этот избыток и проявляется в форме горного удара.

После этого начинается вторая стадия процесса – послойный отрыв материала в разрушенных кусках за счет энергии газа, распределенного в них, как и при чистом выбросе, но с тем отличием, что в этом процессе горное давление уже не принимает участия. Таким образом, при горнотектоническом выбросе резко возрастает доля внешней энергии $W_{вн}$ в его проявлении и, следовательно, значительно увеличивается коэффициент динамичности. Следует отметить, что динамичность повышается и при крупных выбросах не горнотектонического типа. В этом случае выброс развивается постадийно и на сейсмограмме записывается несколькими пакетами: волна послойного отрыва огибает какой-то участок пласта, что приводит к его хрупкому разрушению, открывая фронт последующего послойного разрушения угля газом и горным давлением. Этот процесс при крупных выбросах может проявляться многократно, повышая их общую динамичность. По той

же причине более динамичными являются выбросы, вызванные сотрясательным взрыванием.

Рассмотренные особенности проявления горнотектонических явлений имеют прямое отношение и к возбужденным техногенным землетрясениям.

Раскрытие природы горных ударов позволило выработать комплекс эффективных мер профилактики для их предотвращения во всех весьма разнообразных геологических и горнотехнических условиях работы шахт в СНГ.

Прогноз ударов был практически сведен, во-первых, к выявлению склонных к горным ударам пластов угля на всех угольных месторождениях с последующей публикацией «Каталога» таких пластов и, во-вторых, – к систематическому поиску опасных мест в шахтах, разрабатывающих удароопасные пласты угля.

Этими вопросами занимается специальная служба прогноза и борьбы с горными ударами, вооруженная соответствующими методами и аппаратурой. Эта служба выявляет опасные по горным ударам места в шахте (целик, забой или бок горной выработки и др.), обеспечивает приведение их в неопасное состояние, проверяет надежность выполнения этой работы и только после этого разрешает возобновление горных работ [18]. Как показал многолетний опыт, этими мерами обеспечивается полная гарантия того, что горного удара в ранее опасном по ударам месте не произойдет.

Такой принципиально новый подход обеспечил практическое решение проблемы горных ударов на угольных шахтах. Среднегодовое число горных ударов за сорок лет в расчете на один опасный угольный пласт сократилось в сотни раз, несмотря на то, что средняя глубина разработки угольных месторождений на это время возросла в три раза. Как видно, обеспечение безопасности ведения горных работ здесь базируется не на предсказании времени проявления горного удара, а на своевременном принятии профилактических мер по его предотвращению.

Обобщение накопленного опыта шахт по выявлению возможного проявления горных ударов позволило далее разработать комплекс профилактических мер, применяемых на стадиях проектирования и строительства шахт, планирования развития горных работ в пределах шахтного поля, предусматривающих ведение горных работ без оставления целиков угля, с использованием опережающей отработки защитных пластов, региональной гидроотработки опасных пластов и многих других эффективных мероприятий [37, 38, 50].

Полное внедрение разработанного комплекса мер ликвидирует возможность опасного проявления не только обычных горных ударов, но и даже горнотектонических ударов, являющихся, как правило,

наиболее разрушительными. В прежние годы при отдельных горно-тектонических ударах, например, на Ткибули-Шаорском угольном месторождении Грузии происходило одновременное разрушение сотен метров горных выработок двух-трех соседних шахт. После внедрения на этих шахтах региональной гидроотработки опасных угольных пластов горнотектонические удары прекратились, хотя вызывавшие их ранее мелкофокусные землетрясения продолжали происходить практически в том же количестве.

При разработке рудных и нерудных месторождений, где проблема борьбы с горными ударами возникла в нашей стране лишь в 1970-е годы, разработанный комплекс мер полностью еще не внедрен. Однако благодаря эффективной деятельности служб прогноза и предотвращения горных ударов на рудниках с соблюдением тех же принципов, что и на угольных шахтах, среднегодовое число горных ударов за последние десять лет сократилось в 6 раз, несмотря на увеличение глубины разработки рудных месторождений и возрастание вследствие этого удароопасности.

Здесь имеется одна особенность. Поскольку многие старые рудники были построены ранее без соблюдения профилактики борьбы с горными ударами, то возникают трудности в достаточно быстром переходе их на применение радикальных, регионального плана, мер борьбы с горными ударами. Вследствие этого оставленные среди выработанных пространств целики руды различных размеров и формы создают опасность проявления в них разрушительных горнотектонических ударов. Поэтому приобретает значение разработка региональных методов прогноза горных ударов, в том числе с учетом фактора времени. Что это означает? Речь идет не о предсказании времени возникновения горнотектонического удара с точки зрения своевременного вывода людей из опасного места, а о своевременном выявлении наступающей опасности с тем, чтобы принять меры профилактики для предотвращения опасности от проявления горнотектонического удара.

В этом отношении интересный пример имел место в 1991 г. на Северо-Уральском руднике (шахта № 15-15-бис), когда в опасном по горным ударам районе массива пород, расположенном в области сочленения активных тектонических разломов, выявленных геодинамическим районированием, была пробурена с земной поверхности скважина глубиной 760 м для осуществления гидроразрыва пород*. Для увеличения приемистости воды в скважину на двух участках по ее длине образованы разгрузочные щели длиной по 3 м. Для осуществления гидро-

* Место бурения скважины было определено И.М.Батугиной с учетом результатов геодинамического районирования

разрыва пород в скважину была закачена смесь из 150 м³ воды и 6 м³ песка. Гидроразрыв произошел при давлении 320 атм. В результате гидроразрыва сейсмичность в опасном районе на период свыше года резко снизилась как по количеству импульсов, так и по их энергетическому классу, горные удары не имели места.

Это дало возможность поставить реальную задачу о необходимости перехода к управлению геомеханическим состоянием массива горных пород на всех глубоких шахтах (а не только опасных по динамическим явлениям), что обеспечит ведение горных работ как бы на глубинах, в два–три раза меньших достигнутых, со всеми вытекающими отсюда положительными последствиями.

Краткое рассмотрение энергетических особенностей геодинамических явлений типа горных ударов и выбросов показывает, что их основным признаком является наличие притока энергии извне: без притока энергии извне динамическое явление не может произойти. Это касается всех известных к настоящему времени динамических и, даже шире, – геодинамических явлений, происходящих вообще в блочном горном массиве.

Выявленная авторами закономерность толчкообразного деформирования и разрушения блочного горного массива, характеризующаяся коэффициентом динамичности K_d , имеет всеобщий характер*. Наличие выявленной закономерности подтверждается лабораторными исследованиями механических свойств горных пород на обычных и жестких прессах, натурными геофизическими наблюдениями при разработке многих угольных и рудных месторождений, результатами решения проблемы прогноза и предотвращения горных ударов, выполненных под руководством института ВНИМИ за последние 30–40 лет.

9.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Классификация динамических явлений может быть создана на основе энергетической теории горных ударов, энергетически-силовой теории выбросов угля, породы и газа, положений геодинамики недр и с учетом мирового опыта ведения горных и др. работ в условиях проявления геодинамической опасности.

Приведем пример создания Международной классификации ЕЭК динамических явлений применительно к угольным шахтам. Эта классификация разработана специальной комиссией, созданной Рабочей

* Заявка на открытие (авторы: И.М.Петухов, Е.В.Лодус, И.М.Батугина, В.А.Смирнов)

группой по углю Европейской экономической комиссией ООН*. В основу этой классификации положены подходы, принятые в России.

В классификации выделяются четыре класса явлений: горные удары, выбросы газа, выбросы угля (породы) и газа, горнотектонические явления (рис. 9.5).

К классу *горные удары* относятся динамические явления, в баланс энергии которых входит энергия, накопленная самим разрушающимся элементом массива горных пород (в данном случае – уголь) и энергия, накопленная окружающими породами. При этом горные удары возникают на участках массива, находящихся в предельно напряженном состоянии, в условиях, когда скорость изменения этого состояния превышает скорость релаксации напряжений.

К классу *выбросы газа* относятся динамические явления, связанные с внезапным выделением газа через трещины и полости или из зон тектонических нарушений, вскрытых скважиной, или горной выработкой.

К классу *выбросы угля (породы) и газа* относятся динамические явления, в баланс энергии которых входит упругая энергия угля, пород и газа. При этом имеется в виду, что послойное разрушение угля (породы) происходит под совместным воздействием горного и газового давлений, а разрушенный материал выносится за счет энергии расширяющегося газа.

К классу *горнотектонические явления* отнесены такие динамические явления, в формировании которых, кроме указанных выше видов энергии, участвует энергия сейсмических волн, выделяющаяся при толчкообразном деформировании массива горных пород. Именно добавка этой энергии приводит в опасных местах к потере устойчивости массива пород и вызывает проявление горного удара или выброса. Волна сейсмической энергии повышает энергозапас на системе в большей степени, чем увеличивает энергопотребление разрушаемого элемента. Поэтому катастрофичность проявления горнотектонического удара возрастает по сравнению с обычным ударом, не инициированным волной энергии толчка. Горнотектонический удар отличается повышенной интенсивностью, проявляется обычно одновременно в нескольких горных выработках шахты или даже соседних шахт. Характер разрушения выработок (целиков) и поражающего действия такой же, как и при обычных горных ударах, но может проявляться более интенсивно.

Динамические явления на газовых пластах угля часто носят комбинированный характер. Основным признаком, по которому определяется

* Состав комиссии: И.М.Петухов (председатель), Я.А.Бич, О.И.Хмара (Россия), А.И.Бобров (Украина), Р.Конопко (Польша), З.Раковски (Чехия), Х.Г.Ханекман, Г.Хиндерфельд (Германия).

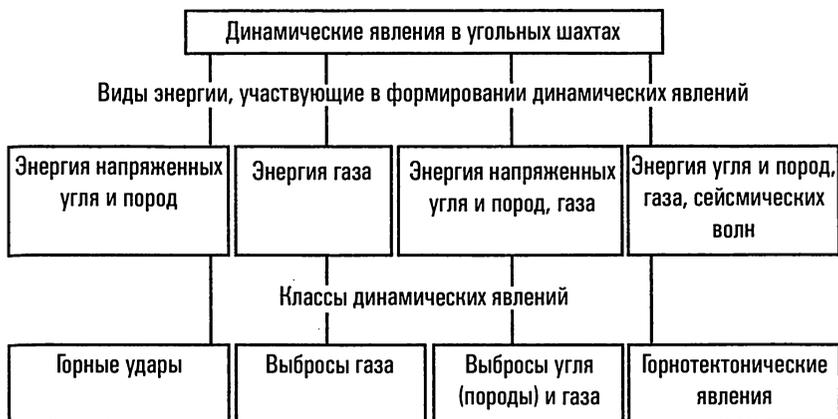


Рис. 9.5. Классификация динамических явлений в шахтах

класс динамического явления в этих случаях, является наличие или отсутствие выноса разрушенного угля (породы) газом, обязательно присущим выбросу угля (породы) и газа.

Интенсивность динамических явлений по регистрируемым в горных выработках показателям (критериям) приведена в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Интенсивность динамических явлений

Класс	Горные удары	Выбросы	
	Вес разрушаемого угля (породы) P , кН	Вес разрушаемого угля (породы) P , кН	Объем выброшенного газа V , м ³
Слабые	< 50	< 100	< 100
Средние	50 – 1 000	100 – 2 000	100 – 1 000
Сильные	1 000 – 10 000	2 000 – 20 000	1 000 – 10 000
Катастрофич.	> 10 000	> 20 000	> 10 000

Примечание. При использовании критериев по весу угля и объему газа класс выброса принимают по тому критерию, который дает более высокий класс.

Пользуясь предлагаемой классификацией динамических явлений, можно сформулировать основные принципы и подходы к рассмотре-

нию происшедших случаев явлений, определению круга мер профилактики на будущее и степени ответственности горняков за допущенные случаи опасных динамических явлений. Целесообразно выделять во всех происходящих в шахтах динамических явлениях *микроявления*. Это позволит, с одной стороны, легализовать часто возникающие мелкие явления, которые обычно скрывают от контролирующих организаций, а с другой стороны – своевременно обратить внимание для разработки мер по снижению их интенсивности и числа.

Здесь можно воспользоваться опытом, накопленным на протяжении 40 лет, при решении проблемы горных ударов в странах СНГ. Случаи стрельаний, толчков, микроударов, не представляющих опасности для здоровья, жизни людей и не вызывающих нарушения технологических процессов и нормальной эксплуатации выработок, лишь систематизируются и изучаются для принятия профилактических мер по снижению их интенсивности и числа. Остальные же случаи горных ударов тщательно расследуются комиссией с целью недопущения подобных аварий.

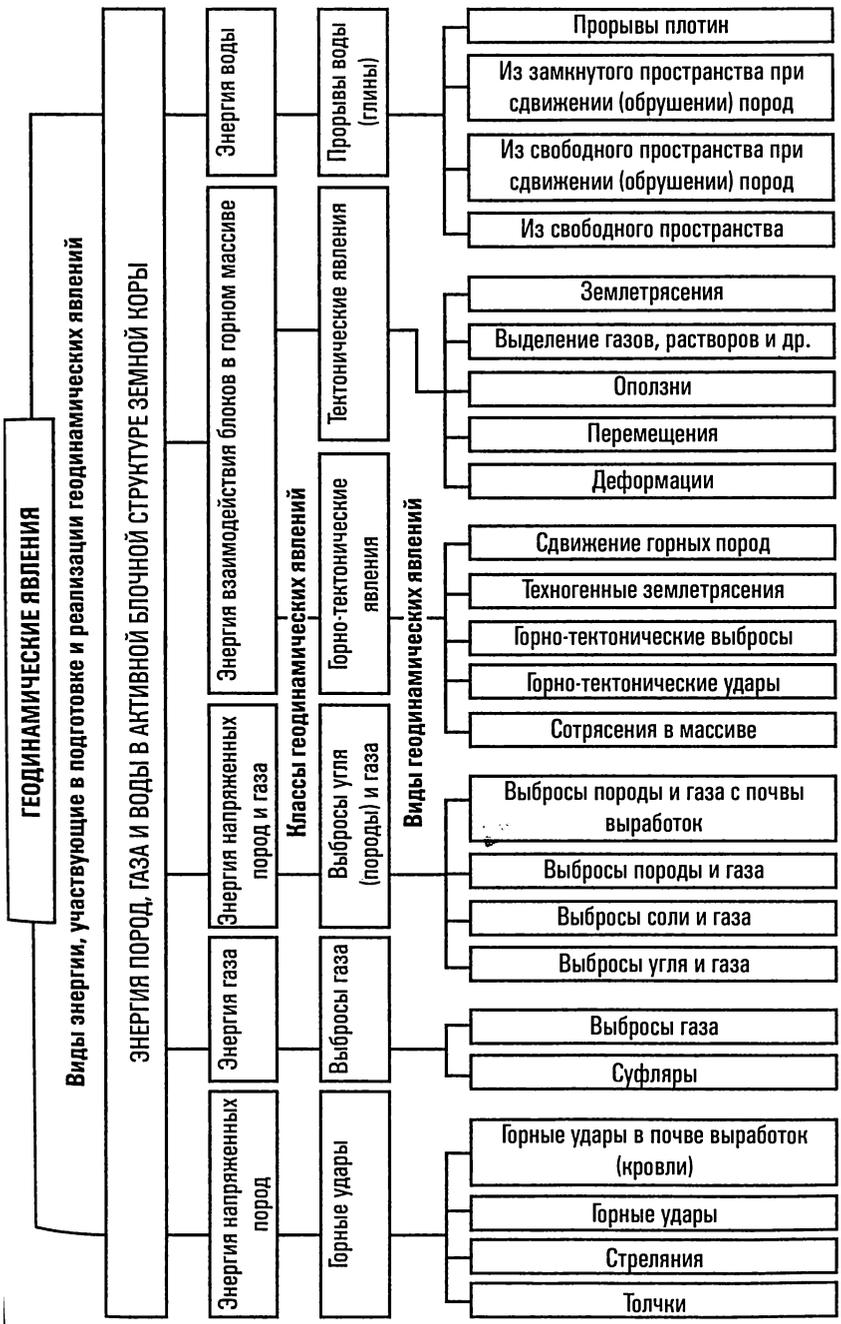
При расследовании случаев динамических явлений необходимо руководствоваться разделением их на классы в соответствии с табл. 9.1 и требованиями, установленными законодательством страны, на шахтах которой произошли динамические явления.

При расследовании случаев, приведших к травмированию людей, их класс, определенный по табл. 9.1, увеличивается на единицу. Случаи динамических явлений должны регистрироваться по специальной анкете, форма и содержание которой могут устанавливаться в каждой стране, и должны быть включены в банк данных на ЭВМ.

Рассматриваемая классификация может пополняться, во-первых, в части расширения и уточнения систематизации явлений внутри выделенных видов; во-вторых, в части, касающейся введения систематизации явлений по месту их возникновения, по видам и характеру технологических процессов, при которых они происходят (сотрясательное взрывание, автоматизированное управление добычными и проходческими машинами и др.).

Блочная структура месторождения и место, характеризующее тип, размеры и условия расположения той или иной выработки, в которой происходит динамическое явление, как правило, определяют интенсивность, характер и энергетические особенности явления и потому должны участвовать в анализе происшедшего явления. Это относится в еще большей степени к горнотектоническим явлениям, включая и техногенные землетрясения.

Рис. 9.6. Энергетически-силовая классификация геодинамических явлений



Следует также обратить внимание на наличие всесторонних связей и взаимозависимостей проявления естественных и техногенных толчков (сотрясений) в массиве горных пород, включая техногенные землетрясения, горнотектонические явления в шахтах и рудниках. В некоторых случаях последние, в свою очередь, могут привести к интенсификации толчкообразного деформирования массива горных пород в областях перехода его в предельно напряженное состояние.

Учитывая подходы и опыт создания предыдущих классификаций динамических явлений, ниже предлагается более обширная классификация, объединяющая, по возможности, все виды геодинамических явлений, встречающиеся при освоении недр и земной поверхности (рис. 9.6).

К приведенной классификации необходимо сделать некоторые замечания.

Геодинамические явления есть результат обмена энергией в блочном горном массиве земной коры, деформирующегося (разрушающегося) в условиях существующего или возникающего предельно напряженного состояния.

Классы геодинамических явлений определяются характером и степенью энергетического взаимодействия природной и техногенной систем напряженно-деформированного состояния в местах их проявления.

Сила и характер реализации геодинамического явления характеризуются:

степенью природной напряженности участка земной коры, в общем случае, обратно пропорциональной отношению глубины распространения зоны предельно напряженного состояния к толще литосферы; интенсивностью техногенного воздействия на горный массив (глубина, объем и скорость образования выработанных пространств; соотношение в пространстве и времени отработки продуктивных пластов и пр.).

Планетарные силы «оживляют» процессы деформирования массивов пород, находящихся в предельно напряженном состоянии, т.е. выполняют роль стимулятора. Поэтому их непрерывная оценка может способствовать прогнозу геодинамических явлений с учетом места фактора времени.

УПРАВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

10.1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Основой постановки вопроса об управлении геодинамическим состоянием массива горных пород явились результаты широких комплексных исследований, выполненных под руководством ВНИМИ за последние пятьдесят лет в процессе решения проблем прогноза и предотвращения горных ударов, внезапных выбросов угля, породы и газа при разработке угольных, рудных и нерудных месторождений России, Украины, Казахстана, Узбекистана, Кыргызстана и Грузии.

Результаты этих исследований позволили достаточно основательно изучить вопросы деформирования и разрушения массива горных пород при технологическом воздействии на него. На завершающем этапе этих комплексных исследований с привлечением многих данных наук о Земле стало возможным создание метода геодинамического районирования недр (см. главу 7). Оценка, прогноз и контроль геодинамического состояния массива горных пород с помощью этого метода открыли реальную возможность постановки задачи управления массивом.

Решение проблемы целенаправленного управления массивом горных пород позволяет, в свою очередь, добиваться кардинального повышения безопасности, экономичности и экологической чистоты освоения недр и земной поверхности.

Освещение вопросов управления состоянием массива приводится во многих научных работах, в том числе [37, 50 и др.].

Выполнение этих крупных исследований стало возможным в результате сотрудничества ВНИМИ с научно-исследовательскими, отраслевыми, учебными и академическими организациями. Полнота и успешность этих исследований были бы недостаточными, если бы в

них не участвовали производственные организации горнодобывающих отраслей и Госгортехнадзора России.

Рассмотрим отдельные направления решения этой проблемы в различных отраслях освоения недр и земной поверхности.

10.2. ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

10.2.1. Региональное управление горным и газовым давлением

Наибольший опыт по управлению геодинамическим состоянием массива горных пород при разработке твердых полезных ископаемых получен на угольных шахтах. Это объясняется тем, что угольная промышленность с увеличением глубины разработки раньше других отраслей столкнулась с такими крупными проблемами, как горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа, высокая газоносность угольных пластов, большие осложнения в поддержании горных выработок. Поэтому целесообразно ниже остановиться главным образом на опыте угольных шахт, по необходимости обращая внимание на значение рассматриваемых вопросов для предприятий рудных и нерудных месторождений.

Одним из главных факторов, постоянно действующих на экономические показатели работы шахт и безопасность ведения горных работ в плане их снижения, является возрастающая глубина разработки. Рост глубины разработки прежде всего усиливает вредное влияние горного и газового давления на всю технологию горного производства.

Таблица 10.1

Рост глубины разработки угля

Бассейн, месторождение	Средняя глубина, м		Увеличение, число раз
	1951 г.	1991 г.	
Донецкий	238	650	2,7
Кузнецкий	138	350	2,5
Карагандинский	179	420	2,3
Печорский	183	530	2,9
Кизеловский	289	700	2,4
Ткибульское	75	735	9,8
Шурабское	222	350	1,6
В среднем	188	517	2,8

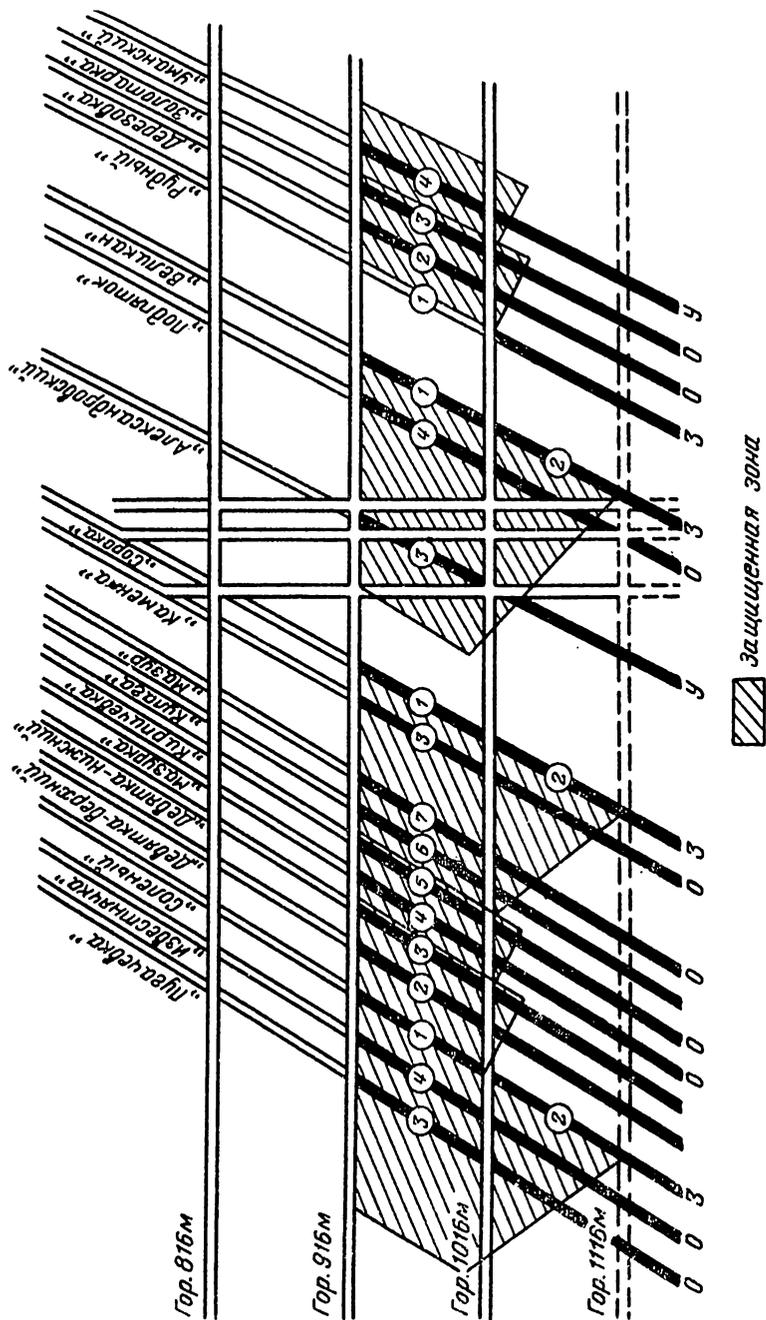


Рис. 10.1. Схема регионального управления горным и газовым давлением:

1, 2, ..., 7 – порядок отработки пластов в свите; 3, О и У – пласты соответственно защитный, опасный и угрожаемый

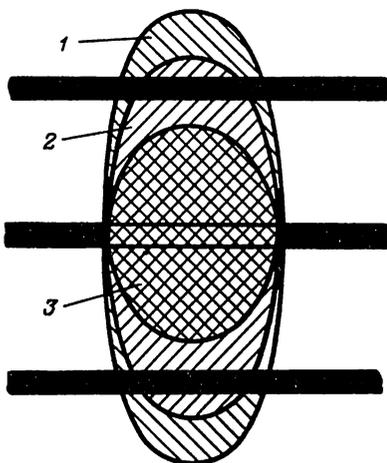


Рис. 10.2. Зоны влияния опережающей отработки защитного пласта (средний) с последующей искусственной дегазацией опасных пластов:

1 – зона разгрузки; 2 – защищенная зона после отработки защитного пласта и искусственной дегазации; 3 – защищенная зона после отработки защитного пласта

боту шахт. Успешно решаются вопросы дегазации газоносных угольных пластов (головной институт – ИГД им. А.А.Скочинского). Объем использования метана возрос с 7,3 млн. м³ в 1955 г. до 114 млн. м³ в 1990 г. Одним из достижений является создание и широкое внедрение комплекса региональных мер по управлению горным и газовым давлением на ударо- и выбросоопасных шахтах России, Украины, Казахстана (головной институт – ВНИМИ). Указанный комплекс включает в себя опережающую отработку защитных пластов, дегазацию пластов в разгруженных зонах и региональную гидроотработку опасных пластов.

На рис. 10.1 приведена схема наиболее рационального использования защитных пластов применительно к одной из шахт Центрального района Донбасса. Первыми в свитах отрабатываются защитные пласты. Причем если защитный пласт является верхним, то его опережающую отработку достаточно вести только в пределах действующего горизонта. Если защитный пласт залегает внизу свиты, то для полноты защиты он должен отрабатываться с опережением на горизонт.

С начала 1950-х годов средняя глубина разработки угольных пластов увеличилась с 188 до 517 м, т. е. в 2,3 раза (табл. 10.1), а максимальная – с 800 до 1307 м.

В настоящее время на 35 шахтах отрабатываются пласты на глубинах более 1000 м. В результате число сверхкатегорных по газу шахт увеличилось за этот период в 2,7 раза и достигло 66% общего их числа. Число шахт, опасных по внезапным выбросам, возросло с 41 до 149 (в 3,5 раза), а опасных по горным ударам – с 9 до 91 (в 10 раз). Среднесуточная нагрузка на комплексномеханизированный очистной забой, например, на Украине снизилась с 1973 по 1987 г. на 35%.

Благодаря усилиям горной науки и промышленности, за последние десятилетия предприняты серьезные шаги для преодоления последствий отрицательного влияния перечисленных осложнений на работу шахт.

Таблица 10.2

Результаты дегазации крутых надрабатываемых пластов

Шахта	Пласт		Горизонт, м	Мощность между пластами, м	Дальность защитного действия, м	Показатель степени защитного действия	Метаноносность, м ³ /т			
	опасный	защитный					природная	после надработки	после надработки и дегазации	безопасная
им. Артема	m_3	m_4^0	980	43	27	0,6	13,7	9	6,8	6,8
им. Гагарина	I_4^n	I_5	830	44	27	0,6	12	8,3	5,7	6,8
«Комсомолец»	m_3	m_4^0	850	47	28	0,55	14,3	8,6	6,3	7,2
им. Гаевого	I_4^n	I_5	860	49	20	0,28	15,6	10,2	6,9	8

Таблица 10.3

Типовые параметры регионального увлажнения ударо- и выбросоопасных угольных пластов

Основные параметры	Месторождение, район			
	Прокопьевско-Киселевский р-н Кузбасса	Ткибули-Шаорское	Воркутинское	Центральный р-н Донбасса
Глубина разработки, м	100–400	700–1000	700–800	700
Мощность m , м	До 15	До 30	3–4	0,5–1,5
Пористость n , %	4–8	10–15	4–6	3–8
Норма увлажнения N , л/т	20–30	30–50	20	20
Давление нагнетания P , МПа	–	10–20	До 30	–
Радиус влияния скважины R , м	50–70	30–50	20–40	15–20
Расстояние между скважинами L , м	50–100	40–60	30–40	15–30
Объем закачки в скважину V , м ³	2000–4000	1000–3000	500–1500	30–50

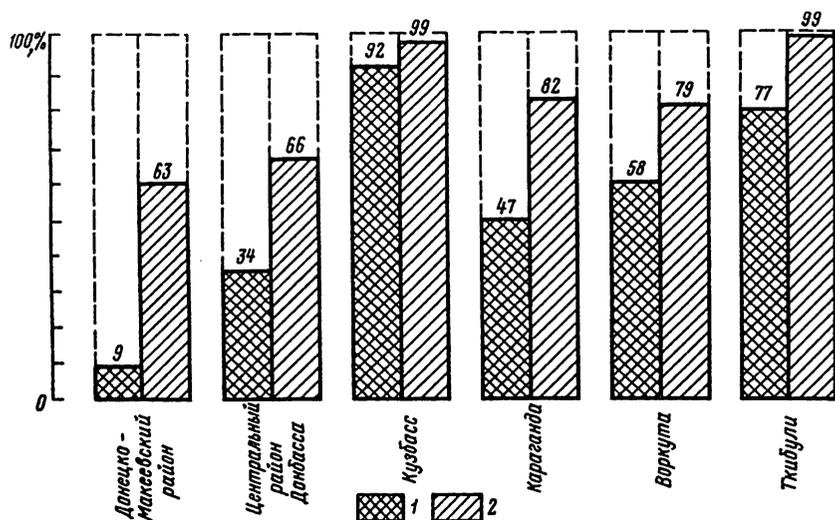


Рис. 10.3. Объемы внедрения региональных мер на ударо- и выбороопасных пластах:

1 – достигнутое в настоящее время; 2 – ожидаемое при последующем внедрении

Расстояние защитного действия можно существенно увеличить, если защищаемый пласт подвергнуть искусственной дегазации в районе разгрузки, вызванной отработкой защитного пласта (рис. 10.2).

Не останавливаясь подробно на параметрах защитного действия, искусственной дегазации в зонах разгрузки и регионального увлажнения пластов, описанных во многих работах [28, 30, 35 и др.], обратим внимание лишь на то, что эти параметры чрезвычайно сильно зависят от горно-геологических условий залегания, строения и физико-механических свойств пластов, а потому в каждом конкретном случае подлежат квалифицированному определению. Различие параметров искусственной дегазации и регионального увлажнения видно, например, из табл. 10.2 и 10.3.

Отметим также, что региональное увлажнение опасных пластов особенно полезно и может применяться в тех случаях, когда все пласты в свите являются опасными. Например, на шахтах Ткибули-Шаорского месторождения региональное увлажнение удароопасных пластов нашло широкое применение, что позволило ликвидировать весьма опасные горнотектонические удары, когда при отдельных наиболее крупных из них происходило одновременное разрушение горных выработок на соседних шахтах.

Достигнутые объемы внедрения региональных мер на ударо- и выбросоопасных угольных пластах по бассейнам и месторождениям представлены на схеме рис. 10.3 (по состоянию на 1990 г.). На том же рисунке отражены и возможные перспективы дальнейшего внедрения этого комплекса мер.

Далеко не полное внедрение комплекса мер регионального управления массивом в основных бассейнах и на месторождениях страны, наряду с применением локальных мер, позволило добиться существенного снижения числа опасных внезапных выбросов и горных ударов соответственно в 10 и 15 раз. На угольных пластах, где применялись региональные меры, этих явлений не происходило.

Управление горным и газовым давлением, теоретически обоснованное и практически освоенное пока применительно к разработке ударо- и выбросоопасных пластов должно осуществляться, вообще, на всех глубоких шахтах [45, 50], учитывая, что максимальная глубина разработки на период к 2000 г. возрастет до 1600 м при средней глубине 750–800 м. В результате внедрения разработанных схем может быть создана реальная возможность того, что около 80–90% угольных пластов будут разрабатываться как бы на глубинах, в два–четыре раза меньших, чем фактически достигнутые, со всеми вытекающими отсюда положительными последствиями: увеличение утилизации газа в несколько раз, успешная борьба с динамическими явлениями, пожарами и запыленностью горных выработок, облегчение поддержания выработок и управления кровлей в лавах. В конечном счете это позволит существенно поднять рентабельность работы горных предприятий.

То обстоятельство, что идея о региональном управлении горным и газовым давлением, впрочем, так же как и о бесцеликовом поддержании выработок, возникла сначала применительно к шахтам, опасным по динамическим явлениям, не должно удивлять: это произошло естественно, так как именно на этих шахтах трудности возникли раньше и поэтому горной науке и практике в первую очередь здесь пришлось искать и энергично осваивать неординарные радикальные решения.

10.2.2. Поддержание горных выработок в разгруженных зонах

Как известно, охрана горных выработок от вредного проявления горного давления производилась с помощью целиков угля соответствующих размеров. Размеры целиков по мере роста глубины разработки увеличивались.

Однако на глубоких шахтах еще в начале 1950-х годов горняки Кизеловского бассейна столкнулись с таким положением, когда целики

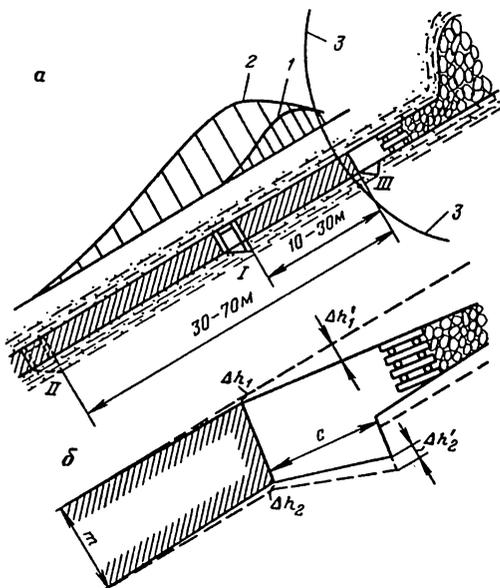


Рис. 10.4. Схемы к теоретическому обоснованию расположения горной выработки на границе с краем пласта угля (И.М.Петухов, 1956 [27]):

1 и 2 – зоны опорного давления соответственно на больших и малых глубинах; I, II и III – возможные места расположения штреков

перестали обеспечивать надежную охрану выработок: выработки деформировались, а в некоторых случаях заваливались в результате проявления горных ударов с разрушением надштрековых целиков. Имели место случаи, когда такие разрушения выработок происходили одновременно на десятках метров, вызывая тяжелые последствия как с точки зрения безопасности для горняков, так и для нормальной работы шахт.

Способ охраны выработок с помощью оставления около них целиков исчерпал себя. Возникла неотложная задача изыскания принципиально новых способов поддержания горных выработок для условий разработки угольных пластов на больших глубинах.

Наиболее рациональным оказался способ поддержания горных выработок без целиков.

Этот способ впервые получил теоретическое обоснование и практическое внедрение в промышленных масштабах для условий шахт Кизеловского бассейна, разрабатывающих пологие, наклонные и крутые удароопасные пласты [38].

Обратимся к рис 10.4 [38]. При поддержании штрека целиком (положение I на рис. 10.4, а) на небольших глубинах, когда ширина зоны опорного давления I не превышала размеры целика, целик действительно охранял выработку от чрезмерного горного давления. Однако на большой глубине, когда зона опорного давления 2 стала достигать 50–70 м и более, штрек попадает под сильное воздействие

зоны опорного давления и потому возникли большие осложнения с его поддержанием. На пластах, опасных по горным ударам, возникла возможность разрушения штрека горными ударами главным образом в результате разрушения надштрекового целика. Придерживаясь ранее установившейся традиции, можно было бы, конечно, увеличить размеры целика и в этом случае расположить штрек за пределами опорного давления (положение II). Тогда размеры целика должны определяться с учетом графика, приведенного на рис. 3.1, что крайне увеличит потери угля, вызовет большие технические неудобства и потому является неприемлемым.

Наиболее удачное расположение штрека оказывается на границе с выработанным пространством (положение III), где штрек фактически попадает в зону разгрузки (рис. 10.4, б). В положении III штрек, оказавшись за пределами зоны опорного давления, не представляет опасности с точки зрения проявления горных ударов. Понятно, что крепь в штреке в этом случае должна иметь достаточную податливость. Как установлено из опыта, например, шахт Кизеловского бассейна [38], необходимая податливость может быть рассчитана из следующих соображений. По нижней стенке штрека податливость должна быть равна приблизительно 10% мощности угольного пласта. По верхней стенке необходимая податливость определяется из расчета сближения пород 4–5 см/м плюс 10% мощности пласта.

Бесцеликовая схема поддержания горных выработок применяется с начала 1950-х годов на всех удароопасных угольных пластах Кизеловского бассейна. По этой же схеме в некоторых случаях поддерживаются и наклонные выработки, проведенные по угольному пласту. В работе [38] был сделан вывод о том, что при дальнейшем возрастании глубины горных работ целесообразно перейти к поддержанию горных выработок без целиков на всех пластах независимо от их

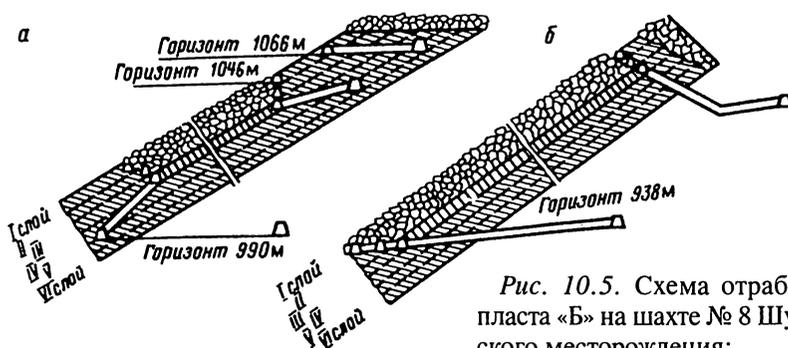


Рис. 10.5. Схема отработки пласта «Б» на шахте № 8 Шурабского месторождения:

а – с целиками; б – без целиков

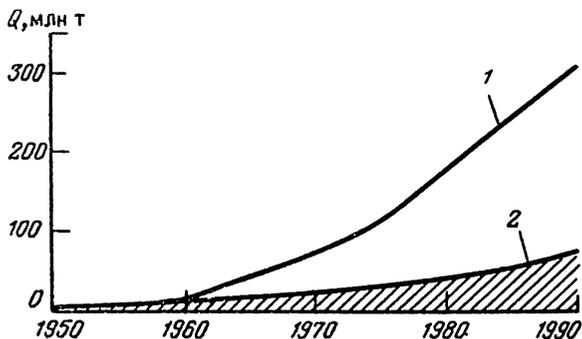


Рис. 10.6. Рост добычи угля Q по бесцеликовой схеме:
 1 – общая подземная добыча; 2 – с удароопасных пластов

мощности, угла наклона, состава вмещающих пород. При этом имелось в виду, что это относится ко всем шахтам, обрабатывающим как удароопасные, так и неудароопасные угольные пласты.

Заслуживает внимания способ поддержания горных выработок с помощью неудароопасных целиков на шахте «Центральная» в Воркуте. Ширина целиков в таких случаях должна быть равна мощности пласта плюс 1–2 м: такие целики легко деформируются и теряют возможность разрушаться в форме горного удара.

Применительно к переходу на бесцеликовое поддержание горных выработок при отработке мощного удароопасного пласта угля интересен опыт шахты № 8 Шурабского месторождения (рис. 10.5), осуществленный под руководством ВНИМИ и УГГА. После перехода на бесцеликовую отработку успешно решили вопросы как борьбы с горными ударами, так и с излишними потерями угля и эндогенными пожарами.

С конца 1950-х годов и начала 1960-х годов бесцеликовую схему поддержания горных выработок стали применять во всех бассейнах и месторождениях России, Украины, Казахстана при разработке пологих угольных пластов. Научное руководство по переходу на бесцеликовое поддержание горных выработок осуществлялось ВНИМИ*.

К началу 1990-х годов с применением бесцеликовой схемы добывалось до 76% угля на шахтах России, Казахстана, Украины и др., в том числе на всех шахтах, разрабатывающих удароопасные пласты (рис. 10.6).

Большой опыт повсеместного перехода на бесцеликовую добычу угля на шахтах СНГ достаточно полно освещен во многих работах (например, [23]). Поэтому здесь не будем касаться особенностей

* На удароопасных пластах – И.М.Петухов, Б.Ш.Винокур, А.А.Филинков и др.; на остальных пластах – Н.П.Бажин, В.В.Райский, Л.К.Нейман и др.

крепления выработок при бесцеликовом их поддержании, отметив, что в этих вопросах многое сделано. Следовало бы обратить внимание лишь на необходимость большого распространения бесцеликовой добычи угля, в том числе на крутые угольные пласты, как это было теоретически обосновано и широко применялось на шахтах Кизеловского бассейна еще в начале 1950-х годов [38].

Поддержание горных выработок в разгруженных зонах не ограничивается способом бесцеликовой выемки, описанным выше. Сюда относятся также многочисленные случаи поддержания камер различного назначения с частичной надработкой их с образованием зоны разгрузки, проведение и поддержание полевых выработок в зонах разгрузки [48], в том числе безопасное проведение и поддержание выработок по выбросоопасным песчаникам в Донбассе на участках, надработанных ранее угольными пластами.

Кроме бесцеликовой выемки угольных пластов, обеспечение поддержания горных выработок в зонах разгрузки осуществляется посредством расположения выработок в надработанных (подработанных) зонах, а также образования в окружающем массиве горных пород щелей различных размеров и конфигурации [38, 50].

Не останавливаясь подробно на этом очень эффективном для горной практики вопросе, достаточно хорошо освещенном во многих работах, рассмотрим в качестве примера случаи приведения в безопасное состояние грузолюдского ствола шахты «Ново-Кальинская» Северо-Уральского бокситового рудника. В указанном стволе после его проходки начались крупные горные удары, что сделало ствол совершенно непригодным к дальнейшей эксплуатации. В стенках ствола диаметром 9 м на протяжении около 200 м были сделаны щели толщиной приблизительно 10 см и глубиной по 2 м. Направление щелей было выбрано таким образом, чтобы их плоскость была перпендикулярна направлению действия максимального главного напряжения в массиве. После выполнения указанной щелевой разгрузки приствольной зоны пород от высоких напряжений горные удары в стволе полностью прекратились, и он стал пригодным к безопасной эксплуатации [50].

10.2.3. Управление безопасностью и энергоемкостью разрушения горных пород

Представляет значительный интерес вопрос, касающийся управления напряженным состоянием массива горных пород в процессе отработки полезного ископаемого или проведения горных выработок для повышения безопасности и эффективности ведения работ.

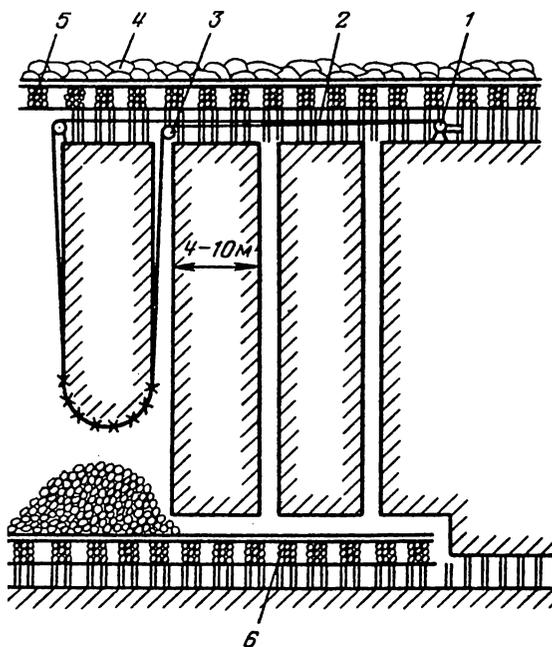


Рис. 10.7. Схема установки канатной пилы:

1 - лебедка ЛУ-16; 2 - канат; 3 - направляющий блок; 4 - породная подушка; 5 - кусты; 6 - накатник

Вначале господствовало представление о горных породах в массиве, прилегающем к горной выработке, как об инертном материале, имеющем определенные характеристики прочности, получаемые, как правило, в лабораторных условиях. Исходя из этих характеристик, определялись характер и усилия воздействия на породу при ее разрушении. Степень напряженности пород в месте необходимого ее разрушения в расчет не принималась.

Однако уже с начала 1950-х годов эти представления стали меняться. Оказалось, что горные породы в местах внедрения, особенно на больших глубинах, накапливают в себе большие запасы упругой энергии, которая непременно участвует в разрушении. Величина упругой энергии, степень ее участия в процессе внедрения режущего органа и другого разрушающего механизма может при желании регулироваться для обеспечения безопасности работ и повышения их эффективности [37, 50].

В 1988 г. эти представления получили отражение в открытии «Закономерность разрушения пород в подземных условиях» (Диплом № 337), о котором говорилось в 3.1.

Как следует из 3.1 (см. рис. 3.1 и 3.2), величина и степень влияния упругой энергии, накапливающейся в местах внедрения в угольный пласт, резко возрастает с увеличением ширины захвата добычной

машины (комбайна, врубовой машины, бурового снаряда и др.) и скорости внедрения. Поэтому, выбирая эти параметры, можно, с одной стороны, предотвратить хрупкое разрушение, скажем, угольного пласта в форме опасного горного удара, а с другой – добиться снижения конструктивного показателя измельчения угля, энергоемкости разрушения и металлоемкости применяемой добычной машины. Многочисленные шахтные исследования, проведенные в очистных забоях шахт Кизеловского, Донецкого, Печорского бассейнов, подтвердили эти основные положения по использованию упругой энергии. В Кизеловском и других бассейнах систематически работали свыше десятка лав на режиме управляемого хрупкого разрушения угля при работе комбайнов с регулированием скорости подачи.

В настоящее время выполняются работы по созданию автоматизированной системы управления скоростью добычной машины (комбайна) на базе непрерывной регистрации степени участия хрупкого разрушения в процессе выемки угля по показателям сейсмоакустической эмиссии и вибрации корпуса комбайна.

Для выемки угля на крутых пластах, склонных к хрупкому разрушению, разработаны: способ выемки и конструкция *канатной пилы с тонким режущим органом* (рис. 10.7 и 10.8), образующим в пласте щель высотой 30–90 мм [8]. Вызываемые в процессе работы канатной пилы толчки и микроудары завершают разрушение пласта на полную мощность вне зависимости от его мощности. Канатная пила с тонким режущим органом конструкции И.М.Петухова и А.А.Панькова стала применяться в Кизеловском бассейне с 1959 г. [37], а затем и в других бассейнах страны.

Опытные работы по выемке угля канатными пилами успешно выполнены под руководством ВНИМИ в 1959–1961 гг. более, чем на 40 крутых шахтопластах, имеющих мощность до 10–12 м, различных угольных месторождений России, Украины, Киргизии. Эти работы

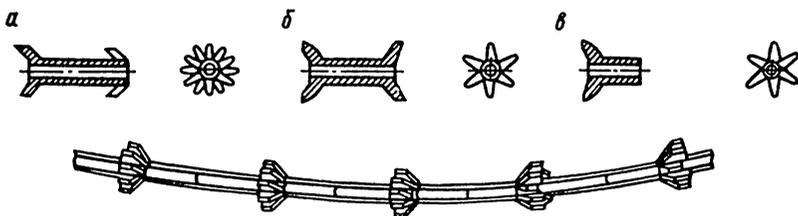


Рис. 10.8. Режущий орган, набранный фрезами типов:

а – двойная одностороннего действия со смещенными зубками второго ряда; б – двустороннего действия; в – одностороннего действия

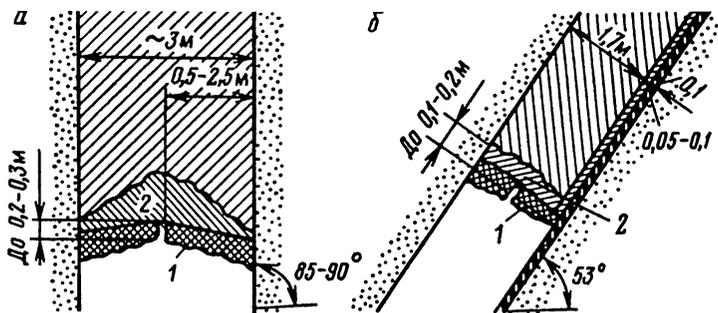


Рис. 10.9. Характер разрушения сильно напряженных пластов угля: а - на шахте «Нагорная»; б - на шахте № 33 - «Капитальная»; 1-2 - последовательность разрушения угольного пласта

показали, что обрушение угля отстает от режущего органа канатной пилы на различное расстояние. Отставание находится в обратной зависимости от величины горного давления, густоты криважных трещин, сложности строения, угла наклона и мощности угольного пласта. На рис. 10.9 и 10.10 приведены схемы, отражающие интенсивность разрушения при отработке пластов № 11 и 13, имевших различный уровень напряженности. Наиболее интенсивное разрушение, часто обгоняющее режущий орган пилы, имеет место при отработке пластов, опасных по горным ударам (шахты «Нагорная», № 33 «Капитальная», «им. Ленина» Кизеловского бассейна, № 10/16

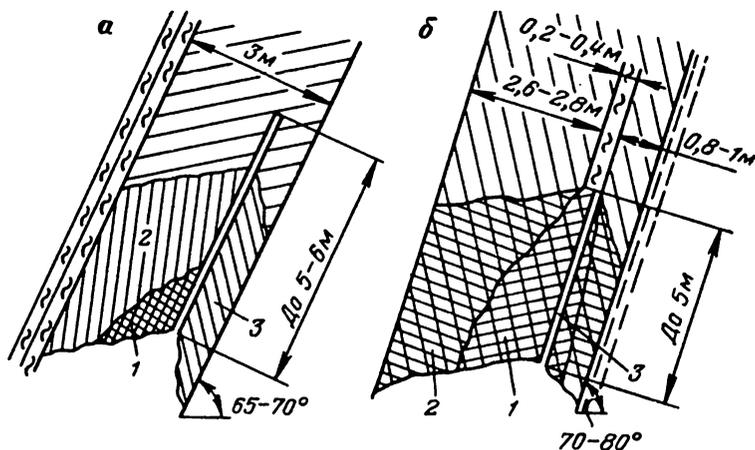


Рис. 10.10. Характер разрушения слабонапряженных пластов угля: а - на шахте № 62 «Восточная»; б - на шахте № 75; 1-3 - последовательность разрушения угольного пласта

Сучанского месторождения и др.). При мягких углях и невысоком уровне напряжений отставание обрушения забоя от режущего органа может достигать 5–6 м (см. рис. 10.10). Анализируя опыт использования канатных пил, можно считать экспериментально доказанным для большого диапазона строения и условий залегания крутых угольных пластов, что разрушение от одной узкой щели будет тем интенсивнее, чем больше угол наклона пласта, его мощность, глубина разработки, трещиноватость и слоистость пласта угля, а также чем опаснее пласт по горным ударам и внезапным выбросам. Механическому разрушению (дроблению, истиранию) при использовании канатной пилы подвергается лишь 1–6% мощности пласта, тогда как при комбайновой выемке непосредственному разрушению подвергается 20–80% пласта по мощности. Таким образом снижение энергоемкости разрушения достигается при применении канатной пилы в 8–10 раз.

При горно-экспериментальных работах в период 1959–1961 гг. с помощью канатных пил было добыто свыше 1,5 млн. тонн угля. Опытные работы с применением экспериментальных образцов оборудования проведены на крутых пластах мощностью от 0,5 до 6,5 м и выше в основных бассейнах и месторождениях страны. Дальнейшие работы по применению этого способа выемки угля были приостановлены на период создания специального оборудования. Для этого были составлены научно обоснованные технические условия на разработку конструкции установки канатной пилы для комплексной механизации выемки крутых пластов*. К сожалению, проектно-конструкторскими организациями работы по созданию оборудования не были выполнены и угольная промышленность до сих пор не использует этот эффективный, малоэнергоемкий и дешёвый способ выемки угля, имеющий достаточно большую область применения.

Идея по использованию энергии горного давления была применена позднее при совершенствовании проведения выработок комбайнами по выбросоопасным песчаникам в Донбассе с участием ИГТМ АН УССР (Ф.А.Абрамов, А.Н.Зорин и др.).

На рис. 10.11 приведены экспериментальные кривые (1–5), характеризующие удельные энергозатраты по разрушению пород при регулировании скорости подачи в пределах конструктивного диапазона рабочих скоростей комбайнов:

1 – шахта им. А.А.Скочинского, комбайн «Ясиноватец-2» с полусферическим рабочим органом, глубина от земной поверхности –

* Технические условия на разработку конструкции установок канатных пил для комплексной механизации выемки крутых пластов. ВНИМИ, Л., 1961, 17 с.

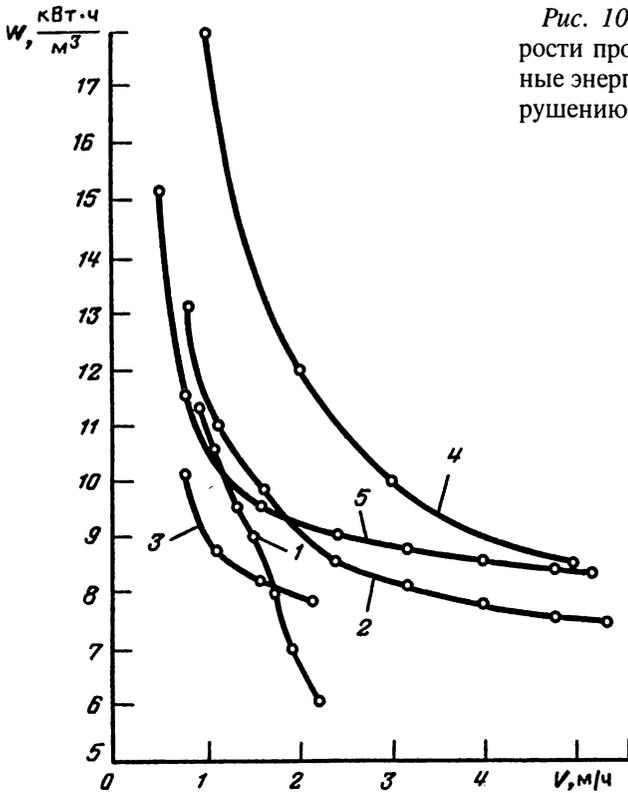


Рис. 10.11. Влияние скорости проходки V на удельные энергозатраты W по разрушению пород

1200 м, крепость песчаников по шкале М.М.Протождяконова $f=15$, площадь сечения выработки 12 м²;

2 - шахта им. XXV Партсъезда, комбайн КРТ с коническим расширителем, глубина работ - 800 м, $f = 8 \div 11$, площадь сечения выработки - 16,5 м²;

3 - то же, но с торовым рабочим органом;

4 - шахта им. А.Г.Стаханова, комбайн (проходческий комплекс) - «Союз-19»; $f = 6 \div 8$, глубина - 825 м, площадь сечения выработки - 20,6 м²;

5 - то же, комбайн «Союз-19У».

Приведенные графики наглядно показывают, что регулированием скорости подачи комбайна возможно в два-три раза снизить энергозатраты на разрушение пород и обезопасить себя от проявления выбросов породы и газа, если не допускать излишней скорости продвижения комбайна. На основании комплексных исследований разработаны практические рекомендации по использованию естественных

напряжений массива горных пород для интенсификации процесса разрушения пород. Рекомендации позволяют определить рациональные режимы разрушения горных пород, включая скорость подачи на забой в зависимости от степени напряженности пород.

При проведении выработок в сложных горно-геологических условиях, в том числе в выбросоопасных породах, нельзя безгранично увеличивать поток энергии к краевой части, так как может произойти выброс. Поэтому необходимо создать систему автоматического регулирования, которая, используя непрерывную во времени информацию о состоянии массива горных пород, позволяла бы задавать комбайну максимально допустимую скорость, обеспечивающую необходимое сокращение энергозатрат на разрушение породы, с одной стороны, и исключение выбросов породы – с другой.

Проблема управления напряженным состоянием массива горных пород, а также использования накопленной в нем упругой энергии становится все более актуальной по мере роста глубины разработки месторождений полезных ископаемых, бурения глубоких и сверхглубоких скважин и др. Реализация этой проблемы кроме повышения безопасности ведения работ может обеспечить их значительное удешевление.

О запасах упругой энергии в массиве горных пород можно судить из результатов расчета, выполненного применительно к бурению сверхглубоких скважин (рис. 10.12). Не учитывать наличие этих запасов неразумно и невыгодно для рационального освоения недр.

Добычная, проходческая или буровая машина при правильном учете напряженного состояния массива горных пород в месте разрушения породы должна *лишь управлять саморазрушением* пород под действием упругой энергии, содержащейся в ней, что позволяет ставить вопрос о создании малоэнергоёмких и малометаллоёмких ма-

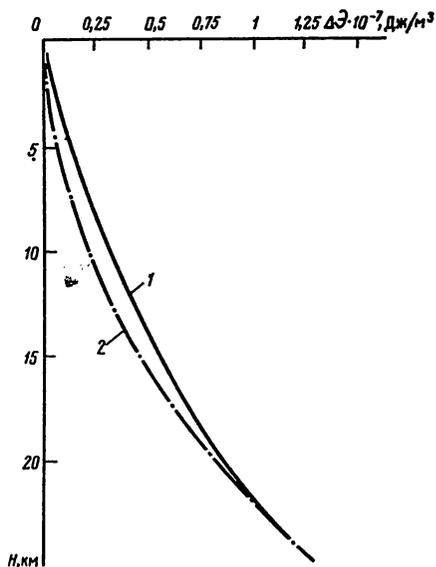


Рис. 10.12. Изменение притока энергии $\Delta \mathcal{E}$ в прискважинной зоне с возрастанием глубины H :

1 – в зонах сжатия активными горизонтальными силами; 2 – в зонах отсутствия активных горизонтальных сил

шин [37]. При этом процесс управления саморазрушением задается режимом работы разрушающего механизма, зависящим от характера поведения массива горных пород в процессе внедрения в него.

10.2.4. К управлению геодинамическим состоянием массива горных пород при очистных работах

При ведении очистных работ, например, на угольных месторождениях, применяются такие способы управления кровлей, как полное или частичное обрушение кровли, полная или частичная закладка выработанного пространства, плавное опускание кровли, поддержание кровли на целиках угля и некоторые другие модификации. К настоящему времени вопросы управления кровлей достаточно полно разработаны, созданы надежные виды крепей, в том числе механизированные и в значительной степени автоматизированные очистные комплексы для большинства встречающихся горно-геологических условий залегания и строения угольных пластов. Но все ли здесь уже сделано?

Представляется, что если вопросы поддержания рабочего пространства в очистном забое с помощью крепи решены, то осталась фактически не затронутой еще одна задача: нельзя ли обеспечить не только управление поведением кровли с помощью крепи, но и управление поведением кровли и самого угольного пласта для дальнейшего совершенствования самой крепи, повышения безопасности и снижения энергоемкости выемки угля. Особенно этот вопрос актуален при выемке ударо- и выбросоопасных угольных пластов. Это может быть достигнуто посредством выбора оптимальных ширины захвата добычной машины и скорости ее подачи [37] и специальным режимом работы механизированной крепи.

Обратимся к истории постановки этого вопроса, рассмотрев результаты отдельных горных экспериментов.

В одной из лав шахт «Буланаш» 1–2 Егоршинского месторождения встал вопрос о возможности предсказания во времени внезапного обрушения труднообрушающейся кровли. Дело в том, что существовала опасность прорыва воды из слоя опоковых глин, залегающих в 15–20 м выше пласта, в случае внезапного обрушения кровли в лаве. Инструментальные наблюдения за сближением боковых пород в лаве проводились бригадой ЦНИМБа* (Д. В. Родкевич, И. М. Петухов и др.).

По результатам наблюдений было установлено, что начиная с 9 июля 1943 г. началось устойчивое ускорение сближения боковых пород, что являлось свидетельством ухудшения состояния кровли. Это

* В настоящее время ВНИМИ.

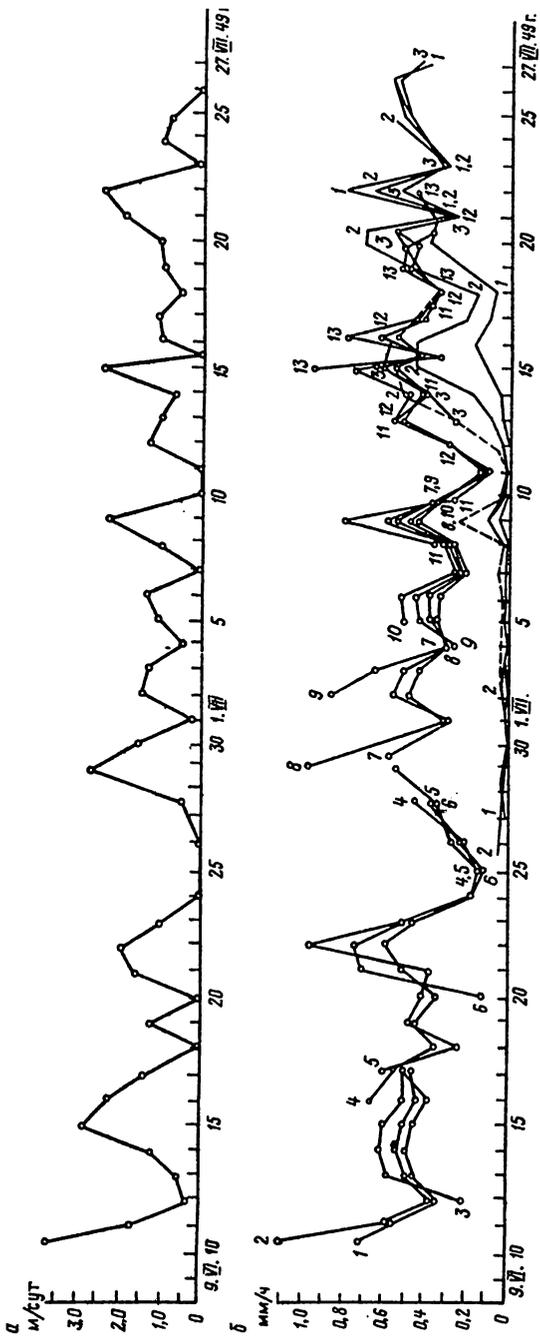


Рис. 10.13. Результаты инструментальных наблюдений в лаве № 313 шахты № 63 Кизеловского бассейна (по И.М.Петухову и Г.В.Романову):

а – изменение скорости подвигания очистного забоя; *б* – изменение скорости смещений по нормали к пласту; 1–13 – отдельные серии инструментальных наблюдений в лаве

дало возможность предупредить руководство шахты о надвигающемся нарушении кровли. Шахтой были приняты соответствующие меры безопасности на случай обрушения кровли и возможного прорыва воды, и все закончилось благополучно.

Имея такой опыт оценки состояния кровли по ускорению или замедлению ее оседания (вернее, сближения кровли и почвы), в 1948–1949 гг. была поставлена другая, более сложная задача – нельзя ли повлиять на поведение труднообрушаемой кровли регулированием скорости подвигания очистного забоя.

Инструментальные наблюдения бригадой ВНИМИ под руководством И.М.Петухова проводились в лаве № 313 по пласту № 13 шахты № 63 в г. Гремячинске (Кизеловский бассейн). Угольный пласт с углом падения 60° имел мощность 1,5–2,7 м. Кровля пласта представлена кварцевым песчаником мощностью 15–16 м. Отбойка угля производилась буро-взрывным способом. Длина лавы 60 м. Управление кровлей осуществлялось по способу «разрез – завал». Ширина блоков (участков между обрушениями кровли в лаве, ограниченных целиками угля) по простиранию составляла 40–50 м, ширина целиков между блоками около 10 м.

Наблюдения были проведены в трех блоках. Результаты наблюдений представлены на рис. 10.13. При сопоставлении верхних и серии нижних графиков видно, что чем больше скорость подвигания очистного забоя, тем выше скорости сближения кровли и почвы и, наоборот, с замедлением скорости подвигания забоя наблюдается снижение скоростей сближения пород в лаве и, следовательно, улучшение состояния кровли с точки зрения предотвращения ее обрушения. Когда эта зависимость была установлена при отработке первых двух блоков шириной по простиранию соответственно 50 и 42 м, руководству шахты было предложено использовать представившуюся возможность управления поведением кровли за счет регулирования скорости подвигания очистного забоя для того, чтобы не допустить очередного обрушения кровли в лаве и таким образом избежать необходимости новой разрезки лавы. Это было тем более желательно, что лава приближалась к границе шахтного поля и целесообразно было ее довести до границы без обрушения.

Совместными усилиями исследователей ВНИМИ и руководства шахты (директор П.Д.Васенок) было осуществлено управление поведением кровли посредством регулирования скорости подвигания забоя, в результате чего удалось отработать блок шириной до 115 м, где забой лавы № 313 был остановлен у границы шахтного поля.

Этот первый в истории горного дела случай убедительно показал, какие большие возможности скрыты в изучении геомеханического

состояния массива горных пород и использование результатов этого изучения для управления этим состоянием при совершенствовании технологии ведения горных работ.

Применительно к разработке угольных месторождений задача в этом направлении может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо разработать автоматизированную систему управления режимом работы комплексно-механизированной лавы, которая предусматривала бы оптимальную скорость подвигания добычной машины (или забоя в целом) при данной ширине захвата, обеспечивающую наиболее надежную и экономичную работу механизированной крепи, и наиболее безопасное и эффективное разрушение угля в забое, включающее снижение энергоемкости работы комбайна, предотвращение опасных динамических явлений, нежелательных как для комбайна, так и для самой механизированной крепи.

Выполнение работ в этом направлении открыло бы возможность кардинального совершенствования комплексов оборудования, предназначенных для управления кровлей и разрушения угольного пласта, и прежде всего в целях снижения их энерго- и металлоемкости.

10.3. ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

10.3.1. Обоснование постановки задачи

При разработке нефтяных и газовых месторождений постепенно выявляются существенные дополнительные осложнения, связанные с повышением напряженного состояния массива горных пород и самих продуктивных пластов. На рис. 10.14 приведены результаты расчетов проницаемости нефтеносного песчаника с учетом глубины его залегания. Из приведенных графиков следует, что если не применять каких-то особых мер, то, начиная с некоторых глубин, эксплуатация продуктивных пластов станет практически невозможной.

Представляется, что тернистый путь по переходу к масштабному управлению геодинамическим состоянием массива пород, осваиваемый угольщиками, в настоящее время оказывается весьма полезным для разработчиков нефтяных и газовых месторождений, где в последние годы все острее встает вопрос о необходимости повышения нефтегазоотдачи продуктивных пластов и притоков флюидов в скважины. Назрела задача решения этих вопросов через целенаправленное региональное управление напряженным и газогидродинамическим

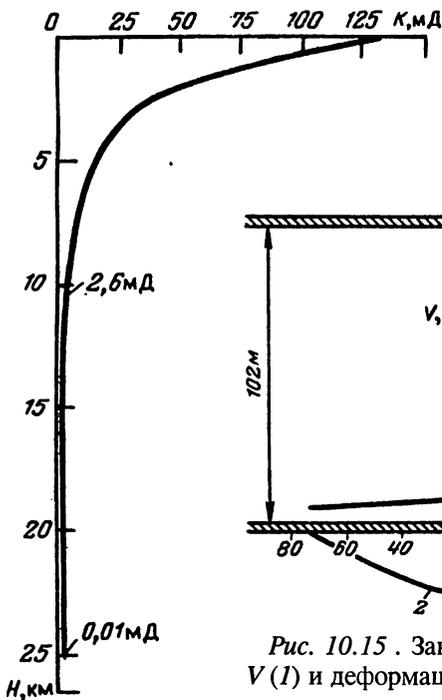


Рис. 10.14 (слева). Изменение проницаемости нефтеносного песчаника K с возрастанием глубины залегания H продуктивного пласта

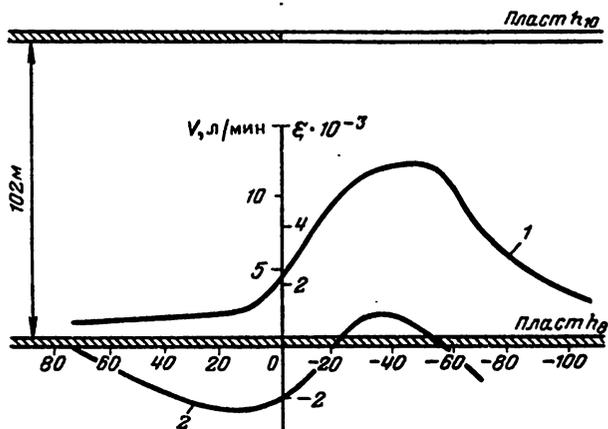


Рис. 10.15. Зависимость скорости газовыделения V (1) и деформации пласта ε (2) при его надработке

состоянием горного массива горных пород и прежде всего, конечно, – самих продуктивных пластов.

Многочисленные наблюдения в шахтах, как и лабораторные испытания, свидетельствуют о сильной зависимости характеристик от напряженного состояния. На рис. 10.15 приведена зависимость скорости газовыделения из угольного пласта в процессе его надработки очистным забоем по пласту угля, располагающемуся на 102 м выше. При этом, конечно, необходимо иметь в виду, что чем ближе располагается надрабатываемый пласт, тем интенсивность его влияния выше.

Аналогичные прямые инструментальные наблюдения при отработке жидких или газообразных полезных ископаемых практически отсутствуют, однако можно предположить, что и в этих условиях отработка одного или нескольких продуктивных пластов оказывает существенное влияние на соседние пласты. При этом могут создаваться условия, при которых в одном районе соседнего к разрабатываемому продуктивного пласта возникнет разгрузка от напряжений с повышением проницаемости коллектора, в другом же месте, наоборот, образуется пригрузка, сопровождающаяся снижением проницаемости пород. Бессистемная отработка продуктивных пластов может привести

к такому перераспределению напряжений в массиве горных пород, при котором в некоторых случаях произойдет неоправданное снижение пластового давления и др. Выбор общего направления отработки месторождения без учета блочного строения и напряженного состояния массива горных пород, часто крайне неравномерного, также может быть сопряжен с неблагоприятными условиями его отработки.

Все это, по мнению авторов, ставит четкую задачу о необходимости производить опережающее по отношению к освоению месторождения изучение блочного строения массива горных пород и его геомеханического состояния. Для этого необходимо использовать метод геодинамического районирования недр [4, 10], нашедший в последние годы достаточно широкое применение при разработке угольных и рудных месторождений России, при строительстве и эксплуатации других важных объектов освоения недр и земной поверхности (см. главу 7).

10.3.2. К управлению напряженным состоянием продуктивных пластов

Проблема управления напряженным состоянием продуктивных пластов в нефтяной и газовой промышленности является совершенно новой, однако имеются определенные предпосылки для ее успешного решения уже в настоящее время.

Представляется возможным с помощью метода геодинамического районирования рассчитывать напряжения, проницаемость и влагогазоемкость продуктивных пластов не только на период разведки месторождения в естественном состоянии массива пород, но и любой период отработки месторождения, т.е. с учетом степени техногенного воздействия на него, составляя прогнозные карты на дальнейшие этапы отработки месторождения. Этот комплекс знаний позволит прежде всего существенно уточнить схему расположения разведочных и эксплуатационных скважин. Наличие прогнозных карт дает возможность избирать в каждом случае наиболее удачный способ управления геомеханическим состоянием массива для повышения нефтегазоотдачи пластов и притоков флюида в скважины, максимально используя влияние зон пригрузки и разгрузки в массиве горных пород, возникающих в процессе эксплуатации месторождения.

Осуществление такого порядка отработки месторождения должно производиться в соответствии со следующей схемой*. Выбирается

* А.с. 1047234 (СССР). Способ разработки нефтяных и газовых месторождений. / И.М.Петухов, Л.М.Марморштейн, В.П.Кузнецов, В.С.Сидоров и др. – Опубл. в Б.И., 1981.

продуктивный пласт, который должен обрабатываться первым в свите, вызывая своей разработкой появление разгруженных зон на соседних пластах. В качестве разгружающего должен разрабатываться пласт-коллектор с наиболее высоким объемом жидкой или газообразной фазы, с повышенными фильтрационными свойствами, высоким пластовым давлением.

Откачку флюида при этом развивают поступательно, создавая фронт (забой) откачиваемой жидкости с появлением перепада пластового давления на соседних пластах. Последующие пласты вводятся в отработку с определенным отставанием, осуществляя ее в зоне активной разгрузки пород от напряжений и, следовательно, высокой проницаемости, что позволит резко увеличить притоки по скважинам. Расчеты размеров зон разгрузки от напряжений, необходимых соотношений разработки соседних пластов могут быть выполнены с учетом теоретических и экспериментальных разработок ВНИМИ [48, 50].

10.3.3. Щелевая разгрузка прискважинной зоны

Другим важным вопросом является управление интенсивностью притоков флюида в скважину посредством разгрузки от напряжений прискважинной зоны, что обеспечит многократное увеличение проницаемости пород в этой области. В 1970-х годах был разработан способ увеличения проницаемости продуктивного пласта за счет щелевой разгрузки прискважинной зоны*. В основу способа щелевой разгрузки легли положения теории защитных пластов [48] и результаты многолетних лабораторных исследований, выполненных начиная с 1958 г. сотрудниками ВНИМИ и ВНИИОкеангеология под руководством Л.М.Марморштейна и И.М.Петухова по изучению проницаемости коллекторов в условиях сложного напряженного состояния.

Как показано на рис. 10.16, вертикальные щели толщиной не менее 3 см и шириной не менее двух диаметров скважины прорезаются в обе стороны от нее на высоту всей или значительной части мощности продуктивного пласта, но не менее 10 диаметров скважины (допускаются технологические перемычки шириной по 10–15 см). Указанные параметры щелей необходимы для предотвращения их смыкания и обеспечения постоянного эффективного действия разгрузки [48]. Способ щелевой разгрузки к настоящему времени хорошо разработан во многих модификациях для вертикальных и горизонтальных участков скважин.

* А.с. 501146 (СССР). Способ увеличения проницаемости продуктивных пластов. / И.М.Петухов, Л.М.Марморштейн, В.С.Сидоров, О.Д.Казанцев. – 1976. Бюл. № 4. Имеются патенты в России и США. у

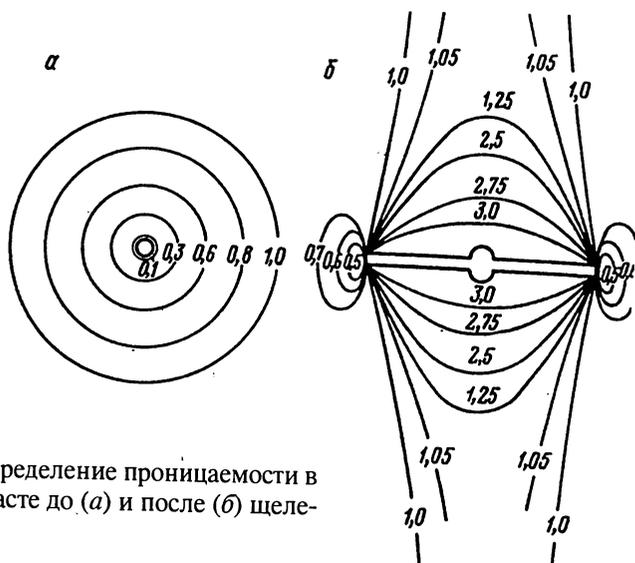


Рис. 10.16. Распределение проницаемости в продуктивном пласте до (а) и после (б) щелевого вскрытия

Образование щелей с обеих сторон скважины в пределах продуктивного пласта позволяет разорвать кольцо высоких напряжений в горных породах, имеющих место вокруг скважины. При этом напряжения сосредотачиваются вблизи внешних торцов щелей с образованием широкой зоны разгрузки от напряжений в наибольшей части окружающих скважину пород. На рис. 10.16, б приводится схема, иллюстрирующая изменение проницаемости пород в прискважинной зоне. Проницаемость пород до бурения скважины принята равной единице.

Щели создают обычно гидropескоструйным способом. Оборудование разработано и имеется в ряде специализированных организаций в достаточном количестве.

Опытные работы по применению щелевого вскрытия за последние двадцать лет выполнены более чем на 500 скважинах и эпизодически продолжают проводиться на отдельных месторождениях нефти и газа. В подавляющем большинстве случаев щелевое вскрытие продуктивных пластов является весьма эффективным (табл. 10.4).

На рис. 10.17 и 10.18 для иллюстрации приведены данные о применении щелевой разгрузки на одной эксплуатационной и одной агнетательной скважинах месторождений Удмуртии.

Значительное увеличение притоков флюида в скважины после щелевой разгрузки обусловлено суммарным действием следующих факторов: эффектом увеличения проницаемости коллектора, увеличением площади фильтрации, вымыванием глинистых частиц в результате снятия нагрузки, выходом за зону кон-

Таблица 10.4

Номер скважины	Назначение скважины	Наименование (площади, залежи)	Глубина залегания, м	Эффективная мощность, м	Производительность		
					до щелевой разгрузки, м ³ /сут.	после щелевой разгрузки, м ³ /сут.	увеличение, раз
<i>Месторождения Удмуртии</i>							
689	Р	Сушинская	1890	3,2	0,4	7,8	19,5
411	Р	Сушинская	1224	1,6	-	13,8	-
1080	Р	Центральная	1196	2,2	-	2,2	-
222	Р	Лиственская	1195	3,7	11	43,4	3,5
593	Д	Киенгопская	1226	9,8	9,3	28,6	3
588	Д	Киенгопская	1296	8,6	7,4	20,3	2,74
261	Д	Чебутырская	1275	5,5	1,3	4,5	3,5
495	Д	Киенгопская	1238	13,2	0,9	4,6	5,1
360	Д	Киенгопская	1270	5	2,7	13,4	4,9
2121	Д	Мишкинская	1129,2	6,6	1,8	6,8	3,8
3973	Н	Биковская	1315	6	10	80	8
3917	Н	Биковская	1420,5	8,1	10	200	20
1106	Н	Чутырская	1279,8	11,6	58	130	2,22
<i>Другие месторождения</i>							
968	Р	Каракулинская (Татария)	996,5	6	0,24	1,1	4,6
790	Р	Европейская (Пермская обл.)	1302,5	2,6	0,7	40	57
23	Р	Оверятская (Пермская обл.)	1540	45	3,5	36,4	
Р-265	Р	Уренгойская	3711	6	-	Ф	-
7	Р	Андрияшевская (Украина)	5249	12	100	1000	10
12	Р	Западно-Ровенская (Саратовская обл.)	4919	8,5	2000	60000	30
17	Р	Западно-Ровенская	4894	9,2	1500	70000	46,7
2942	Д	Дупаширская	1494,8	4,8	1,8	10,8	6
117	Д	Кулиновская (Поволж.)	2823	1,5	0,5	3	6
3	Д	Оренбургская газоконденсатная	872	6	50000	90000	1,8

Примечание: Р – разведочная, Д – добывающая, Н – нагнетательная, Ф – фонтан газа и конденсата.

Рис. 10.17. Возрастание притоков флюидов в эксплуатационной скважине № 593 (Киенгопская площадь) после щелевой разгрузки

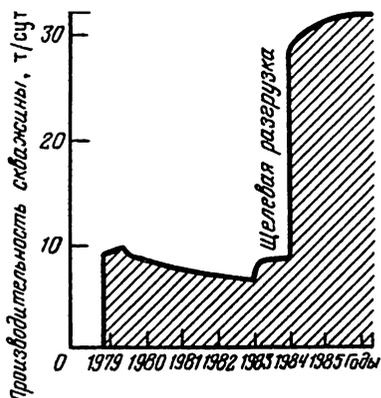
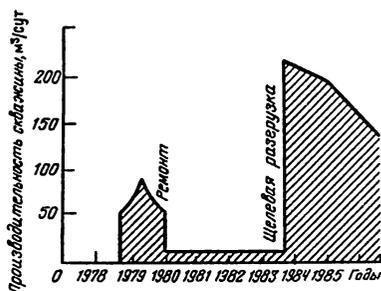


Рис. 10.18. Увеличение производительности нагнетательной скважины № 39 – 17 после щелевой разгрузки



Повсеместное применение щелевой локальной разгрузки прискважинной зоны, в том числе в сочетании с другими многочисленными способами интенсификации притоков, может дать большие экономические выгоды. Крупный успех здесь можно ожидать при научно обоснованном выборе мест заложения разведочных шахт и при интерпретации результатов, полученных в части их перспективности и подсчета запасов. Особенно полезным метод щелевой разгрузки может оказаться при «оживлении» ранее отработанных скважин с возобновлением промышленных притоков на них. В данном случае имеется в виду возобновление эффективной разработки месторождений нефти и газа, считающихся уже отработанными.

10.3.4. Некоторые практические задачи

Региональное и локальное управление геомеханическим состоянием массива горных пород в целом и самих продуктивных пластов позволит кардинально повысить как притоки флюида в скважину, так и нефтегазоотдачу на месторождениях нефти и газа, в том числе наиболее сложных по освоению.

В этом направлении необходимо:

проведение квалифицированной экспертизы по оценке геомеханического состояния продуктивных пластов практически на всех месторождениях для разработки рекомендаций по повышению эффективности разведки, нефтегазоотдачи и притоков, возобновлению добычи на «отработанных» скважинах;

внедрение щелевой разгрузки прискважинной зоны в сочетании с другими методами интенсификации притоков на всех глубоких скважинах, как действующих, так и уже отработанных;

постановка фундаментальных научных и экспериментальных работ по разработке и совершенствованию способов управления напряженным и газогидродинамическим состоянием продуктивных пластов на базе геодинамического районирования недр, рассматривая это как один и очень серьезный источник кардинального повышения качества разведки нефтяных и газовых месторождений, полноты и экономичности их извлечения, безаварийности транспортирования нефти и газа.

10.4. ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ, ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ДРУГИХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

Использование данных геодинамического районирования в части выделения разломов, степени их активности и взаимодействия представляет большой интерес для достижения безопасности и экологической чистоты при эксплуатации продуктопроводов, железных дорог и других протяженных объектов.

Анализ случаев аварийности на многочисленных нефтепроводах и газопроводах, эксплуатирующихся на территории СНГ, показывает, что большинство аварий, причины которых при расследовании квалифицированы как «коррозия металла», «дефект труб» и «брак сварки», – а таких аварий свыше 60% – происходит в местах пересечения трубопроводами крупных активных разломов в земной коре.

На рис. 10.19 приведена схема расположения активных разломов I ранга, трубопроводов и мест крупных аварий, происшедших на них в одном из районов России. Из представленных материалов четко усматривается, что аварийность приурочена к местам пересечения трубопроводами активных разломов.

Таким образом, с помощью геодинамического районирования представляется возможным выполнить квалифицированную экспер-

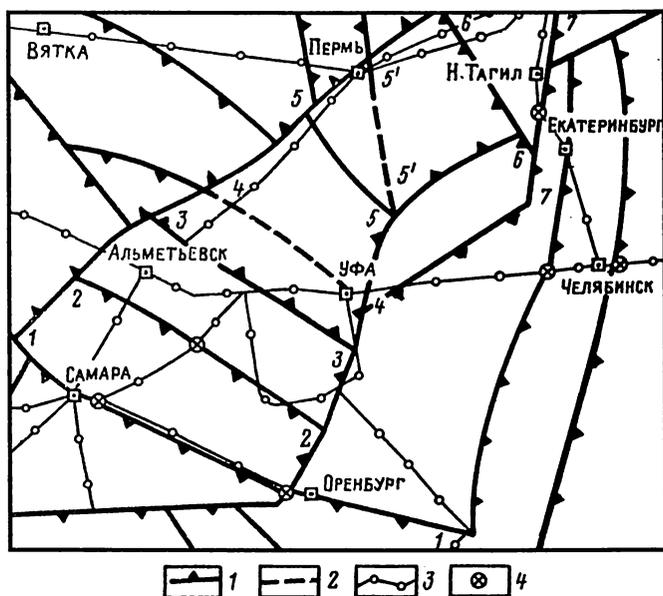


Рис. 10.19. Схема расположения активных разломов I ранга и мест отдельных случаев аварий на продуктопроводах:

1 – разломы; 2 – развивающиеся разломы; 3 – трасса трубопровода; 4 – место аварий

тизу территорий вдоль трасс действующих и проектируемых трубопроводов в целях применения профилактики для кардинального снижения их аварийности в местах пересечения активных разломов. Аналогичная картина аварийности в районах активных разломов имеет место и на железных дорогах. Подтверждением тому является выполненный анализ по трассе дороги Санкт-Петербург–Москва–Кемерово (см. главу 7).

10.5. ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ И ГОРОДОВ

Управление безопасностью строительства и эксплуатации ответственных подземных и наземных сооружений, мест захоронения вредных отходов и других важных объектов состоит в том, чтобы научно обоснованно выбирать район их размещения с учетом блочной строения массива горных работ и земной поверхности на основе результатов геодинамического районирования недр (см. главу 7).

10.6. ПРИ БУРЕНИИ ГЛУБОКИХ И СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИН

Осуществление программы сверхглубокого бурения скважин переживает значительные трудности. Одна из наиболее значительных – недостаточное теоретическое обоснование и техническое обеспечение процесса бурения из-за отсутствия надежной теории бурения в необычных условиях больших глубин. Существующая теория бурения создана для условий, когда бурение происходит в массиве горных пород, напряжения в котором не превышают предела прочности породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$. Между тем как при бурении скважин на глубину до 12–15 км и более радиальные напряжения, особенно в районах действия высоких горизонтальных сил, могут в три–пять раз превышать $\sigma_{сж}$. Поведение пород в процессе бурения в этих случаях существенно различается.

Рассмотрим этот важнейший вопрос несколько подробнее. Известно, что при бурении скважин на сравнительно небольших глубинах алмазными коронками удавалось достаточно удовлетворительно отбирать керн. Начиная же с некоторых глубин, отбор керна стал затруднительным: керн распадается на диски, а с дальнейшим углублением – на отдельные кусочки [37].

Рассмотрим схему распределения напряжений s_y в плоскости, проведенной через ось скважины (рис. 10.20, а). В керне образуется конус разгрузки АОВ, высота которого от плоскости, проведенной через забой скважины, равна радиусу керна r . В результате того, что разгрузка от напряжений начинается впереди забоя скважины, основание конуса разгрузки имеет сферическую форму. По этой сферической поверх-

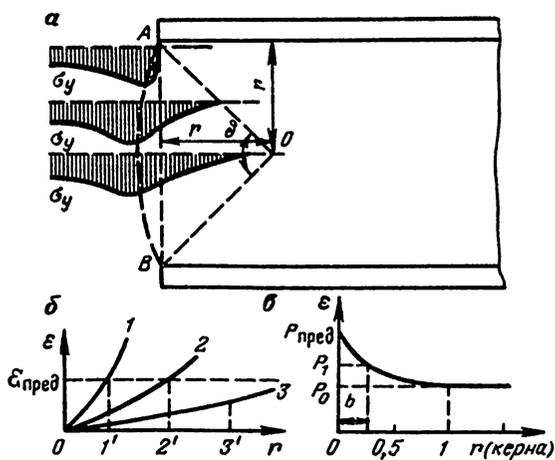


Рис. 10.20. Механизм раскалывания керна на диски:

а – распределение напряжений в выбуриваемом керне; б – зависимость величины ε от внутреннего радиуса кольца среза; в – зависимость срезающей силы от толщины диска

ности будут действовать максимальные касательные напряжения. Так как абсолютная величина деформации расширения керна накапливается в направлении от оси его к образующей, срез может произойти прежде всего по кольцу, наиболее удаленному от оси керна.

Для каждой породы (угля) существует своя деформация $\epsilon_{\text{пред}}$, превышение которой приведет к срезу. Зависимость величины внутреннего радиуса кольца среза (внешним радиусом является радиус керна) от абсолютной деформации e , возникающей при разном напряженном состоянии, приведена на рис. 10.20, б. Опустив перпендикуляр на ось абсцисс из точки пересечения кривой 1, отражающей рост абсолютной деформации с удалением от оси скважины при данном напряженном состоянии, с горизонтальной линией, соответствующей $\epsilon_{\text{пред}}$, можно установить внутренний радиус кольца (в данном случае он равен $0 \div 1$). В случаях пониженного напряженного состояния кольца (кривая 2) величина радиуса соответственно возрастает, наконец, если кривые деформации располагаются ниже $\epsilon_{\text{пред}}$ (кривая 3), раскалывание керна на диски исключается практически при любом диаметре керна.

Образование кольца среза, ширина которого при прочих равных условиях зависит от напряженного состояния и диаметра керна, приводит к сколжению неровной поверхности кольца по неровной поверхности массива породы, в результате чего центральная часть керна отрывается под воздействием возникающих при этом напряжений отрыва. Отрыв керна произойдет тем легче, чем больше ширина кольца среза и меньше диаметр керна. Иногда отрыв вообще не происходит и на выбуренном керне видны лишь трещины, которые образовались по кольцу среза, имеющему незначительную ширину. Раскалывание на диски может произойти лишь при определенном соотношении ширины кольца среза и диаметра керна. Следует отметить, что в случаях, когда напряжения σ_y и σ_x неодинаковы, кольцо среза будет представлять собой не окружность, а эллипс, вытянутый в направлении действия меньшего напряжения σ_x .

Проследим, от чего зависит толщина дисков, на которые раскалывается керн. Порода в части керна, попавшей в пределы конуса разгрузки, удерживается в напряженном состоянии в результате сопротивления срезу по сферической поверхности основания конуса разгрузки. Величина срезающей силы P при прочих равных условиях зависит от длины выбуренного керна.

Рассмотрим схему на рис. 10.20, в. Если срезающая сила будет меньше P_0 , то керн не будет раскалываться на диски. При силе P_1 будет происходит разделение керна на диски толщиной v . При срезающей силе $P_{\text{пред}}$ порода будет разрушаться непосредственно у передового края обуривающей коронки и, следовательно, образование керна вообще исключается.

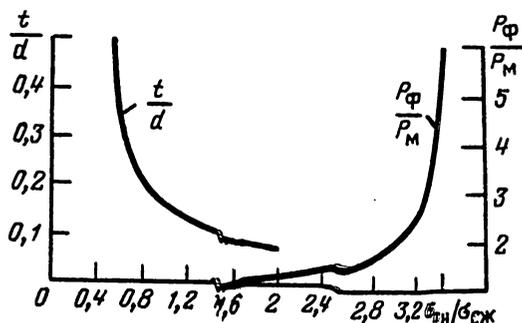


Рис. 10.21. Зависимость раскалывания керна на диски и выход буровой мелочи от напряженного состояния:

t – толщина диска; d – диаметр скважины; P_{ϕ} и P_n – фактический и номинальный вес буровой мелочи соответственно; σ_r – радиальное напряжение; $\sigma_{ск}$ – предел прочности при сжатии.

половины $\sigma_{ск}$, а при радиальных напряжениях – около $2\sigma_{ск}$ исключается образование керна и начинается выход буровой мелочи. При больших же радиальных напряжениях выход буровой мелочи превышает номинальный в два-пять и более раз.

Как мы уже отмечали в параграфе 2.2, при бурении скважин по углю в зонах опорного давления на глубинах 1000 м выход буровой мелочи может превышать номинальный в 5 ÷ 10 ÷ 30 и более раз. Были случаи при бурении скважин в шеликах угля, например, на шахтах Воркуты, когда выход буровой мелочи превышал номинальный в 100 и более раз.

Если принять во внимание, что указанный объем буровой мелочи на крепких породах обязательно образуется в результате хрупкого разрушения, т.е. в результате динамических явлений типа горного удара, то становится понятной одна из причин аварийности при бурении глубоких скважин – внезапный зажим бурового инструмента без какой-либо возможности устранить его последствия. Кроме того, возникает кавернообразование в стенках скважины и аварийность по этой причине. Именно имея в виду указанный тип аварийности при бурении глубоких скважин, автор совместно с Н.Д.Деркачем еще в начале 1970-х годов поставил, а позднее и решил задачу по разработке конструкции и сооружению в специальном полигоне в г.Перми давяльной установки «Геоэнергия» (см. рис. 6.2 и 6.3).

* Работы проводились под руководством И.М.Петухова и А.П.Запрягаева.

Проведение фундаментальных исследований на установке «Гео-энергия» позволит получить объективные данные, необходимые для создания теории бурения глубоких и сверхглубоких скважин в экстремальных термодинамических условиях больших глубин.

10.7 ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД*

10.7.1. Состояние вопроса

В пятидесятые и последующие годы были построены специальные сейсмические станции на шахтах Кизеловского бассейна, Ткибульского месторождения, на рудниках Таштагола, СУБРа, Норильска (под руководством В.А.Смирнова, И.М.Петухова и др.). Сейсмическая станция была построена также в Апатитах (под руководством А.А.Козырева и др.). На базе этих станций представилась возможность организовать разработку и широкое использование методов регионального прогноза удароопасности по месту с учетом фактора времени, что в значительной степени повысило безопасность развития горных работ на удароопасных угольных и рудных месторождениях.

ВНИМИ накоплен почти 20-летний опыт исследований напряженного состояния и удароопасности горных пород на шахтах и рудниках на основе мониторинговых микросейсмических наблюдений.

Основные задачи, которые при этом могут быть решены на основе этих исследований, следующие:

оценка величины напряжений, снимаемых в очаге в момент горного удара, землетрясения или другого динамического явления;

изучение механизма протекания динамического явления (его кинематика и динамика);

определение вклада, вносимого сейсмическими процессами в изменение напряженного состояния нетронутого массива в связи с развитием горных пород;

классификация динамических явлений по их динамическим параметрам (энергии, магнитуде, бальности);

осуществление прогноза горных ударов по месту их проявления, путем микросейсмрайонирования шахтных полей;

осуществление прогноза горных ударов по их силе.

* Составлено с участием С.Н.Мулева.

Микросейсмологический метод оценки напряженного состояния основан на регистрации, изучении и анализе сейсмических колебаний в инфразвуковом диапазоне частот.

Система наблюдений стационарная и предусматривает сбор и передачу сейсмической информации одновременно от ряда датчиков, установленных в различных частях массива горных пород (в шахте и на поверхности), по кабельным линиям связи к центральному пункту регистрации (собственно сейсмостанции).

Максимальная дальность передачи сейсмической информации по кабелю – 10 км, максимальное число одновременно регистрируемых телеметрических каналов – 6. Максимальный уровень усиления 45 дБ.

Информативные параметры, регистрируемые системой: время вступления различных типов сейсмических волн в пункты наблюдений (продольных P , поперечных S , поверхностных R , L и других), их длительность, амплитуда, частота затухания, спектральный состав.

Параметры, вычисленные на основе исходных данных: скорости сейсмических волн в массиве (продольных волн V_p , поперечных V_s , поверхностных V_R); время в очаге (T_0); координаты очага (x_0, y_0, z_0); сейсмическая энергия (E); магнитуда (M); бальность (J_0); напряжения, снимаемые в очаге (σ); размеры очага (R_0) и другие.

Основной характеристикой напряженного состояния, позволяющей выделять зоны повышенных напряжений в массиве пород, является величина сейсмической активности.

Под этой величиной понимается число толчков определенного энергетического класса, происшедших за определенный отрезок времени в определенном объеме пород.

Как показал опыт работ ВНИМИ, эта величина хорошо коррелируется с максимальными касательными напряжениями, которые по критерию Кулона-Андерсена и являются ответственными за процесс разрушения пород в очаге*.

Следовательно, выделяя на разрезах шахтных полей зоны повышенной сейсмической активности, можно тем самым найти и зоны повышенных максимальных касательных напряжений, формирующиеся за счет действия ряда горно-геологических и горнотехнических факторов.

* Согласно модели Кулона-Андерсена разрыв – скольжение одной части массива относительно другой происходит при выполнении условия:

$|\tau_{\max}| \geq S + kP_{\text{нн}}$, где S – значение максимальных касательных напряжений, которые выдерживают рассматриваемые породы;

k – коэффициент внутреннего трения пород;

$P_{\text{нн}}$ – нормальные напряжения, действующие на площадке максимальных касательных напряжений.

Главными из них обычно являются:
негоризонтальное залегание рельефа земной поверхности;
наличие крупных геологических нарушений;
слоистость массива горных пород и чередование слоев различной прочности;

переменная мощность слоев полезных ископаемых;
большая глубина залегания угольных пластов и рудных залежей;
технология выемки (с целиками, без целиков и т. п.);
величина бокового распора пород.

В результате действия указанных факторов в нетронутом массиве горных пород и возникают зоны повышенных и пониженных напряжений.

Развитие горных работ приводит к возникновению дополнительных напряжений, которые на отдельных участках могут складываться с напряжениями нетронутого массива, создавая удароопасную ситуацию, если породы на этом участке склонны к хрупкому разрушению.

При регистрации динамических явлений в шахтах используется система наблюдений, при которой наблюдаемые сейсмопавильоны располагаются так, чтобы датчики охватывали равномерно весь исследуемый участок шахтного поля или нескольких шахтных полей.

С этой целью наблюдательные сейсмопавильоны располагаются как на земной поверхности, так и на различных горизонтах шахт.

Минимальное число наблюдательных сейсмопавильонов на одно шахтное поле – 4, если известен скоростной разрез среды. Наиболее оптимальное число наблюдательных сейсмопавильонов – 5. Каждый из наблюдательных сейсмопавильонов представляет собой камеру порядка

$5 \times 5 \times 3 \text{ м}^3$, в которой располагаются два постаменты для установки сейсмометров и автономной регистрирующей аппаратуры размером порядка $1,5 \times 2 \text{ м}^2$. На одном из постаментов маркшейдерской службой шахты наносятся направления стран света (север-юг, восток-запад).

Обычно в сейсмопавильоне располагается трехкомпонентная установка сейсмометров, при которой сейсмометры (два из трех) ориентуются на страны света и вертикально к поверхности почвы.

Как правило, для удобства сопоставления различных компонент вектора смещения на один носитель регистрируются однородные компоненты (например, вертикальные составляющие).

Наиболее оптимальной схемой расположения наблюдательных сейсмопавильонов является такая, при которой один располагается на земной поверхности (или на одном из верхних горизонтов шахтного поля), два – на флангах и два – на самых нижних из действующих горизонтов. В процессе ведения очистных работ и углубки шахтного

поля сейсмопавильоны, расположенные на нижних горизонтах, целесообразно переносить вслед за развитием горных работ. Все наблюдательные сейсмопавильоны должны быть нанесены на планы горных работ. Для выбора наиболее целесообразного расположения сейсмопавильонов относительно зон ведения очистных работ необходимо до начала их строительства выполнить ряд предварительных поисковых исследований. Эти исследования должны включать в себя:

- определение уровня микросейсмических помех в месте возможного расположения сейсмопавильона;

- сбор и построение геологических разрезов вкрест простираения основных структур месторождения по трем направлениям, пересекающим шахтное поле в центре и по флангам;

- определение физико-механических свойств основных пород месторождения;

- аналитический расчет (например, методом конечных элементов) полного плоского тензора напряжений и деформаций для каждого из геологических разрезов;

- определение скоростного разреза среды для построенных геологических разрезов по данным лабораторных испытаний образцов и шахтных сейсмических измерений нетронутого массива.

Использование указанных данных позволяет наиболее оптимально подойти к выбору места заложения наблюдательных сейсмопавильонов, от которых, прокладываются кабельные линии к зданию собственно сейсмостанции, располагаемому на земной поверхности.

В случае необходимости регистрации динамических явлений не на одном, а нескольких шахтных полях, расположенных на значительном расстоянии друг от друга (свыше 10 км), к сейсмотелеметрической системе предъявляются особые требования, связанные с необходимостью значительного подавления помех в кабельных линиях связи.

Решение этого вопроса достигается:

- использованием каналов радиосвязи;

- созданием дополнительных пунктов контроля, сбора и передачи сейсмической информации (сейсмокустов на каждой из шахт в отдельности);

- использованием экранированных кабельных линий связи;

- установкой в сейсмокустах дополнительных узлов частотной и импульсной модуляции совместно с согласующими усилителями;

- использованием систем с уплотнением сейсмического сигнала.

Наиболее полно указанные характеристики аппаратуры реализованы в системах GITS, разработки ВНИМИ и «РЕГИОН», разработки НПО Сибцветметавтоматика. Есть аналогичные системы зарубежного производства.

10.7.2. Микросейсморайонирование шахтных полей

Результаты микросейсмологических наблюдений шахтных полей обобщаются в виде карт микросейсморайонирования и разрезов вкрест простирания основных структур месторождения, на которых указываются: местоположение очага (эпицентр, гипоцентр), энергетический класс (слабый, средний, сильный), дата (год, месяц, число). Карты эпицентров с указанием сейсмической энергии горных ударов и времени их возникновения являются основным исходным материалом для выявления зон повышенной сейсмической активности и тех участков их, где в настоящее время имеет место повышенная удароопасная ситуация. Выявление таких зон и контроль за их миграцией во времени позволяет своевременно принять региональные меры защиты и проконтролировать эффективность их применения. Однако, карты эпицентров не дают информации о глубинном распределении очагов, что затрудняет понимание механизма их возникновения, а, следовательно, не раскрывают в полной мере причину их возникновения. Это же в свою очередь снижает эффективность мер по их предупреждению. В связи с этим, результаты микросейсмологических наблюдений должны представляться также в виде глубинных разрезов в заданном направлении (рис. 10.22), причем схема построения таких разрезов должна предусматривать следующие этапы:

1. Строится полная карта эпицентров за исследуемый промежуток времени (месяц, квартал, год).

2. Выбирается направление (обычно вкрест простирания для удобства сопоставления с аналитическими данными), по которым строится геологический разрез.

3. На выбранные направления сносятся данные об очагах, которые лежат в узкой полосе (не далее 0,5 км от выбранного направления).

4. Полученные гипоцентры наносятся различным диаметром (в зависимости от их энергетической классификации) и цветом (в зависимости от времени их возникновения).

5. Для полученных разрезов методом конечных элементов рассчитывается полный тензор напряжений и деформаций.

6. Производится сопоставление зон повышенной сейсмической активности (по данным микросейсмологических наблюдений) с зонами повышенных концентраций (обычно максимальных касательных).

Такой анализ позволяет, с одной стороны уточнить теоретические расчеты, определив их совпадение или несовпадение с экспериментальными данными, а с другой, позволяет после согласования этих данных между собой определить границы влияния отдельных факторов (рельефа, слоистости, нарушенности и других). Как правило, в тех

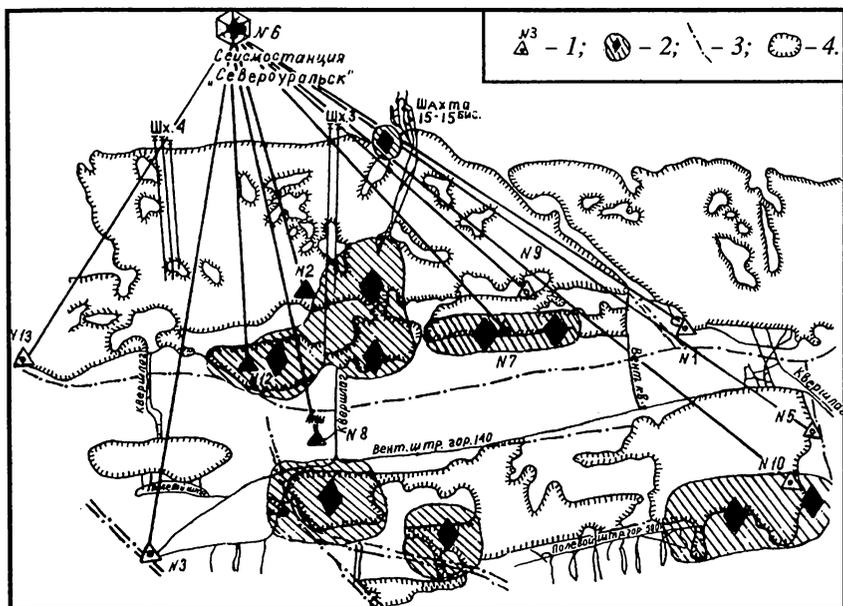


Рис. 10.22. Региональный прогноз горных ударов:

1 – сейсмометры; 2 – эпицентры горных ударов; 3 – геологические нарушения; 4 – выработанное пространство

местах, где влияние этих факторов суммируется и происходит формирование зон повышенной сейсмической активности.

Отметим, что еще раньше по результатам наблюдений на шахте Центральная (б. шахта им. Урицкого) в Кизеловском бассейне было отмечено, что такие факторы, как границы выемки защитного пласта, целики и др. приводят к образованию зон повышенной сейсмической активности.

Таким образом, уровень сейсмической активности в достаточной степени чувствителен к повышению напряжений в массиве пород и может служить критерием для выделения зон с повышенной концентрацией напряжений.

10.7.3. Сейсмическое просвечивание очаговых зон

Исследованиями ВНИМИ установлено, что для оценки напряженного состояния массива и выделения зон повышенных опорных нагрузок может быть использован сейсмический метод, основанный на изучении кинематических и динамических параметров сейсми-

ческих волн (скорости, затухании, амплитуде, энергии и других). Этот метод опробован ВНИМИ на ряде угольных и рудных месторождений страны (СУБР, Таштагол, Ткибули, Воркута и др.). Успешное применение метода позволяет предполагать, что он может быть использован и в стационарном варианте для контроля измерения степени удароопасности отдельных участков угольных пластов и рудных залежей, особенно на тех месторождениях, где уровень естественной сейсмической активности может оказаться недостаточно информативным параметром.

Основанием для таких работ могут служить исследования, выполненные ВНИМИ на шахтах Ткибули-Шаорского месторождения, которые показывают, что при увеличении нагрузок скорости прохождения сейсмических волн в нетронutom угольном и породном массиве с глубиной заметно увеличиваются. Следовательно, выбрав участки возможного увеличения нагрузок и осуществляя в них контроль за изменением параметров сейсмических волн можно будет контролировать изменение их степени удароопасности и на больших базах (между сейсмопавильонами).

Такой подход особенно удобен там, где производится достаточно большое количество взрывных работ, которые могут служить источниками сейсмических колебаний (Таштагол, СУБР, Норильск).

К УПРАВЛЕНИЮ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В РАЙОНАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ

11.1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

В геодинамике все большее признание получает теория литосферных плит, как наиболее объективно объясняющая процессы и явления, которые имеют место в земной коре. Вместе с тем взгляды на движущие силы в динамике литосферных плит не являются однозначными. Большинство ученых связывает эти силы с наличием конвективных течений в мантии Земли, увлекающих литосферные плиты. Эта гипотеза, однако, не имеет прямых доказательств и является достаточно спорной.

Авторами в [4], а также в главе 4 настоящей работы сделана попытка объяснить движение плит за счет горизонтальных сил, возникающих в океанических рифтовых зонах при проникновении в зоны раздвига магмы под высоким давлением. Верхние слои мантии, поставляющие магму в зоны раздвига, имеют напряжения γH_r (где H_r – глубина их залегания, равная толщине земной коры).

Если принять во внимание, что общая протяженность океанических рифтовых зон составляет около 80 тыс. км [12], то можно представить, насколько мощные силы действуют на литосферные плиты. В работе [40] приводятся соответствующие расчеты, которые показывают, что этих сил достаточно для обеспечения перемещения плит. Нетрудно видеть, что представленная здесь гипотеза одновременно дает основание утверждать, что рассматриваемые горизонтальные силы, действующие в земной коре, имеют гравитационную, а не тектоническую природу.

Другим глобальным процессом в движении литосферных плит является процесс субдукции (поддвигания), при котором поддви-

гающаяся часть плиты уходит под другую плиту с последующим расплавлением. Из-за трения между плитами подвижки совершаются непременно толчкообразно [37]. Толчкообразные подвижки имеют место, конечно, и в местах взаимного скольжения (перемещения) литосферных плит, и в местах их противодействия, что подтверждается высокой сейсмичностью зон взаимодействия плит.

На весь этот процесс накладывают свое влияние, конечно, и постоянно действующие планетарные силы. Периодичность действия этих сил создает нестабильность в поведении земной коры, вызывая подвижки, порой катастрофические, именно в периоды наибольшей нестабильности. Как уже рассматривалось выше (см. главу 4), этот вопрос прослежен авторами при сопоставлении времени проявления крупных (региональных) горных ударов в Кизеловском бассейне с лунно-солнечными приливами: максимум приходится не на максимум или минимум величины приливных напряжений, а на момент максимального ускорения изменения напряжений, т. е. на момент максимальной нестабильности [37].

Массив горных пород является сложной структурой, представленной блоками разных рангов, находящихся в соподчиненности и взаимодействии (см. главу 7).

Процесс деформирования и разрушения такого массива под действием естественных и техногенных полей напряжений, осуществляясь толчкообразно, сопровождается динамическими (геодинамическими) явлениями многих видов и различной интенсивности. К ним относятся, естественно, и техногенные землетрясения, горнотектонические удары, собственно горные удары, микроудары, толчки (сотрясения в массиве), стрельания пород.

Проблема прогноза, предотвращения динамических явлений и, вообще, проблема обеспечения безопасности людей в местах, опасных по геодинамическим явлениям, находится в центре внимания больших коллективов ученых и практиков многих стран мира и поглощает значительные ресурсы, особенно в последние десятилетия.

Все возрастающая интенсификация техногенной деятельности людей при освоении и эксплуатации недр сопровождается усилением геодинамической опасности, возрастанием числа динамических явлений, а в некоторых случаях и усилением катастрофичности их проявления.

В связи с этим возникает необходимость рассмотреть некоторые новые аспекты и пути решения проблемы геодинамической безопасности, учитывая при этом достижения наук о Земле, включая геомеханику массива горных пород и геодинамику недр, получивших, по мнению авторов, существенное развитие в последнее время.

11.2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СОСТОЯНИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

11.2.1. Общие сведения

Наиболее сейсмически активны земная кора и верхняя мантия до глубины 100 км. Затем идет спад активности, предельная же глубина сейсмической активности определена в 700 км.

В работе [51]* приводятся сведения о том, что очаги большинства разрушительных землетрясений располагаются на глубинах до 40 км. При этом сами очаги представляют собой разрыв или систему разрывов, распространяющихся на десятки километров со скоростью нескольких километров в секунду. При дальнейших (катастрофических) землетрясениях из окружающего очаг объема горных масс выделяется энергия порядка 10^{18} Дж, что соответствует магнитуде землетрясения около 8 и интенсивности колебаний земной поверхности до 11–12 баллов (по 12-балльной шкале). Опасность для населения и сооружений наступает при интенсивности землетрясения 7 баллов и более или при магнитуде более 5.

Таким образом, по мнению Г.А.Соболева, прогноз землетрясений с магнитудой 5 и выше, несомненно, представляет практический интерес.

Главная проблема, стоящая перед сейсмологами, – научиться предвидеть будущие катастрофы, а перед строителями – обеспечить надежное сейсмостойкое строительство.

Прогноз землетрясений принято подразделять на следующие виды: долгосрочный (несколько лет), который позволяет планировать землепользование, застройку в сейсмически опасных зонах;

среднесуточный (месяцы), позволяющий привести в готовность аварийные службы, накопить запасы медикаментов, продовольствия и т. п.;

краткосрочный (дни, часы), с помощью которого можно принять чрезвычайные меры безопасности, включая остановку особо опасных производств, эвакуацию населения и др.

Рассмотрим эти вопросы с позиции возможности их решения в сейсмически активных регионах.

* Работа представляет интерес, так как появилась после катастрофы, вызванной Спитакским землетрясением, и потому с наибольшей остротой обнажила состояние, сложившееся в области прогноза землетрясений и предпринимаемых мер безопасности их проявления.

11.2.2. Долгосрочный прогноз землетрясений

Долгосрочный прогноз строится главным образом на основе использования карты сейсмического районирования. Поэтому к ее разработке должны предъявляться особо серьезные требования. Спитакское землетрясение 1988 г. особенно четко показало несовершенство карты ОСР-78, которая представляет собой различного рода компромиссы между наукой и практикой (Г.И. Райснер).

При составлении карты практически не использовались или, во всяком случае, весьма слабо использовались данные разломной тектоники. По мнению специалистов, необходимо срочно пересмотреть карту ОСР-78, так как в ней реально заложена возможность ошибки типа «пропуск цели» (когда возникают землетрясения, на один-два балла большие, чем следует из карты). Указанное относится как к району проявления Спитакского землетрясения, так и к некоторым другим районам СНГ. Объясняется это главным образом совершенно неоправданным стремлением сэкономить на сейсмостойком строительстве объектов, подлежащих охране от разрушительных землетрясений. Крупным недостатком карты ОСР-78 явилось также то, что создание карт велось сначала для отдельных регионов, а потом эти отдельные карты искусственно сводились в единую карту [51].

По мнению авторов, карта сейсмического районирования должна составляться с учетом карт геодинамического районирования. При этом по принципу «от общего к частному» достигается достаточно серьезное изучение блочной структуры земной коры, иерархического взаимодействия блоков, выделение активных в настоящее время жизни Земли разломов и узлов активных разломов, тектонически напряженных и относительно разгруженных зон, классификация участков земной коры по их тектоно-динамическому и напряженному состояниям.

Именно совместное рассмотрение результатов геодинамического районирования и проявления фактической сейсмичности позволит получить карту сейсморайонирования, наиболее полно отражающую тенденцию развития сейсмичности в отдельных регионах и возможность прогнозирования толчкообразного деформирования блочной структуры в местах напряженного состояния земной коры.

Положение о необходимости исследования геологических критериев и, прежде всего, данных об активных разломах для оценки сейсмичности в том или ином районе содержится в [51]. Однако они предлагают выделять активные разломы с помощью анализа тех разломов, которые выделяются геологической службой. Это не решит вопроса: активные разломы могут быть выделены более надежно и

оперативно лишь с использованием метода геодинамического районирования (см. главу 7). Эффективность этого метода была продемонстрирована группой сотрудников под руководством авторов в процессе рассмотрения Спитакского землетрясения в декабре 1988 г. – феврале 1989 г. Карты геодинамического районирования Кавказа и района землетрясения содержатся в материалах Правительственной комиссии, расследовавшей обстоятельства и причины возникновения Спитакского землетрясения и меры по предотвращению его последствий (см. главу 7).

Весь цикл подготовки и проявления крупного землетрясения включает в себя три основные стадии: сейсмического покоя, активизации и разрядки.

По данным С.И.Зубкова, время начала проявления предвестников относительно момента землетрясения прямо пропорционально магнитуде последнего. Время начала активизации предвестников землетрясений по данным Г.А.Соболева и С.А. Федотова с магнитудой свыше 7 баллов примерно равно десятой части времени между такими землетрясениями, имеющими место в данном районе земной коры. Стадия активизации, для которой характерен высокий уровень тектонических напряжений в районе готовящегося сильного землетрясения, завершается крупным сейсмическим событием и последующими толчками – афтершоками. Затем наступает стадия частичной разрядки напряжений и их перераспределения в соответствии с новой системой разрывов. При сильнейших землетрясениях с магнитудой около 8 каждая из названных стадий длится по 10–15 лет. Основная же часть сейсмического цикла приходится на стадию покоя, длящуюся более 100 лет, когда идет накопление напряжений, предшествующее началу новой стадии активизации. Площадь, на которой сказываются предвестники крупного землетрясения, значительно больше размеров будущего очага.

Здесь нужно определиться с размерами очага. При определении размеров очага горного удара, например, в угольном целике в размер очага входит как сам разрушающийся целик, так и большие объемы пород, окружающие целик, пропорциональные, по крайней мере, размерам выработанных пространств около целика [37]. При землетрясениях размеры очага определить довольно трудно. В простейшем случае, когда образуется единичный разрыв, очаг можно, по-видимому, определить, рассматривая его как сложную фигуру, одним из размеров которой является окружность диаметром, равным поперечному размеру разрыва, вторым же размером является продольный размер разрыва. В пространстве указанного очага можно говорить о частичной разрядке напряжений в породном массиве, тогда как вокруг очага могут возникать тектонически напряженные зоны. Более того, поскольку

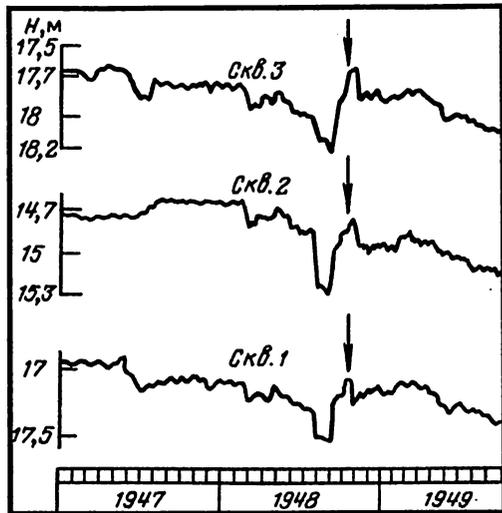
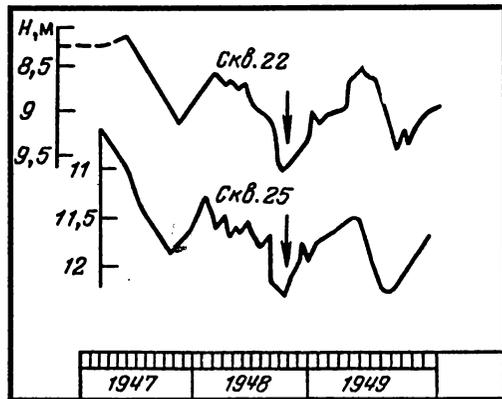


Рис. 11.1. Пример регистрации предвестников Ашхабадского землетрясения 1948 г. (Г.А.Соболев со ссылкой на Милькиса [36]). Уровень подземных вод сначала падал в скважинах, удаленных от эпицентра на 90 км (вверху), и только затем вблизи эпицентра (внизу). Перемещение предвестника к эпицентру осуществлялось со скоростью 5 км/сут



может возникнуть подвижка по неровным поверхностям разлома, то вновь образовавшийся контакт является прерывистым с образованием многочисленных напряженных и разгруженных зон.

Наиболее надежными и часто повторяющимися предвестниками землетрясений являются следующие: сейсмическое затишье, форшоки, резкое изменение уровня подземных вод в скважинах (рис. 11.1), сжатие или расширение участков земной поверхности, изменение электрического и магнитного полей напряжений, электросопротивления пород, изменение теплового «покрывала» поверхности Земли (инфракрасная съемка из космоса), изменение соотношения количества гелия и аргона (рис. 11.2), изменение радиоактивности приземного слоя

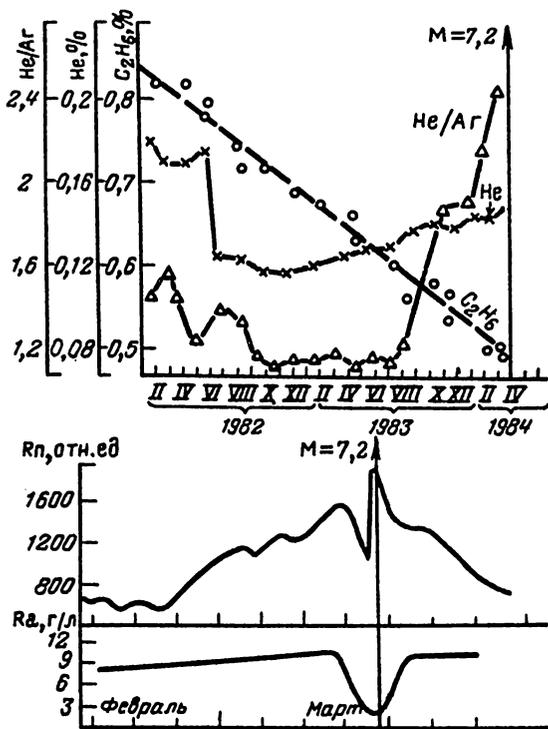


Рис. 11.2. Изменение состава (гелий, аргон) газов в пределах Кашабульской тектонической структуры (135 км от эпицентра) перед Газлийским землетрясением 19 марта 1984 г. (Г.И.Войтов, Е.А.Попов [36])

атмосферы (в таких сейсмически активных районах, как Закавказье, Средняя Азия, Юго-Западный Казахстан, – она в 10–40 раз выше, чем над территорией не сейсмоактивной, рис. 11.3) и многие другие. Следует еще упомянуть, что в развитии методов прогноза землетрясений необходимо иметь в виду применение геодезии для наблюдений за взаимным перемещением литосферных плит с помощью метода радиоинтерферометрии.

В работе Г.И.Войтова и Е.А.Попова отмечается, что всего к настоящему времени установлено до 200 видов предвестников землетрясений.

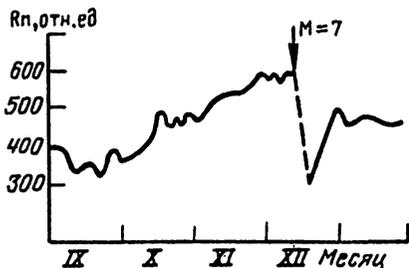


Рис. 11.3. Концентрация радона в атмосфере подпочв в Ленинанкане до и после Спитакского землетрясения в декабре 1988 г. (Г.И.Войтов, Е.А.Попов [36])

Говорить о землетрясении, как о разрядке тектонических напряжений вообще, по-видимому, не следует, лучше говорить о перераспределении напряжений в области очага землетрясения и прилегающих к нему массивов пород, которое приводит к установлению нового равновесного состояния, соответствующего зоне земной коры, находящейся в предельно напряженном состоянии. Поскольку условием существования зон с предельно напряженным состоянием является непрерывное деформирование вследствие постоянного перераспределения напряжений в отдельных ее участках, то и весь сейсмический цикл, составленный из отдельных стадий, является активным, включая и стадию «сейсмического покоя». Однако степень активности на разных стадиях развития и проявления сейсмического события различна.

Наличие обоснованного долгосрочного прогноза позволило, например, установить тщательные наблюдения за выявлением предвестников краткосрочного прогноза в районе Паркфилда (Калифорния), где ожидается землетрясение с магнитудой 6, а также в районе Токио (Япония), где ожидается землетрясение с магнитудой больше 7. Подобные меры в России можно, по-видимому, в известной мере наблюдать на Камчатке, где поставлены тщательные сейсмические исследования и организована служба прогноза землетрясений (С.А.Федотов [51]).

Таким образом, наличие долгосрочного прогноза позволяет осуществлять активные эксперименты по разработке краткосрочного прогноза (В.Н.Страхов [51]). Вероятность осуществления долгосрочного прогноза равна около 80% (Камчатка и Курильские острова, Калифорния, Карпаты). Однако, как отмечает Г.А.Соболев, у нас не разработан порядок рационального применения результатов долгосрочного прогноза, которым можно было бы воспользоваться как для усиления наблюдений за краткосрочными предвестниками, так и для проведения профилактических защитных мероприятий с целью уменьшения потерь от ожидаемого землетрясения.

11.2.3. О службе долгосрочного прогноза землетрясений

В мировой практике имеется много случаев игнорирования результатов долгосрочного прогноза землетрясений. В качестве примеров можно привести Спитакское землетрясение в 1988 г. Землетрясения в Чечено-Ингушетии в 1989 г. и Тяньшане (Китай) в 1976 г.

На Камчатке и Курильских островах осуществляются пятилетние прогнозы примерно для 20 участков Курило-Камчатской дуги. По данным С.А.Федотова, на Камчатке, Курильских островах и северо-

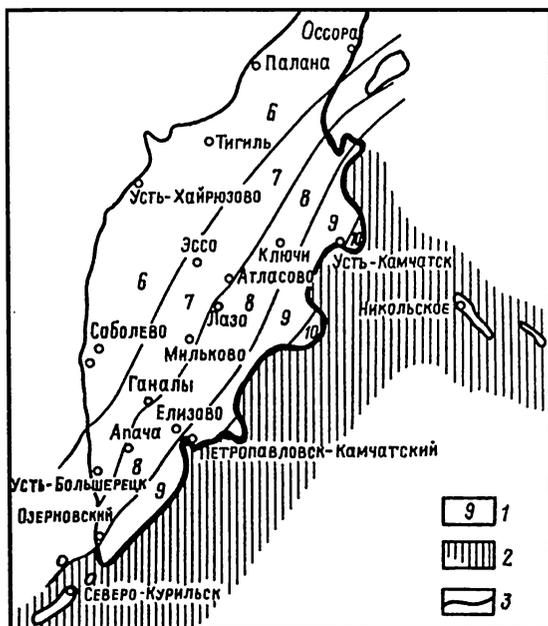


Рис. 11.4. Карта сейсмического районирования Камчатки (фрагмент карты ОСР-78):

1 – предельная интенсивность землетрясений в баллах; 2 – область высокой концентрации очагов сильных землетрясений; 3 – цунамиопасное побережье (С.А.Федотов)

востоке Японии происходят землетрясения, присущие структурам типа островных дуг или, проще говоря, – областям поддвига литосферных плит [51].

Землетрясения в таких структурах отличаются большой длительностью – десятки секунд, а то и минуты (Аляскинское землетрясение 1964 г. продолжалось 5 мин.); редко начинаются с толчка максимальной силы, который обычно наступает лишь через 15–20 сек. после первого толчка. Кроме того, своеобразием Тихоокеанского региона являются проявления цунами (рис. 11.4).

На рис. 11.4 приведен фрагмент карты ОСР-78. Очаги сильных землетрясений находятся под дном Тихого океана на расстоянии 30–150 км от восточного побережья полуострова Камчатка. Из приведенной карты видно, что предельная сила землетрясений убывает с удалением на запад. Землетрясения в этом районе связываются с наличием зон субдукции.

Отмеченные особенности проявления землетрясений в зонах субдукции обусловлены самой их природой. Происходит подвижка плит по неровным поверхностям их соприкосновения. Первый толчок является «спусковым крючком» для более мощного второго толчка. Последующие толчки связаны с периодом восстановления состояния равновесия в образовавшейся новой зоне предельно напряженного

состояния на большой площади соприкосновения литосферных плит. Появление цунами вызывается, по-видимому, мгновенным сокращением дна океана по площади (в широтном направлении) и выбросом в связи с этим воды на берег.

Под руководством акад. С.А.Федотова впервые в стране разработана специальная памятка для жителей Камчатки, поясняющая, что нужно сделать, как вести себя до, во время и после сильных землетрясений. В статье С.А.Федотова [51] отмечается необходимость разработки таких памяток для Кавказа, Забайкалья, Средней Азии с учетом своеобразия этих мест.

Интересные сведения приводятся о силе землетрясений (по 12-балльной шкале) и частоте их проявления на Камчатке, а именно: 5 баллов (15–25 раз в 100 лет); 6 баллов (10–15 раз в 100 лет); 7 баллов (4–6 раз в 100 лет); 8 баллов (1–3 раза в 100 лет); 9 баллов (1 раз в 300 лет).

По утверждению В.Н.Страхова [51], в настоящее время в сейсмологии господствует парадигма эмпирического обобщения, ретроспективного анализа и аналогии. Однако эмпирическое обобщение – необходимое, но недостаточное основание для уверенного прогноза. В данном случае отсутствует главный фактор, определяющий лицо других наук (физики, химии, биологии и др.), – активный эксперимент [51]. По-видимому, вследствие этого и отсутствует количественная физико-математическая теория в решении этой проблемы. Поэтому надо всячески приветствовать проведение активных экспериментов в районах Паркфилда, Токио и Камчатки, о которых упоминалось выше.

Вместе с тем необходимо шире использовать для прогноза землетрясений и обеспечения безопасности в сейсмически опасных районах многочисленные данные о горных ударах. Комплексные исследования по этой проблеме ведутся с привлечением методов геофизики, в том числе с использованием специальных сейсмических станций, расположенных в опасных по горным ударам регионах; методов геомеханики с проведением специальных широкомасштабных горных экспериментов на шахтах и рудниках, а также проведением многосторонних испытаний горных пород в лабораторных условиях с применением оригинальных стендов. Здесь есть, что можно использовать при решении отдельных вопросов безопасности для районов, подверженных землетрясениям. Можно отметить как хорошее начинание в этом плане внимание к нашим работам со стороны группы ученых во главе с В.С.Куксенко. Вместе с тем попытка навязать специалистам-горнякам необходимость прогноза горных ударов по месту и времени, как это делается пока не очень успешно при прогнозе землетрясений, не является обоснованной для проблемы горных ударов это шаг назад,

дезориентирующий горняков. Применяемый горняками прогноз горных ударов с учетом фактора времени, позволяющий заблаговременно принять меры профилактики и не допустить разрушительного проявления горного удара, – вот такой подход, по мнению авторов, может оказаться действительно полезным при техногенных и естественных землетрясениях, что и должно получить максимальное отражение в будущих совместных исследованиях ученых-сейсмологов и горняков.

11.3. ОПЫТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ГОРНЫХ УДАРОВ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Особенности подхода к решению проблемы

Как известно, опасность проявления горных ударов имеет место во многих горнорудных районах мира на протяжении, по крайней мере, более двухсот лет. В России разработка около десятка опасных пластов угля началась в 1940-е годы на шахтах Кизеловского бассейна. Позднее число пластов, склонных к горным ударам, на всех шахтах СНГ превысило 800, а число рудных месторождений, склонных к горным ударам, – 60. Общее руководство решением проблемы горных ударов в нашей стране с 1951 г. осуществляется ВНИМИ.

Рассматривая горные удары как один из типов геодинамических явлений, целесообразно проследить путь и основные подходы к успешному решению проблемы горных ударов и, прежде всего, на угольных шахтах, где удалось достигнуть наиболее существенных результатов по созданию безопасных условий ведения горных работ.

В начальный период решения проблемы горных ударов в нашей стране (1951–1955 гг.) специалистами выдвигался в качестве основного вопрос о прогнозе места и времени возникновения горного удара с тем, чтобы обеспечить возможность шахтерам своевременно удалиться из опасного места. Такой подход, как известно, находит своих приверженцев вплоть до настоящего времени, особенно при решении проблемы горных ударов в зарубежной горной практике.

Однако уже к концу 1950-х годов в нашей стране и, прежде всего, на шахтах наиболее удароопасного Кизеловского бассейна выработался и возобладал принципиально другой подход к проблеме обеспечения безопасности в удароопасных шахтах – не предсказывать горный удар, а заранее предотвращать опасность его возникновения [37].

Именно этот подход и обеспечил решение проблемы горных ударов в нашей стране.

Проблема предотвращения горных ударов получила полное теоретическое и практическое решение. В конечном счете, здесь была сформулирована и решена задача регионального управления состоянием массива горных пород в пределах шахтного поля для исключения при отработке угольных пластов опасности возникновения динамических явлений. Задача решалась главным образом путем широкого применения опережающей отработки защитных пластов и ведения работ без оставления удароопасных целиков угля.

Управление состоянием массива горных пород в пределах всего шахтного поля для обеспечения безопасного и эффективного ведения горных работ на шахтах, опасных по горным ударам и внезапным выбросам, внедрено на 40 шахтах б. СССР в последние двадцать лет и дало положительные результаты: горные удары и другие динамические явления на этих шахтах прекратились [45, 50].

Это дало возможность поставить реальную задачу о необходимости перехода к управлению геодинамическим состоянием массива горных пород на всех глубоких шахтах (а не только опасных по динамическим явлениям), что обеспечит ведение горных работ как бы на глубинах, в два-три раза меньших достигнутых, со всеми вытекающими отсюда положительными последствиями [45].

11.4. РАЗРАБОТКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ В РАЙОНАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ*

11.4.1. Землетрясения и горные удары – геодинамические явления

В начале 1950-х годов при посещении самой опасной по горным ударам шахты в Кизеловском бассейне известный ученый-геофизик Ю.В.Ризниченко поставил вопрос: можно ли рассматривать горный удар в качестве модели землетрясения? Условились, что можно. Однако теперь становится ясно, что связь этих явлений более тесная: горный удар и землетрясение представляют собой геодинамические явления, имеющие общие черты в природе и механизме проявления. Землетрясения и горные удары, как и другие динамические явления, происходят в результате хрупкого разрушения пород в местах с предельно напряженным состоянием массива горных пород, когда скорость изменения напряженного состояния в создавшейся ситуации

* *Петухов И.М.* К вопросу о геодинамической безопасности. – СПб.: ВНИМИ, 1995. С. 16–26.

превышает максимально возможную скорость выхода пород из-под нагрузки с непременным притоком энергии извне.

Если это так, то естественно сделать заключение, что и подходы к решению проблем безопасности в районах проявления землетрясений и горных ударов могут быть в значительной мере похожими, хотя и масштабность и сложность решения проблемы землетрясений, конечно, далеко не сопоставимы с решением проблемы горных ударов на угольных пластах.

11.4.2. О возможности использования опыта решения проблемы горных ударов

Рассмотрим, что же можно использовать из примера успешного решения проблемы горных ударов в нашей стране для разработки новых подходов к решению сложнейшей проблемы безопасности в районах проявления землетрясений.

Прежде всего, как и при горных ударах, не следует, по-видимому, ставить во главу угла прогноз землетрясений по времени их проявления. Это очевидно хотя бы из того соображения, что даже если в будущем разработанные методы прогноза землетрясений обеспечат 75–80% надежности предсказания времени возникновения землетрясений, то и тогда в 20–25% случаев будет угрожать катастрофа. Более того, прекращение полезной человеческой деятельности в любом районе, в котором предсказано землетрясение, чревато большими потерями, а в случаях ошибки в прогнозе времени землетрясения – кто и когда возобновит нормальную человеческую деятельность в опасном районе, кто возьмет на себя эту ответственность. Кроме того ясно, что, допуская проявление землетрясений, приходится мириться с колоссальным материальным ущербом.

Отсюда напрашивается вывод, что при решении вопросов безопасности от проявления техногенных и чисто тектонических землетрясений в земной коре необходимо исходить из тех же принципов, что и при решении проблемы горных ударов. Задача, по-видимому, должна быть сформулирована следующим образом.

Во-первых, необходимо систематически и повсеместно выявлять участки земной коры, являющиеся тектонически напряженными зонами, опасными по проявлению землетрясений.

Во-вторых, следует оценивать и постоянно контролировать степень опасности проявления землетрясений в тектонически напряженных зонах, осуществляя прогноз землетрясений с учетом фактора времени.

В-третьих, необходимо осуществлять активное воздействие на массив горных пород в тектонически напряженных зонах, вызывая

снижение опасности возникновения землетрясений путем разрядки участка пород от напряжений, вывода данный участок из условий, когда внезапный переход массива пород в новое, предельно напряженное состояние может окончиться сильным землетрясением, имея в виду, что мелкие, неопасные землетрясения должны рассматриваться, как нормальная разрядка напряжений в массиве и, следовательно, их не следует бояться, как это принимается для мелких горных ударов.

Авторы отдают себе отчет в том, что осуществление работ в перечисленных направлениях представляет собой сложнейшую научную и организационно-техническую задачу. Однако к ее выполнению необходимо стремиться: только при таком подходе может в конечном счете быть достигнут успех в обеспечении безопасности и безаварийности освоения недр и земной поверхности в районах, подверженных проявлениям землетрясений.

Остановимся на краткой характеристике имеющихся к настоящему времени научных и организационно-технических предпосылок для решения этой весьма сложной задачи.

1. Разработаны энергетическая теория горных ударов, энергетически-силовая теория внезапных выбросов угля, породы и газа, основы общей теории указанных динамических явлений [39]. Эти разработки с учетом крупных достижений других наук о Земле позволяют ставить и в ближайшие годы решить проблему разработки общей теории толчкообразного поведения массива горных пород и земной коры в целом как основы для создания геодинамической безопасности.

2. Получила за последние 40 лет практическое решение сложная проблема безопасного ведения горных работ на угольных шахтах, опасных по горным ударам, являющихся одним из классов геодинамических явлений, имеющих многие общие черты природы и механизма проявления с землетрясениями.

3. Разработан и получил внедрение метод геодинамического районирования недр, как основной метод новой отрасли наук о Земле – геодинамики недр [4], позволяющий оперативно выделять блочную структуру земной коры в ее соподчиненности, активные в настоящее время разломы и узлы разломов, тектонически напряженные зоны в массиве горных пород, оценивать напряженное и газогидродинамическое состояние массива в любом участке земной коры, уточнять карты сейсмического и других видов районирования. Это дает возможность создания специальной постоянно действующей службы по оценке, прогнозу и контролю геодинамического состояния массива горных пород в условиях действия естественного и техногенного полей напряжений.

4. Получены, особенно в последние десятилетия, многочисленные и весьма серьезные теоретические и практические наработки в области раскрытия природы землетрясений и их предвестников при решении вопросов прогноза землетрясений по месту, силе и времени. При этом, если исходить из сформулированной выше постановки вопроса, т.е. сделав основной упор лишь на прогнозе землетрясений по месту, но с учетом фактора времени, имеющихся наработок может оказаться почти достаточно для того, чтобы разработать методы и аппаратуру для оценки опасности приближения землетрясения, определения наиболее подходящего времени и последовательности необходимого техногенного воздействия на отдельные участки земной коры, степени и характера такого воздействия для исключения катастрофического проявления землетрясений.

5. Имеются в наличии мощные источники техногенного воздействия на массив горных пород, что может быть использовано для обеспечения безопасности и безаварийного перевода опасных по землетрясениям участков земной коры в неопасное состояние в установленное прогнозом время. К настоящему времени в мировой практике накопилось множество случаев активного воздействия техногенной деятельностью на сейсмоопасность массива горных пород, как, например, при атомных взрывах, заполнении водохранилищ, закачке отходов в глубокие скважины, обработке глубоких месторождений полезных ископаемых, перемещении больших масс пород при открытых разработках и пр. Обобщение этого разрозненного опыта, его совершенствование с учетом специфики последующего использования для управления геодинамической безопасностью должны всемерно приветствоваться.

11.4.3. Перспективы решения проблемы геодинамической безопасности

Состояние достижений наук о Земле, включая геомеханику и геодинамику недр, позволяет ставить и решать задачу по управлению геодинамическим состоянием отдельных участков земной коры и литосферы в целом как единой системы, находящейся, по мнению авторов, в своеобразном предельно напряженном состоянии. Равновесие в этой системе соблюдается за счет постоянного ее деформирования с возникновением, существованием и исчезновением зон предельно напряженного состояния в отдельных районах. Научные и инженерно-технические решения должны обеспечивать неизбежное по своей природе толчкообразное деформирование земной коры без катастроф как в ее естественном состоянии, так и при техногенном воздействии при эксплуатации недр и земной поверхности.

Если представить себе естественное толчкообразное деформирование какого-то участка земной коры в виде, изображенном кривой 1 на рис. 11.5, и учитывать при этом, что отдельные толчки (разрушения) проявляются катастрофически (например, в виде землетрясений в 8–9 баллов), то появится желание преобразовать поведение массива в вид, изображенный на рис. 11.5 кривой 2. Отличие второй кривой от первой состоит в том, что та же величина Δl достигается в то же время, но не в два рывка (толчка), а, скажем, в четыре, но уже без катастроф (например, в виде землетрясений 5 баллов и ниже). Конечно, если бы удался такой важный эксперимент, то появилось бы стремление еще больше измельчить толчкообразные подвижки, но при этом следует иметь в виду, что полностью убрать скачки не удастся, так как процесс деформирования участков массива, находящихся в предельно напряженном состоянии, может быть только толчкообразным.

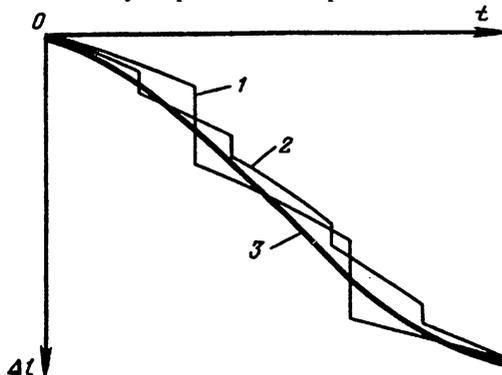
В этом случае можно говорить о том, что планетарные силы (см. 4.5) следует рассматривать, как фактор положительный, побуждающий участки земной коры освобождаться от излишних «застойных» явлений. Положение с толчкообразным поведением массива горных пород, приведенное на рис. 11.5, относится не только к землетрясениям, но и к горным ударам, частота и интенсивность которых легко регулируются, например, при работе комбайна в очистном забое.

Все это, по мнению авторов, позволяет ставить вопрос об управлении состоянием массива горных пород в отдельных участках земной коры для снижения их сейсмоопасности. Все нарастающая техногенная деятельность человека делает решение этих вопросов весьма актуальным, однако на получение удовлетворительных результатов потребуются немало усилий и времени.

В этом плане, приветствуя существование целевой программы «Развитие федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений на 1995–2000 годы», утвержденной Правительством

Рис. 11.5. Принципиальная схема изменения толчкообразного деформирования участка земной коры в результате направленного техногенного воздействия:

1 – в естественных условиях (до воздействия); 2 – после техногенного воздействия; 3 – недостижимый результат техногенного воздействия, к которому следует стремиться



Российской Федерации постановлением № 1207 от 3 ноября 1994 г., авторы считали бы необходимым начать развивать работы и в направлении создания постоянно действующей службы по *управлению геодинамической безопасностью* участков земной коры, подверженных землетрясениям, посредством активного техногенного воздействия на них с целью устранения землетрясений либо снижения их балльности. Понятно, что эти работы должны начинаться на отдельных, наиболее простых участках, постепенно переходя к более сложным и крупным, расширяя круг решаемых задач.

Автоматизированные системы служб по оценке, прогнозу и контролю состояния массива горных пород, включая его сейсмическую опасность, должны создаваться на базе результатов геодинамического районирования Евразийской литосферной плиты, отдельных территорий крупных регионов и конкретных объектов.

Российская наука и практика в области решения вопросов оптимального освоения недр и земной поверхности в состоянии приступить к выполнению рассматриваемой проблемы, не имеющей в своей постановке аналогов в мире.

ПРЕДПОСЫЛКИ К СОЗДАНИЮ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ТОЛЧКООБРАЗНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Земная кора и в целом литосфера на многих участках находятся в предельно напряженном состоянии и, следовательно, изменения этого состояния, связанные с деформированием массива горных пород, переливанием (перемещением) потенциальной упругой энергии (энергообменом) могут совершаться в подавляющем большинстве случаев *толчкообразно*. Эти толчкообразные изменения происходят на микро- и макроуровнях как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии. Внешне они проявляются в виде многочисленных мелких геодинамических явлений типа стреляний, толчков, вплоть до катастрофических геодинамических явлений в форме горных ударов, техногенных и естественных землетрясений. Поэтому одной из важнейших задач на ближайшее время, стоящих перед специалистами геодинамики недр, является создание теории толчкообразного деформирования массива горных пород, как основы изучения, оценки и прогноза его свойств и состояния, разработки способов и средств возможного управления ими при освоении недр и земной поверхности.

Попытаемся в первом приближении сформулировать отдельные предпосылки к созданию такой теории на базе имеющихся наработок науки и практики.

12.1. КОНЦЕПЦИЯ О ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Земная кора и литосфера в целом, как система, находятся в специальном, предельно напряженном состоянии. Ее равновесие контролируется постоянно меняющимся взаимодействием гравитационных и планетарных сил.

Рассмотрим некоторые положения, в значительной степени характеризующие состояние и поведение этой системы.

1. Геодинамика литосферных плит определяется следующими главными факторами:

движение литосферных плит обеспечивается активными горизонтальными силами, возникающими в районах срединно-океанических хребтов в результате наращивания плит за счет поступления высоконапряженной магмы из верхних частей мантии Земли;

на границах литосферных плит в зонах рифтогенеза, субдукции и противодействия континентальных плит преобладают напряжения сжатия;

взаимодействие литосферных плит в зонах субдукции и противодействия совершается толчкообразно.

2. Зона растяжения массива горных пород в области срединно-океанического хребта хотя и существует, но не выходит за пределы внутреннего дна рифтовой зоны, является локальной, имеет незначительные размеры по ширине и глубине распространения. В основной же зоне спрединга и с удалением от нее имеют место высокие горизонтальные напряжения сжатия.

3. Местоположение рифтовых зон так же, как океанов и материков меняется во времени. Поэтому силы, действующие на перемещение литосферных плит, также не могут быть стабильными. Это является еще одним доказательством активности системы сил и процессов, существующей в рифтовых зонах срединно-океанических и континентальных хребтов. Целесообразно составление карты рифтовых зон и зон субдукции с увязкой со стадиями их развития на настоящее время и возможными силовыми характеристиками режима их поведения.

4. При изучении деформирования земной коры следует обратить внимание на эффект разуплотнения массива горных пород, возникающий вследствие подвижек по неровным поверхностям блоков относительно друг друга, по слоистости представленных разных по литологии и механическим свойствам пород, вновь образуемым поверхностям разрушения и др. Как было показано в [37], величина разуплотнения краевой части массива угольного пласта достигает 10–20%. Причем по мере удаления от обнажения, т.е. по мере возрастания нагрузок на пласт и перехода его в условия всестороннего сжатия, влияние эффекта разуплотнения снижается.

Применительно к земной коре можно предположить, что эффект разуплотнения массива будет проявляться в пределах зон, перешедших в предельно напряженное состояние, а на отдельных участках, как это было показано выше, эти зоны распространяются до $H_{пл}$. Если принять $H_{пл} = 15$ км, то даже при средней величине разуплотнения 5% подня-

тие земной поверхности за счет этого эффекта достигает 0,75 км. Значительное влияние эффекта разуплотнения массива пород должно проследиваться в районах сильнодислоцированных, а также в районах горных хребтов, где массив пород в значительной степени освобождается от действия горизонтальных тектонических сил.

С углублением в недра земной коры эффект разуплотнения снижается и на уровне $H_{пл}$, по-видимому, разуплотнение как результат подвижек по неровным поверхностям практически исчезает. Блочное строение массива будет сказываться лишь вследствие того, что в условиях неравномерного сжатия на контактах блоков будут возникать специальные условия, приводящие к «оплыванию» пород и, следовательно, к выравниванию напряжений вдоль контактов [37].

На фоне общего предельно напряженного состояния массива горных пород наблюдается крайняя дискретность распределения напряжений, обусловленная различием прочностных, деформационных и иных свойств литологически разных пород, слагающих массив, разнообразием форм и размеров блоков, отдельностей, залежей пластов и их взаимного расположения, подвижками по неровным поверхностям структурных элементов. С ростом глубины дискретность распределения напряжений в массиве горных пород постепенно снижается.

5. Представляет большой интерес вопрос о делимости литосферы. Автором работы [12] на основе результатов исследований 120 тыс. трещин и разрывных нарушений во многих районах России установлено, что в процессе тектонических деформаций на ориентировку возникающих трещин существенно влияет первичная анизотропия, направления трещиноватости меняются от блока к блоку, а в самих блоках они остаются неизменными с момента образования под влиянием анизотропии литосферы, возникшей на самых ранних стадиях ее развития; в породах разного возраста имеет место передача анизотропии снизу вверх. Установлено также, что сейсмогенные трещины в коренных породах не образуют новых направлений, а наследуют уже существующие [12]. Очертания плит литосферы предопределены анизотропией дорифтового фундамента. Интересно отметить, что автор работы [12] вслед за Ж.Гогелем (1969 г.) сомневается в возможности использования данных о направлениях трещиноватости для выявления тектонических напряжений. С этим, по-видимому, можно согласиться. Еще одним подтверждением является то, что при исследованиях характера разрушения угольных пластов горными ударами в Кизеловском бассейне еще в начале 1950-х годов было обнаружено, что разрушение происходит почти исключительно по имеющимся в пласте поверхностям ослабления вне зависимости от направления приложения нагрузок [37].

Планетарное поле напряжений, определяемое суммарным воздействием Солнца, планет, годичным и суточным вращениями Земли, является постоянно действующим, но меняющимся во времени с периодами от нескольких часов до геологических эпох. Поскольку изменения этого поля в пределах сравнительно небольших участков времени (до десятков лет) незначительные (например, лунно-солнечные приливы приводят к появлению дополнительных напряжений всего лишь до 0,1 МПа [37], то планетарные силы можно исключить из рассмотрения при оценке силовых параметров, определяющих условия поведения массива горных пород на данном (ограниченном) отрезке времени. Однако при этом необходимо иметь в виду, что циклический характер влияния планетарных сил (например, лунно-солнечные приливы) является ответственным за создание условий *нестабильности* в поведении земной коры. Это должно учитываться при решении многих важных практических вопросов

б. Все явления и процессы в земной коре, в том числе землетрясения, толчки, горные удары, движение жидкости и газа и другие, необходимо рассматривать с единой позиции: закономерностей поведения массива горных пород, находящегося в естественных условиях или под влиянием техногенного воздействия в предельно напряженном состоянии. При этом предельно напряженное состояние участка массива или в целом земной коры должно рассматриваться как вид, форма или условия существования системы, в то время как составные части этой системы, так же как и сам материал, могут быть при этом в упругом или ином состоянии, далеко от предельного.

12.2. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

При решении этих вопросов представляется возможным опираться на следующие, уже достаточно разработанные предпосылки.

1. Выявление блочной структуры земной коры и литосферы в целом, активных разломов, тектонически напряженных и разгруженных зон, руководствуясь принципом «от общего к частному», т. е. от земной коры как единой системы литосферных плит до мегаблоков и блоков разного ранга, в конечном счете – до макроструктуры горных пород.

2. Оценка напряжений в массиве горных пород на любых участках земной коры и литосферы в целом также по принципу «от общего к частному».

Участки земной коры и литосферы могут находиться при этом в следующих состояниях: упругое состояние массива под действием сил гравитации и активных горизонтальных сил; предельно напряженное состояние массива на некоторую глубину от земной поверхности под действием сил гравитации и активных горизонтальных сил; предельно напряженное состояние массива всей толщи земной коры под действием сил гравитации и активных горизонтальных сил; вязкое (жидкое) состояние массива в астеносфере под действием сил гравитации.

Напряженное состояние массива горных пород применительно к этой классификации рассмотрено выше.

3. Расчет напряжений, проницаемости и влагоемкости массива пород с учетом его блочной структуры.

При освоении недр (добыча полезных ископаемых, строительство подземных и наземных сооружений, создание водохранилищ и пр.), как известно, на естественное поле напряжений накладывается еще и техногенное поле напряжений. К настоящему времени наука геомеханика располагает достаточными данными для решения вопросов оценки и учета при инженерной деятельности аспектов напряженного и газогидродинамического состояния массива горных пород (см. выше).

4. Одним из крупных вопросов является оперативное определение и характер использования для науки и практики таких параметров, как физико-механические свойства пород различных составов в условиях соответствующих температур, величин $H_{пл}$ и H_r , так же как функций температуры и напряженного состояния. Если для получения данных о физико-механических свойствах необходимо проведение непосредственных исследований на установках высокого давления, в том числе на установке «Геоэнергия» конструкции ВНИМИ – ВНИИБТ по испытанию крупногабаритных образцов в условиях, приближенных к натурным, имитирующих глубины до 15 км, то для определения $H_{пл}$ и H_r можно воспользоваться уже имеющимися данными геофизических исследований, в том числе и в нашей стране. Например, верхнюю границу идеальной пластичности $H_{пл}$ можно с известным приближением установить по отношению скоростей поперечных V_s и продольных волн V_p , когда оно достигает величины 0,5. При исчезновении поперечных волн породы, по-видимому, переходят в «жидкое» состояние (H_r). Предположительно можно принимать, что поверхность Мохоровичича (M) является нижней границей земной коры. Однако, по-видимому, нужна критическая перепроверка методики определения скоростей прохождения упругих волн с учетом реального напряженного состояния. Последнее, возможно, позволит уточнить положение поверхности Мохоровичича и, как нам представляется, толщину земной коры и литосферы в целом в сторону ее увеличения.

12.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ-СИЛОВАЯ ТЕОРИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Успешный опыт решения проблем горных ударов и выбросов в последние пятьдесят лет позволил сделать существенные наработки в общую теорию толчкообразного поведения массива горных пород.

В последние десятилетия в нашей стране [37, 39] созданы энергетическая теория горных ударов, энергетически-силовая теория внезапных выбросов угля, пород и газа, а также – основы общей теории этих явлений. Разработана энергетически-силовая классификация динамических явлений, которая была положена в основу создания по линии Европейской Экономической Комиссии Международной классификации динамических явлений в шахтах. Принцип построения этой классификации положен впоследствии в основу разработки общей классификации геодинамических явлений, которая включает и техногенные и естественные землетрясения (см. главу 9).

Создание теории толчкообразного поведения массива горных пород кроме использования разработанных теорий, должно базироваться на применении фундаментальных закономерностей поведения массива, установленных в последние сорок лет [4, 39, 48 и др.]:

закономерность возникновения тектонически напряженных зон в массиве горных пород (у границ развивающегося разлома тектонического нарушения, при подвижках по неровным поверхностям структурных элементов массива, в местах изменения мощностей более прочных слоев пород и др.) и соответственно – разгруженных зон (например, см. рис. 7.27);

закономерность притока энергии упругих деформаций из окружающих областей пород при хрупком разрушении (подвижках) в массиве, в результате чего эти разрушения происходят толчкообразно, т.е. являются динамическими (см. параграфы 9.1 и 9.2):

закономерность разрушения горных пород* заключающаяся в том, что при возрастании скорости перемещения поверхности обнажения массива повышается концентрация напряжений и, следовательно, интенсивность хрупкого разрушения в призабойной области (см. рис. 3.2 и 3.3).

Указанные закономерности и следствия из них являются всеобъемлющими, если рассматривать их для оценки поведения массива горных пород как в пределах земной коры в целом, так и в пределах ее отдельных участков.

* Диплом на открытие № 337 (см. главу 3)

12.4. ОТДЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ЗОНАХ ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Отдельные количественные показатели и параметры толчкообразного поведения массива горных пород в зонах предельно напряженного состояния представлены на рис 12.1.

Показатель неустойчивости K есть отношение энергии, накопленной непосредственно в очаге возможного разрушения, к энергии, необходимой для самого разрушения участка массива пород.

Показатель N хрупкого разрушения участка массива пород есть отношение скорости нагружения к его скорости «релаксации» напряжений. «Релаксацию» здесь следует понимать как скорость возможного выхода породы из-под нагрузки, о чем говорилось выше. Кроме того, принимая во внимание, что при приближении к пределу прочности возрастают скорости пластической деформации угля и пород, показатель N следует рассматривать величиной изменчивой, хотя суть его как показателя хрупкого разрушения материала от этого не меняется.

Показатель динамичности K_d – отношение энергии, накопленной породами, окружающими область, в которой происходит хрупкое разрушение пород, к энергии, необходимой для самого хрупкого разрушения пород в этой области. Показатель K_d характеризует интенсивность или катастрофичность проявления хрупкого разрушения, в том

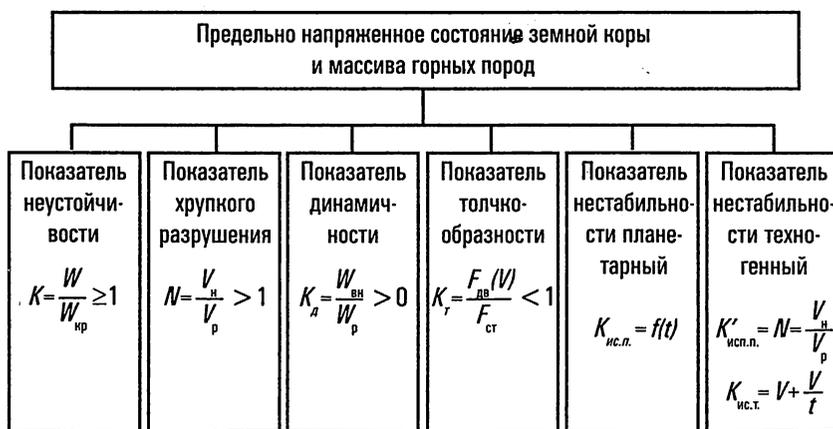


Рис. 12.1. Отдельные показатели и параметры толчкообразного поведения массива горных пород и зонах предельно напряженного состояния.

числе, например, горного удара или землетрясения. Коэффициент динамичности повышается по мере развития горного удара, так как имеет место процесс снижения модуля упругости разгружающихся пород.

Показатель толчкообразности K_T – отношение силы трения при движении к силе трения при покое, которое, как известно, меньше единицы. То, что сила трения при движении меньше силы трения при покое, объясняет тот факт, что при толчкообразной подвижке по контактам структурных элементов или по вновь образовавшейся поверхности проскальзывание происходит несколько дальше, чем это необходимо для равновесия, и тем закладывается возможность последующего толчкообразного проскальзывания: чем больше K_T , тем реже и интенсивнее толчкообразность разрушения. Величина K_T зависит от величины силы трения. Если далее учесть, что скорость деформирования (в том числе и при скольжении) возрастает по мере приближения к пределу прочности, то величина K_T при этом не остается постоянной.

Показатель нестабильности планетарный $K_{нс.п.}$ может быть сведен на первом этапе к решению нестабильности, возникающей в результате лунно-солнечных приливов, и, следовательно, он есть функция величины ускорения при изменении волны прилива и времени ее действия. Представляется возможным разработать метод расчета величин деформаций земной коры в районе активных разломов, происходящих за счет раздельности «работы» соседних блоков под воздействием приливных напряжений, а также выявить усталостную реакцию сооружений и линейных объектов (железные дороги, трубопроводы и др.) на действие приливных напряжений.

Показатель нестабильности техногенный $K_{нс.т.}$ есть функция скорости ведения горных работ и может быть выражен в двух видах. Во-первых, показатель зависит от скорости внедрения в массив горных пород, и здесь он будет переключаться с показателем хрупкого разрушения N . Во-вторых, показатель $K_{нс.т.}$ отражает скорость развития горных работ, а также скорость расширения выработанного пространства, но с неперемным учетом общего объема (стадия отработки шахтного поля или месторождения в целом).

В процессе дальнейших исследований должны быть уточнены приведенные показатели и установлены другие показатели и параметры, характеризующие поведение пород в зонах предельно напряженного состояния массива.

НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОДИНАМИКИ НЕДР

Многочисленные результаты исследований, изложенные в предыдущих главах книги, позволяют достаточно полно представить себе содержание геодинамики недр как одной из наук о Земле. Отсюда же могут быть сформулированы научные и организационно-технические направления дальнейшего развития этой новой отрасли науки и пути практического использования ее результатов для наиболее эффективного и безопасного освоения недр и земной поверхности.

В этом направлении можно сослаться на полезный опыт последних лет. На рис. 13.1 приведена схема, иллюстрирующая основное содержание действующей с 1996 г. Межотраслевой координационной программы «Геодинамическая безопасность». Программа включает 25 проблем разных отраслей промышленности, занятых освоением недр и земной поверхности в России, поддерживается Госгортехнадзором РФ, академиями РАН, МАНЭБ, АГН и РАЕН. Головным институтом является ВНИМИ*. Представленная схема, по мнению авторов, достаточно характеризует задачи и направления развития и использования геодинамики недр.

Основное направление – создание общей теории толчкообразного деформирования массива горных пород, развитие и совершенствование на ее основе методики геодинамического районирования недр, его повсеместное применение.

Как уже отмечалось, в этом направлении в российской горной науке имеются существенные наработки, однако многое предстоит еще сделать как для более глубокого развития имеющихся наработок, так и для получения принципиально новых результатов.

* Руководитель программы А.М.Ильин, научный руководитель И.М.Петухов.

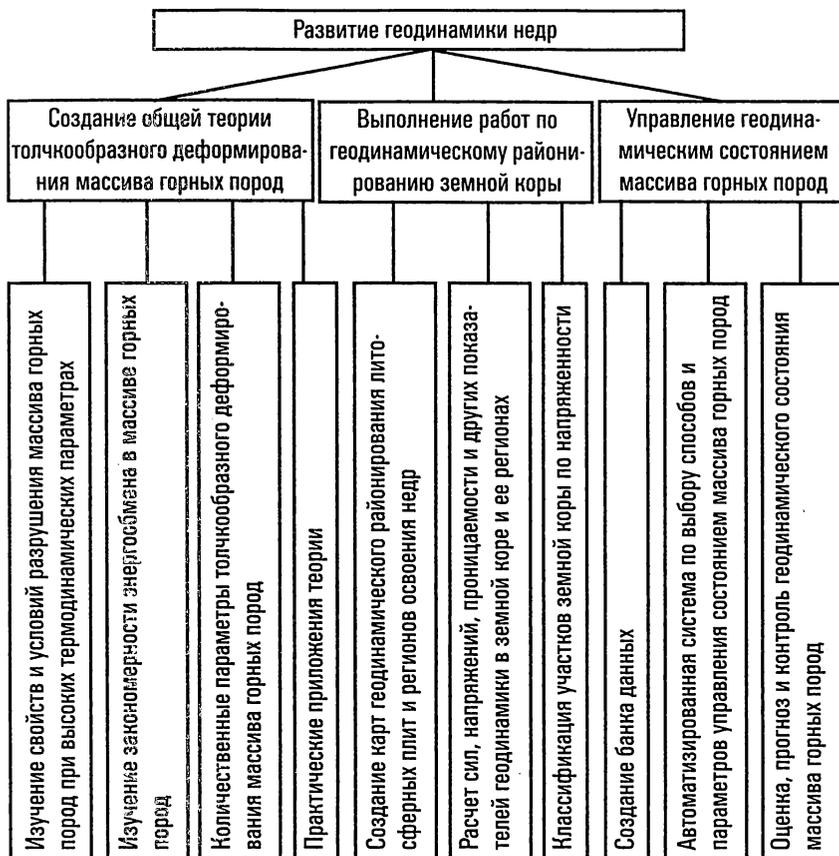


Рис. 13.1. Направления развития геодинамики недр.

Например, должны быть выполнены работы по совершенствованию методики решения плоской и объемной задач для математического моделирования сложного блочного массива горных пород в целях получения достоверных данных о его напряженном состоянии, проницаемости, влагогазоемкости и других свойствах, прогнозирования их изменения во времени и под влиянием техногенного воздействия. При математическом моделировании сложных блочных структур рекомендуется использовать принцип «от общего к частному», заложенный в основу геодинамического районирования [4]. Поскольку этот принцип в нашем случае предусматривает не только геометрические соотношения, но и наличие силового взаимодействия между блоками высшего ранга по отношению к блокам более низшего ранга, расположенным

внутри него, то расчеты возможно выполнять последовательно, например, для системы мегаблоков внутри литосферной плиты, затем для системы блоков I ранга внутри мегаблоков и т.д., а математическое моделирование для блочной структуры практически любой сложности осуществимо достаточно экономичными средствами.

Значительные работы предстоит выполнить также в области физического моделирования процессов энергообмена, процессов управления и использования геознергии при внедрении породоразрушающим инструментом, в том числе на установке «Геознергия».

Одно из направлений развития геодинамики недр – широкое практическое использование и совершенствование метода геодинамического районирования для выделения блочных структур литосферных плит, мегаблоков и блоков I, II и других рангов. Для выполнения этих работ потребуются автоматизация операций геодинамического районирования и создание обширного банка данных на соответствующие регионы земной коры. Предстоят работы по широкому проведению исследований на геодинамических полигонах, закладываемых в районах активных разломов различных типов с учащенной во времени регистрацией деформаций, перемещений, геодинамических, химико-биологических и других параметров.

Наличие оперативной и надежной оценки состояния массива горных пород, прогноза его изменения с учетом техногенного воздействия, контроля состояния во времени и пространстве позволит выполнять разработку способов и средств управления состоянием массива, управления процессами использования геознергии в практической деятельности при освоении недр.

Метод геодинамического районирования недр, наконец, должен найти более широкое использование в ряде других наук о Земле. Трудно себе представить, как, не раскрыв блочную структуру земной коры, ее напряженное состояние и др., можно ставить и решать многие крупные вопросы геотектоники и геологии. Поэтому метод геодинамического районирования должен стать одним из ведущих методов комплексного изучения строения и состояния земной коры по принципу «от общего к частному».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геодинамика недр призвана решать проблемы обеспечения эффективности геодинамической безопасности, соблюдения экологии при освоении недр и земной поверхности посредством управления состоянием массива горных пород на основе оперативной оценки, прогноза и контроля этого состояния с помощью комплексного метода геодинамического районирования.

Дальнейшее развитие геодинамики недр будет способствовать разработке принципов и комплекса глобальных мер и средств по управлению состоянием отдельных регионов земной коры для снижения катастрофичности происходящих в них явлений и процессов.

Как уже отмечалось, одной из важнейших задач геодинамики недр является выполнение работ по геодинамическому районированию как в целом на территориях Евразийской и других литосферных плит, так и отдельных регионах, особо насыщенных техногенной деятельностью по освоению недр и земной поверхности, включая выделение мегаблоков I, II и III рангов, блоков I, II, III, IV и V рангов, исходя из сложности и величины территории, занимаемой тем или другим объектом. Более того, Россия, обладающая методом геодинамического районирования, могла бы выполнять аналогичные работы для многих районов Запада, Ближнего Востока, Китая и др. при активном участии, естественно, зарубежных специалистов. Здесь важно соблюсти единые научные и методические подходы, что позволит выполнить эти работы наиболее эффективно.

Вместе с тем авторы отдают себе отчет в том, что эта новая отрасль наук о Земле сама еще нуждается в дальнейшем развитии и совершенствовании как в области создания общей теории толчкообразного деформирования массива горных пород, так и в области разработки способов и средств управления геознергией и геодинамической безопасностью.

Наука и практика, по мнению авторов, располагают к настоящему времени необходимыми кадрами и лабораторной базой для решения этой крупной проблемы.

В заключение необходимо обратить внимание на метод геодинамического районирования недр с позиций использования его в других науках о Земле. В самом деле, этот метод может оказаться весьма полезным для геологии, геофизики, геотектоники и др., как метод, освещающий современное блочное состояние земной коры, ее напряженное состояние по принципу «от общего к частному». Этот метод создан и применяется не вопреки, тем более не взамен методам исследований, принятым в указанных науках, а в помощь им, значительно расширяя представления о планете Земля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев С.И., Грамберг С.И.* (редакторы) Металлогеническая зональность Мирового океана. ВНИИОкеангеология, СПб, 1997. 172 с.
2. Актуальные проблемы геодинамики. // Тр. Академии наук. – М.: Наука, 1991.
3. *Батугин А.С.* Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности. Тр. ВНИМИ, 1996, с.206–213.
4. *Батугина И.М., Петухов И.М.* Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. – М.: Недра, 1988, 166 с., Индия, 1990.
5. Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. / Бабаев А.М., Кулагин В.К., Лысков А.М. и др. – М.: Наука, 1977.
6. *Воздвиженский Б.И., Ребрик Б.М.* В глубь Земли. – М.: Недра, 1989.
7. Временные указания по выявлению и контролю зон риска возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций при освоении недр и земной поверхности на основе геодинамического районирования недр. /Яковлев Д.В., Петухов И.М., Батугина И.М., Шабаров А.Н. и др. – ВНИМИ: Санкт-Петербург, 1997, 12 с.
8. Выемка крутых пластов угля с помощью канатных пил: Материалы рабочего семинара. /Под. ред. И.М. Петухова. – Л.: ВНИМИ, 1961, с. 153.
9. Геодинамическое районирование месторождений Та-ань. Горный информационный бюллетень. /И.М. Батугина, С.И. Петухов, А.С. Батугин и др. – М.: МГГУ, 1994.
10. Геодинамическое районирование недр. Методические указания. / Под ред. И.М. Петухова, И.М. Батугиной. – Л.: ВНИМИ, 1990.
11. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Недра, 1975.
12. *Грачев А.Ф.* Рифтовые зоны Земли. – М.: Недра, 1987.
13. Динамические процессы в геосферах. Геодинамика сильных возмущений. // Тр. ИГД РАН. – М.: 1994.

14. *Зонненшайн Л.П., Савостин Л.А.* Введение в геодинамику. – М.: Недра, 1979.
15. *Зубков В.В.* О напряженном состоянии и устойчивости упругих блоков, взаимодействующих на границе. // В сб.: Проблемы теории трещин и механизма разрушения. – Л.: ЛГУ, 1986, вып. 15, с. 3–17.
16. *Зубков В.В., Зубкова И.А.* Напряженное состояние в окрестности выработок сложной формы в плане при отработке сближенных пластов свиты. // В сб.: Напряженное состояние горных пород и их разрушение. – Фрунзе: Илим, 1986, с. 100–104.
17. *Зубков В.В., Петухов И.М., Ходырев Е.Д.* Геофильтрационный прогноз в условиях тектонически нарушенных месторождений. // В сб.: Геодинамика месторождений. – Кемерово, КузПИ, 1990. С. 44–52.
18. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих пласты, опасные по горным ударам. – Л.: ВНИМИ, 1988.
19. *Керн У.* В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. – М.: Мир, 1991.
20. *Кротов Н.В., Калачик А.К.* Геобезопасность угольной шахты на основе геомеханической информации, получаемой на разных этапах освоения угольных месторождений. // В сб.: Эффективная и безопасная добыча угля на базе современных достижений геомеханики. – СПб: ВНИМИ, 1997, с. 149–154.
21. *Кротов Н.В., Дунак Ю.Н., Вернигор В.М., Веселов А.П.* Геодинамическая оценка отработки мульдовой части Воркутинского месторождения. // В сб.: Проблемы геодинамической безопасности. – СПб: ВНИМИ, 1997, с. 120–122.
22. *Кузнецов А.В., Канин В.А., Леонев А.Н.* Исследование режима фильтрации в ЗПГД. // В сб.: Горные удары, шахтная геология и геофизика. – Л., ВНИМИ, 1988, с. 11–13.
23. *Лазаревич Т.И., Мулев С.Н.* Опыт мониторинговых наблюдений геодинамических процессов в Кузбассе. // Проблемы геодинамической безопасности. II Международное совещание 24–27 июня 1997 г. – СПб: ВНИМИ, 1997, с. 17–24.
24. *Лазаревич Т.И.* Геодинамическая безопасность при освоении недр и земной поверхности в Кузбассе. // Экология и развитие Северо-Запада России. // Сб. докл. 3-ей Международной конференции, 1998.
25. *Липтев Б.В.* Предотвращение газодинамических явлений на калийных рудниках. – М.: Недра, 1994.
26. *Литвинов Э.М., Андреев С.И., Астрафурова Е.Г. и др.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Атлантического и Тихого океанов. – М.: Наука, 1992, 193 с.
27. *Лодус Е.В.* Энергообмен при деформировании и разрушении горных пород. Автореф. дисс. д.т.н. – СПб: ВНИМИ, 1993, 37 с.

28. Методические указания по прогнозу ударо- и выбросоопасных зон вблизи разрывных нарушений. – Л.: ВНИМИ, 1990.
29. Мулев С.Н., Д.Г. Лопатков, В.А. Яковлев. Геофизический мониторинг рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского ГМК. // Физика и механика разрушения горных пород применительно к прогнозу динамических явлений. /Сборник трудов семинара. 1995. ВНИМИ. С. 111–118.
30. Мулев С.Н. Экспериментальные исследования системы автоматического управления добычными механизмами при выемке удароопасных пластов. // Совершенствование способов разработки удароопасных месторождений. / Сборник трудов. Л.: ВНИМИ, 1986. С. 56–60.
31. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, т. 2, Недра, 1988.
32. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. – М.: Недра, 1988.
33. Орлова А.В. Блочные структуры и рельеф. – М.: Недра, 1975.
34. Охрана подготовительных выработок без целикров. /Н.П. Бажин, В.В. Райский, Ю.В. Волков и др. – М.: Недра, 1975.
35. Певнев А.К. Об экспериментальной проверке тектоники литосферных плит и других геодинамических задач геодезии. // Изв. Академии наук. Сер. Физика Земли. – М.: 1994.
36. Пейве А.В. Глубинные разломы и мобилизм. /В сб.: Разломы и горизонтальные движения платформенных областей. – М.: Наука, 1977.
37. Петухов И.М. Горные удары в угольных шахтах. – М.: Недра, 1972, Китай, 1980.
38. Петухов И.М. Поддержание горных выработок на больших глубинах. – М.: Углетехиздат, 1956.
39. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983.
40. Петухов И.М. О природе горизонтальных сил в земной коре. – СПб: ВНИМИ, 1991.
41. Петухов И.М. Линьков А.М., Сидоров В.С. и др. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов. – Л.: ВНИМИ, 1993.
42. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. – М.: Недра, 1996.
43. Петухов И.М. К оценке напряженного состояния в литосфере. – СПб: ВНИМИ, 1997
44. Петухов С.И. Разработка методики выявления блочной структуры океанического дна на основе геометризации для повышения эффективности его освоения. Автореф. дисс. к.т.н., МГГУ, 1996, 18 с.
45. Регламентация порядка перехода на региональное управление выбросо- и удароопасностью свит угольных пластов при проектировании и эксплуатации глубоких шахт. – Л.: ВНИМИ, 1992, с. 38.

46. *Смирнов В.А.* Физические процессы в очагах горных ударов и региональный прогноз их по геофизическим полям: Автореф. дисс. д.т.н. – СПб: ВНИМИ, 1991, 51 с.
47. *Суворов А.И.* Проблемы пространственной и возрастной корреляции глубинных разломов. – М.: Недра, 1989.
48. Теория защитных пластов. / И.М. Петухов, В.С. Сидоров, И.А. Фельдман, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1976.
49. *Теркот Д., Шубер Дж.* Геодинамика. – М.: Мир, 1985.
50. Управление геомеханическим состоянием массива горных пород. / Петухов И.М., Сидоров В.С., Кузнецов В.П. и др. – СПб: ВНИМИ, 1994.
51. *Федотов С.А.* Землетрясения – уроки и проблемы. //Природа. – 1989. – № 12. – С. 128.
52. *Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. – М.: МГУ, 1995, 477 с.
53. *Шабаров А.Н.* Геомеханические аспекты, опыт и перспективы решения проблем геодинамической безопасности на предприятиях топливно-энергетического комплекса. // В сб.: Проблемы геодинамической безопасности. – СПб, 1997, с. 19–31.
54. *Шабаров А.Н.* Повышение эффективности гидроотработки угольных пластов в геодинамически опасных зонах. //Вопросы гидрогеологии и гидромеханики горного производства: Сборник научных трудов. – СПб, 1998, с. 109–114.
55. *Шабаров А.Н., Маркичев Е.И., Гусева Н.В., Мельников Е.К.* Результаты выделения геодинамически и экологически опасных зон на территории Северо-Западного региона России. 3-я Международная конференция «Экология и развитие Северо-Запада России», 1998.
56. *Шейдеггер А.* Основы геодинамики. – М.: Недра, 1987.
57. Эволюция геологических процессов в истории Земли. / Отв. ред. акад. Н.П. Лаверов. – М.: Наука, 1991.
58. *Д.В. Яковлев, Ю.А. Норватов, Ю.С. Исаев и др.* Мониторинг геодинамической и геоэкологической безопасности освоения недр и земной поверхности. II Международное совещание 24–27 июня 1997 г. – СПб: ВНИМИ, 1997, с. 5–18.