



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

А. В. Ловчиков

**СИЛЬНЕЙШИЙ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ УДАР
НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ И В ШАХТАХ РОССИИ:
РУДНИК «УМБОЗЕРО», 17 АВГУСТА 1999 ГОДА
(МАГНИТУДА $m = 5$, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КЛАСС $k = 11,8$)**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

А. В. Ловчиков

**СИЛЬНЕЙШИЙ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ УДАР
НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ И В ШАХТАХ РОССИИ:
РУДНИК «УМБОЗЕРО», 17 АВГУСТА 1999 ГОДА
(МАГНИТУДА $m = 5$, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КЛАСС $k = 11,8$)**



Издательство Кольского научного центра РАН
2022

УДК 622.831.32 + 550.34

ББК 33

Л68

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Ловчиков, А. В.

Л68 Сильнейший горно-тектонический удар на подземных рудниках и в шахтах России: рудник «Умбозеро», 17 августа 1999 года (магнитуда $m = 5$, энергетический класс $k = 11,8$): монография / А. В. Ловчиков. — Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2022. — 127 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-456-3

Монография посвящена проблемам предупреждения катастрофических горных ударов и предотвращению их последствий на примере горно-тектонического удара (ГТУ) на руднике «Умбозеро» 17 августа 1999 г. Проанализированы причины и обстоятельства этого сильнейшего геодинамического (сейсмического) события за всю историю шахт и рудников России, в результате которого были разрушены подземные выработки на площади 650 тыс. м², было утеряно крупное предприятие по добыче редкоземельных руд, а страна понесла многомиллионные убытки. Дано описание горно-геологических условий рудника «Умбозеро», свойств пород, параметров напряженного состояния массива и последовательности развития горных работ на двух обрабатываемых пологопадающих сближенных рудных залежах.

Показано, каким образом возрастали динамические проявления горного давления на руднике по мере роста масштабов добычи руды. Методами моделирования вычислено, как изменялось напряженное состояние массива в зоне отработки сближенных залежей и каким образом оно достигло критических состояний, при которых произошел ГТУ с разрушением горных выработок. Описано, как образовалась трещина разрыва в области сближенных обрабатываемых залежей массива до дневной поверхности, явившаяся следствием ГТУ. На основании замеренных энергетических параметров ГТУ, зарегистрированных многими сейсмостанциями мира, и геометрических характеристик зоны разрушения в горных выработках и массиве установлено, что эти характеристики подчиняются закономерностям очаговой зоны землетрясений с учетом специфики горно-геологических условий рудника. Доказано, что динамические проявления горного давления происходят по установленному в сейсмологии закону самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях. Однако при применении этого закона должны учитываться горно-геологические условия рудника. В частности, площадь (объем) подвижки при геодинамическом событии должна определяться по площади (объему) проявления неупругих деформаций (разрушений) в горных выработках. На основании данного закона на разных масштабных уровнях разработана новая классификация геодинамических явлений на рудниках, которая позволяет количественно отличать геодинамические проявления горного давления разного ранга.

Монография может быть полезна работникам горнодобывающих предприятий, а также студентам и аспирантам горных вузов.

Фотография на обложке Пантелеева Алексея Владимировича

УДК 622.831.32 + 550.34

ББК 33

Научное издание

Редактор Е. Н. Еремеева

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 06.05.2022. Формат бумаги 70×108 1/16.

Усл. печ. л. 11,11. Заказ № 32. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-456-3

doi:10.37614/978.5.91137.456.3

© А. В. Ловчиков, 2022

© Горный институт КНЦ РАН, 2022

© ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УДАРЫ И ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА РУДНИКАХ.....	7
2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА 17 АВГУСТА 1999 ГОДА НА РУДНИКЕ «УМБОЗЕРО»..	20
3. ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РУДНИКА «УМБОЗЕРО» И СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ К 17 АВГУСТА 1999 ГОДА.....	26
4. ПОСЛЕДСТВИЯ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА 17 АВГУСТА 1999 ГОДА НА РУДНИКЕ «УМБОЗЕРО».....	47
5. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА РУДНИКА «УМБОЗЕРО» В ЗОНЕ ВЫЕМКИ СБЛИЖЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ.....	59
6. СЕЙСМО-ДЕФОРМАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РУДНИКА «УМБОЗЕРО».....	80
7. СЕЙСМИЧНОСТЬ МАССИВА РУДНИКА «УМБОЗЕРО» В ПРОЦЕССЕ ЕГО КОНСЕРВАЦИИ И ЗАТОПЛЕНИЯ.....	102
8. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ГОРНО- ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ. НОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА РУДНИКАХ.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
ЛИТЕРАТУРА.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Семнадцатого августа 1999 г. на руднике «Умбозеро» ОАО «Севредмет» (Ловозерское редкометалльное месторождение) произошел сильнейший ГТУ, равносильный землетрясению, с магнитудой по шкале интенсивности землетрясений Ч. Рихтера $M_L = 5,0$ (энергетический класс события k , по данным Геофизической службы Российской академии наук (ГС РАН), 11,8). ГТУ явился сильнейшим сейсмическим событием такого рода по выделенной энергии, масштабам разрушений в подземных горных выработках и негативным последствиям за всю историю эксплуатации шахт и рудников России. Площадь разрушенных подземных выработок составила 650 тыс. м², рудник «Умбозеро» был полностью остановлен и выведен из эксплуатации на 3,5 месяца, для полного восстановления от аварии понадобилось полтора года. Рудник «Умбозеро», в основном из-за произошедшего, функционировал только до 2004 г., затем был законсервирован, а в 2009 г. затоплен. Сейсмические события в его массиве после 17.08.1999 г. происходили еще долгое время. В частности, 4 октября 2004 г., уже в период консервации рудника, в его недрах зарегистрировано техногенное землетрясение (ТЗ), магнитуда по Ч. Рихтеру $M_L = 3,9$, энергетический класс события $k = 9,8$, явившееся прямым следствием ГТУ 17.08.1999 г., поскольку в 2004 г. в массиве расширилась трещина, образовавшаяся в тот момент.

С момента ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» прошло двадцать лет, но ни до ни после геодинамических событий на рудниках России, близких или равных ему по энергетическому классу и масштабам разрушений горных выработок, не происходило и не происходит, то есть оно является уникальным. Вполне вероятно, что в будущем подобных событий на российских рудниках может более и не произойти. Между тем, описание ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» и его последствий выполнено нами в 2000–2002 гг. только в двух статьях [1, 2] — по «свежим следам», когда еще не были полностью установлены его причины и следствия. Позднее в нескольких работах фрагментарно описаны некоторые аспекты сейсмических событий 17.08.1999 г. и 4.10.2004 г. К текущему моменту, спустя двадцать лет, когда детально установлены характеристики ГТУ 17.08.1999 г., выявлены условия и причины, приведшие к его возникновению, все обстоятельства так и не были освещены, что побудило к написанию настоящей работы.

Горно-тектонический удар 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» является необычным и «чисто техногенным» событием, так как он произошел из-за порядка ведения горных работ на двух сближенных пластообразных отработываемых залежах в условиях действия в массиве высоких гравитационно-тектонических напряжений, обусловленных современными горообразовательными процессами в земной коре. Влияние этих напряжений на способы и параметры горных работ при проектировании рудника «Умбозеро» не учитывалось. Необычны последствия ГТУ 17.08.1999 г.: впервые в практике горных работ зафиксировано не опускание дневной поверхности вследствие обрушений пород в руднике, а ее воздымание. Кроме того, зафиксировано разрушение (сдавливание) наиболее надежных по устойчивости, закрепленных крепью узких (3–4 м шириной) капитальных и подготовительных выработок

меридионального направления с перекрытием разрушенными породами до 90 % их поперечного сечения, в то время как широкие очистные камеры (ширина 15–20 м) и узкие выработки широтного направления остались в основном целыми. Остались практически целыми и поддерживающие (опорные) целики. Зафиксировано разрушение только участков кровли очистных камер, прилегающих к целикам, то есть, казалось бы, наиболее устойчивых участков кровли очистных выработок. Все эти факты свидетельствуют о необычности этого ГТУ, а также об необходимости изучения и анализа условий его проявления.

Горно-тектонического удара на руднике «Умбозеро» возможно было избежать, если бы были предварительно проработаны варианты развития геомеханической обстановки в массиве рудника в процессе одновременной выемки двух сближенных рудных залежей в высоко тектонически напряженном массиве, если бы были оценены изменения напряжений в зоне их совместной отработки и была разработана безопасная последовательность горных работ по каждой из залежей. Наконец, минимизации вредных последствий события, снижения до минимальных значений его энергетического уровня можно было бы достигнуть за счет технологии и последовательности ведения горных работ на руднике при организации и проведении сейсмодеформационного мониторинга состояния массива. Ничего этого при проектировании рудника и в процессе его эксплуатации не было сделано. Более того, деформометрический и сейсмоакустический комплексы наблюдений, организованные Горным институтом Кольского научного центра Российской академии наук (КНЦ РАН), в момент подготовки и совершения сейсмического события 17.08.1999 г. на руднике бездействовали ввиду трудностей экономического характера. Поэтому анализ последовательности развития горных работ, изменения напряженного состояния пород вокруг выработок при выемке двух пологопадающих сближенных рудных залежей в условиях действия в массиве больших горизонтальных тектонических сил, причин и последствий сейсмического события 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро», выполненный в настоящей монографии, поможет избежать подобных явлений при разработке рудных залежей с аналогичными горно-геологическими условиями.

В работе впервые в отечественной горнотехнической литературе описаны причины и последствия неправильных технических решений, принятых без учета фактических силовых факторов, действующих в массиве горных пород. Было показано, что современные тектонические напряжения, действующие в массиве, необходимо учитывать при проектировании рудников наряду с другими горнотехническими характеристиками, такими как физико-механические свойства пород, структурная нарушенность массива и его геологическое строение.

В настоящее время теория подготовки и возникновения мощных ГТУ и ТЗ на рудниках пока не разработана. Очевидно, для ее создания необходимы анализ и обобщения ряда материалов о фактических событиях, происшедших на рудниках в реальных горно-геологических условиях. Поэтому важно натурное описание ряда подобных событий, возможно, с более подробной характеристикой всех влияющих факторов. В качестве примера можно привести монографическое описание мощного ТЗ (магнитуда $M = 5,3$), происшедшего в США 3 февраля 1995 г. на соляном руднике «Солвей»

(P. L. Swanson, F. M. Boler “The Magnitude 5,3 Seismic Event and Collapse of the Solvay Trona Mine: Analisis of Pillar / Floor Failure Stability”. Open File Report 86–95 US Department of the Interuor, Burean of Mines). Подобные работы в отечественной горнотехнической литературе, за редким исключением, отсутствуют. Настоящая монография в определенной мере может восполнить этот недостаток.

В последнее время в связи с дефицитом редкометалльного сырья в России возрос интерес к расширению объемов добычи руд на Ловозерском редкометалльном месторождении. Существуют предложения об откачке воды из рудника «Умбозеро» и новом запуске его в эксплуатацию (совещание у председателя КНЦ РАН, члена-корреспондента РАН С. В. Кривовичева с делегацией «Росатома» 10 июня 2019 г., город Апатиты). Анализ последствий и причин ГТУ 17.08.1999 г., приведенный в работе, позволит избежать подобных явлений при возможном восстановлении и дальнейшей эксплуатации рудника.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проекты № № 15-05-04323 и 18-05-00563), которому автор выражает свою искреннюю благодарность.

1. ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УДАРЫ И ТЕХНОГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА РУДНИКАХ

Сейсмические события, разрушившие рудник «Умбозеро» 17.08.1999 г., сопровождалась рядом толчков в недрах Ловозерского массива и трактовались первоначально как землетрясения. Они были зарегистрированы в качестве землетрясений рядом сейсмических станций. Однако эти события были чисто техногенными, вызванными выемкой двух сближенных рудных залежей на руднике в условиях действия в массиве горизонтальных тектонических сил. Поскольку по сейсмическому эффекту толчки были равносильны толкам при естественных землетрясениях, целесообразно рассмотреть различия между естественными землетрясениями, ТЗ при горных работах и ГТУ

Землетрясение — одна из наиболее сильных природных опасностей, связанная с разрушением целых городов и поселков, многочисленными человеческими жертвами. Еще недавно, в XX в., оно считалось чисто природным явлением, связанным с перемещением в земной коре тектонических плит. Однако в связи с ростом объемов и масштабов горных работ в земной коре на рудниках и в шахтах стали происходить сейсмические события, подобные землетрясениям, с разрушением горных выработок и поверхностных сооружений, с сейсмическими эффектами, наблюдаемыми при землетрясениях, однако меньшими по энергии и последствиям. Эти явления стали называть техногенными землетрясениями, так как их причиной была человеческая деятельность. Ввиду того что регистрация сейсмических явлений при горных работах осуществляется теми же способами и методами, что и в сейсмологии, при характеристике указанных явлений используется сейсмологическая терминология.

«Землетрясения — сильные колебания земной коры, вызванные тектоническими или вулканическими причинами» [3]. В некоторых энциклопедических изданиях в словарной статье «землетрясение» слово «сильное» убрано. В частности, в [4, 5] приведены следующие определения: «Землетрясения — колебания (сотрясения) поверхности и недр Земли, вызываемые в основном внезапным, быстрым смещением крыльев существующих (или вновь образующихся) тектонических разрывов; способны передаваться на большие расстояния» [4]. Или другое, более краткое определение: «Землетрясение — необратимая деформация земных недр, связанная с высвобождением упругих напряжений в результате разрыва среды» [5]. Между тем, без слова «сильное» понятие «землетрясение» теряет свой смысл, так как слабых колебаний поверхности и недр Земли, особенно техногенного происхождения, возникает великое множество, однако не все они являются землетрясениями. Особенно много колебаний земных недр происходит при горных работах: при взрывном разрушении горных пород, транспортировке и перемещении породных масс, при обрушении пород в выработанное пространство и т. д. Однако горными, горно-тектоническими ударами и ТЗ при горных работах называют только сильные геодинамические события в выработках, связанные с самопроизвольным высвобождением упругой энергии, запасенной в породах, вызванные проведением в них горных работ и сопоставимые по сейсмическому эффекту на поверхности и в земных недрах с естественными землетрясениями. В сейсмологической литературе любую

сейсмичность, происходящую при горных работах, кроме сейсмичности от взрывов, называют горными ударами. Академик В. В. Адушкин для идентификации шахтной сейсмичности предлагает называть наиболее сильные сейсмические события на рудниках и в шахтах мощными (10^9 – 10^{10} Дж) и особо мощными (10^{11} – 10^{12} Дж) ГТУ [6]. Однако, как это будет показано далее, такое разделение является недостаточно четким, так как между ГТУ и ТЗ существуют определенные различия.

Начнем с регистрации сейсмических событий на рудниках. В настоящее время на большинстве разрабатываемых крупных рудных месторождений России, опасных по горным ударам, по инициативе Ростехнадзора Российской Федерации созданы службы прогноза и профилактики горных ударов (СППГУ), которые оснащены автоматизированными системами контроля сейсмичности массива и другими средствами. Эти системы регистрируют и документируют все сейсмические события на рудниках начиная с уровня энергии $E = 10^2$ – 10^3 Дж и выше. Крупные сейсмические события (более $E > 10^5$ Дж) на рудниках России, кроме того, регистрируются сейсмостанциями ГС РАН, а также расследуются по их последствиям на рудниках службами СППГУ. Сильные сейсмические события на рудниках (ГТУ и ТЗ) регистрируются, как это будет показано далее, рядом зарубежных сейсмических станций. Сейсмостанции ГС РАН фиксируют сейсмические события в земных недрах начиная с определенного минимального порога магнитуд, то есть с определенного минимального энергетического уровня колебаний в недрах, характеризующихся этими магнитудами. Указанный порог для разных регионов страны различен, но диапазон регистрируемых минимальных значений магнитуд составляет от 2,0 до 4,5 [7].

«Магнитуда землетрясения — условная величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясениями или взрывами; пропорциональна логарифму энергии землетрясений; позволяет сравнивать источники колебаний по их энергии» [8]. «Магнитуда — это, по существу, полученная из сейсмограммы мера смещения почвы (или смещения частиц среды). Смещение почвы и амплитуда сейсмической волны — одно и то же, и чем сильнее размах волны, тем больше магнитуда землетрясения» [8]. Смещение почвы при землетрясении зависит от многих факторов: силы (мощности) события, расстояния до гипоцентра, глубины расположения его очага, грунтовых условий среды, через которую проходят сейсмические волны и, наконец, от типа и характеристик сейсмометра, на котором производится регистрация волн. Само понятие «магнитуда» ввел американский сейсмолог Ч. Рихтер, который регистрировал землетрясения при помощи крутильного короткопериодного сейсмографа Вуда-Андерсена [8].

Магнитуда является условной характеристикой очага землетрясения, характеризующей его энергию. Она связана с определенными сейсмическими волнами и записями их конкретной стандартной аппаратурой в ограниченном ею частотном диапазоне с известным из наблюдений затуханием волн с расстоянием. Основное уравнение магнитуды имеет вид [9]:

$$M = \lg (A, A / T) + \sigma (\Delta) + c, \quad (1.1)$$

где A — амплитуда колебаний (максимальная либо находящаяся вблизи первого вступления) в конкретной волне P , S , L_g , поверхностной волне, коде; A / T — отношение максимальной амплитуды к периоду; A — амплитуда

при фиксированном периоде; $\sigma(\Delta)$ — калибровочная функция, описывающая изменение амплитуд с расстоянием; c — свободный член, вводится для установления «нуля шкалы».

В международной практике принято использование следующих магнитуд [9].

M_L — шкала локальных магнитуд Рихтера [10]. Основана на записях волн короткопериодным прибором Вуда-Андерсона (интервал периодов 0,1–3 с) при расстояниях до 600 км. Используется при $M \leq 6,0$.

M_S — определяется по поверхностным волнам в интервале периодов 17–23 с и расстояний 1500–15 000 км. Стандартна в практике сейсмических служб США в интервале магнитуд от 4,0 до 8,0. Предложена Б. Гутенбергом — Ч. Рихтером [9]. Связана с энергией соотношением:

$$\lg E = 1,5M_S + 4,8, \quad (1.2)$$

где E в Дж.

Связь между магнитудами M_L и M_S может быть выражена соотношением [9]:

$$M_S = 1,13M_L - 1,08. \quad (1.3)$$

M_B — определяется по объемным волнам P и S в интервале периодов 0,5–12 с. Предложена Б. Гутенбергом в 1945 г. Связана с M_S соотношением:

$$M_S = 1,59 M_B - 4,0. \quad (1.4)$$

m_B — определяется по телесеismicким записям волны P приборами Бенюффа в полосе периодов 0,8–1,8 с.

M_{ML} — магнитуда Японского метеорологического агентства. Определяется при расстояниях до 600 км по записи 5-секундных маятников. В этих условиях максимум соответствует либо поперечным волнам S , либо высшим модам поверхностных волн [9].

M_W — моментная магнитуда, связанная с сейсмическим моментом M_0 формулой, полученной из соображений подобия [9]:

$$M_W = 2/3 \lg M_0 - 10,7. \quad (1.5)$$

В практике сейсмологических наблюдений на территории России применяют также следующие шкалы [9]: MLH , MLV — определяются по отношению A/T в максимальной фазе поверхностной волны на записях горизонтальной (H) или вертикальной (V) компонент стандартной низкочастотной аппаратурой СК или СКД в диапазоне периодов от 5–7 с (при небольших расстояниях) до 12–17 с (при больших расстояниях). MLH близка по величине магнитуде M_S . В магнитудном диапазоне 4,5–8,5 разница $MLH - M_S$ не превышает 0,2. Связь между энергией и магнитудой MLH описывается соотношением

$$\lg E = 1,5 MLH + 5,0, \quad (1.6)$$

где E в Дж.

$MPVB$ — определяется величиной A/T в максимуме продольной волны на записях аппаратурой СКД в интервале периодов 3–10 с. В отличие от магнитуд, связанных с поверхностными волнами, $MPVB$ имеет важное преимущество, являясь единой во всем диапазоне глубин.

$MPVA$ определяется по телесеismicким записям волны P прибором СКМ в интервале периодов 0,8–1,8 с; близка магнитуде m_B . Разница $MPVA - m_B = 0,17$ для слабых землетрясений ($M < 4,5$) и увеличивается с ростом магнитуды.

M_D — магнитуда по длительности колебаний, используемая в мировой практике локальных сетей для классификации слабых землетрясений. При оценке сейсмической опасности предпочтительно использовать короткопериодные магнитуды, связанные с диапазоном периодов, представляющих интерес в инженерной практике (0,1–3 с): $m_B, M_L, MPVA, M_C^{СКМ}, MMC$ [9].

k — энергетический класс землетрясений (Дж):

$$k = \lg E. \quad (1.7)$$

Соотношение между магнитудой и энергией землетрясения по шкале магнитуд Ч. Рихтера M_L из выражений (1.2), (1.3) таково:

$$\lg E = (1,13M_L - 1,08)1,5 + 4,8. \quad (1.8)$$

Величина энергии землетрясений при различных значениях магнитуд M_S и M_L , вычисленная по соотношениям (1.2) и (1.3), приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Соотношение между магнитудами M_S и M_L и энергией землетрясений

M_S	M_L	Высвобожденная энергия, Дж
0	0,96	$1,7 \times 10^5$
1	1,8	$4,8 \times 10^6$
2	2,7	$1,3 \times 10^8$
3	3,6	$3,6 \times 10^9$
4	4,5	$1,0 \times 10^{11}$
5	5,4	$2,7 \times 10^{12}$
6	6,3	$4,4 \times 10^{13}$
7	7,15	$2,1 \times 10^{15}$
8	8,0	$5,7 \times 10^{16}$
9	8,9	$1,6 \times 10^{18}$

Как видно из данных табл. 1.1, диапазон минимальных значений магнитуд событий $M = 2,0-4,5$, регистрируемых сейсмостанциями ГС РАН, соответствует энергии сейсмических событий $E = (5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^{12})$ Дж, то есть тому классу событий, который академик В. В. Адушкин предлагает называть мощными и особо мощными ГТУ.

Магнитуда характеризует энергию землетрясения в очаге события. Однако на поверхности Земли сила землетрясения обычно оценивается в баллах. Существует несколько шкал интенсивности землетрясений в баллах. В нашей стране используют международную шкалу MSK–64 (по начальным буквам фамилий ее создателей — С. В. Медведева, В. Шпонхойера и В. Карника — и году принятия). В США и ряде других стран принята предложенная итальянским сейсмологом Меркалли и позднее усовершенствованная шкала ММ. В Японии используют 8-балльную шкалу японского метеорологического агентства JMA. Описание шкалы интенсивности землетрясений MSK–64 приведено в табл. 1.2. Она использована в дальнейшем при описании эффектов ГТУ на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г.

Таблица 1.2

Шкала интенсивности землетрясений MSK–64 [9]

Балл	Описание эффектов
1	Неощутимое землетрясение; колебания почвы отмечаются только приборами
2	Едва ощутимые землетрясения; ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии
3	Слабые землетрясения; отмечаются немногими людьми
4	Заметные сотрясения; отмечаются многими людьми; возможно дребезжание стекол
5	Пробуждение (многие спящие пробуждаются), качание висячих предметов
6	Испуг; легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке
7	Повреждения зданий; трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах
8	Сильные повреждения зданий; большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	Всеобщие повреждения зданий, в некоторых зданиях обвалы; обрушение стен, перекрытий, кровли
10	Всеобщие разрушения зданий, обвалы во многих зданиях; трещины в грунтах до 1 м шириной
11	Катастрофа; многочисленные трещины на поверхности земли, большие обвалы в горах
12	Изменение рельефа в больших размерах, изменение русел рек, возникновение новых водоёмов

Специальной шкалы интенсивности землетрясений для подземных горных выработок не разработано. Однако считается, что под землей интенсивность землетрясений ощущается слабее, чем на поверхности, приблизительно на один балл [4]. В связи с введением понятий «горно-тектонический удар» и «техногенное землетрясение» на рудниках целесообразно рассмотреть понятие «очаг землетрясений». Очаг — это источник сейсмических колебаний при землетрясениях или некое внутриземное пространство, из которого излучается сейсмическая энергия. По мнению специалистов, первичной деформацией пород при землетрясениях является подвижка по разлому или новый разрыв пород в недрах. То есть очаг представляет собой плоскость или несколько плоскостей, по которым происходят подвижки пород. Приведем геологическое определение этого понятия: «Очаг землетрясения — область внутри земли, где под влиянием внутренних причин внезапно выделяется потенциальная энергия; это сопровождается разрушением и интенсивными необратимыми деформациями природного материала. За пределами очага землетрясения деформации горных пород имеют преимущественно обратимый характер. Размеры очага землетрясения связаны с энергией землетрясения E и составляют десятки метров при $E \cong 10^2 \div 10^4$ Дж; сотни метров при $E \cong 10^5 \div 10^9$ Дж; километры при $E \cong 10^{10} \div 10^{16}$ Дж и десятки километров в случае наиболее разрушительных землетрясений» [11].

В приведенном определении указаны соотношения между энергией события и длиной площади разрыва в недрах при его совершении. Нижние пределы выделенной энергии ($E = 10^2\text{--}10^9$ Дж) и длины площади разрыва (десятки метров — километры) соответствуют явлениям горных ударов, ГТУ и ТЗ на рудниках. Это обстоятельство в определенной степени свидетельствует об установленном М. А. Садовским с соавторами [12] законе самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях. Как известно, очаги землетрясений располагаются на глубине от 10 до 700 км от поверхности Земли, хотя большинство землетрясений (около 70 %) происходит в земной коре, на глубине до 60 км. В очаге землетрясения оказаться невозможно, ввиду большой глубины его расположения [13], а вот в очаге ГТУ или ТЗ, вызванных горными работами, оказаться возможно, так как они располагаются в горных выработках рудников и шахт.

Понятие очага ГТУ на рудниках впервые в отечественной горнотехнической литературе приведено в нашей работе [14]. В ней показано, что по энергетическим показателям и размерам очагов естественные землетрясения и ГТУ на рудниках подобны друг другу. В этом проявляется закон самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях. В качестве очага события при ГТУ предложено называть область разрушения пород в подземных выработках [15].

В сейсмологии для оценки длины очага землетрясения используется формула [16]:

$$\lg \ell = 0,244 \lg E - 2,266, \quad (1.9)$$

где E — энергия землетрясения, Дж; ℓ — длина разрыва, км.

В работе [14] показано, что качественно формула (1.9) подходит для определения размеров очагов ГТУ на рудниках, но количественно она дает неверные результаты, поскольку не учитывает специфики горно-геологических условий рудников. Для определения размеров очагов ГТУ на рудниках в зависимости от энергии событий нами предложена следующая формула [14, 15]:

$$k = \lg E = 3,26L + 8,3, \quad (1.10)$$

где k — энергетический класс события, Дж; L — поперечный размер очага события, км;

$$L = \sqrt{S}, \quad (1.11)$$

где S — площадь очага события, м².

Очагом ГТУ, подобно очагу сейсмического события при землетрясении, рекомендуется считать область проявления неупругих деформаций на руднике, то есть проявлений разрушений, вывалов, трещин, появившихся в результате события [14]. Формула (1.10) пригодна для сильных сейсмических событий на рудниках в рамках магнитуд $M_L = 2\text{--}5$ при глубине расположения очагов, не превышающей их поперечного размера. Зависимости (1.10), (1.11) получены на основании статистической обработки данных о ГТУ, произошедших на российских рудниках. В них, в отличие от зависимости (1.9) для естественных землетрясений, учитывается специфика горно-геологических условий рудников.

К динамическим характеристикам очага землетрясения относятся сейсмический момент M_0 и подвижка δ [9], которые определяются по формуле:

$$M_0 = GS\delta, \quad (1.12)$$

где M_0 — сейсмический момент $N \cdot м$; G — модуль сдвига пород в очаговой области, МПа; δ — средняя величина подвижки, м; S — площадь разрыва, $м^2$.

В дальнейшем показано, каким образом эти характеристики определяются для ГТУ на рудниках. Модуль сдвига пород при обычных испытаниях нередко не используют. Однако его можно вычислить по установленным в геофизике соотношениям [4]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (1.13)$$

где E — модуль упругости пород, МПа; ν — коэффициент поперечных деформаций пород.

В соответствии с современными представлениями геофизики земная кора (геологическая среда) представляет собой иерархически блочную систему, то есть не сплошную среду, а систему структурных блоков разного масштаба, как бы вложенных друг в друга и разделенных трещинами (разломами) разной мощности (толщины), и разной протяженности [12]. Ответная реакция геологической среды при проведении горных работ зависит от того, какую по величине структуру массива затрагивает воздействие горных работ, то есть насколько напряженное состояние массива, возмущенное горными выработками, изменяет напряженное состояние нетроннутого до воздействия горных работ массива. Ответная реакция горного массива самопроизвольно выбирает тот уровень энергетического отклика, который адекватен воздействию на него [17]. Поэтому ключевым понятием в проблеме прогноза горных, особенно горно-тектонических ударов, оказывается представление о геолого-структурных блоках, то есть о тех элементах, из которых состоит горный массив, и междублоковых границах, которые их разделяют. В работе [18] нами предложена классификация блоковых структур рудников, на которые разделяются горные массивы (табл. 1.3).

Экспериментальными наблюдениями установлено, что в тектонически напряженных массивах динамические проявления горного давления существенно зависят от размеров техногенного вмешательства в напряженное состояние массива. Известно, в частности, что горные удары в геолого-разведочных скважинах отсутствуют, хотя шелушение, выкалывание, кавернообразование в стенках скважин свидетельствует о том, что сейсмические явления с небольшой энергией импульсов в них происходят. В одиночных горно-подготовительных и горно-капитальных выработках горные удары наблюдаются относительно редко. На их долю приходится не более 10–20 % всех происшедших горных ударов, причем относительно невысокого энергетического уровня (толчки, стрельание, микроудары, горные удары). И только в комплексах горных выработок с поперечными размерами по протяженности не менее сотен метров происходят мощные горные и горно-тектонические удары с выделенной сейсмической энергией 10^8 – 10^{13} Дж. Схематически формы динамических проявлений горного давления, соответствующие различным масштабам горных работ при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов, показаны на рис. 1.1.

Таблица 1.3

Классификация блоковых структур, образуемых тектоническими нарушениями

Блоковая структура	Ранг (порядок) нарушений, ограничивающих блок, и блоковых структур	Протяженность нарушений, ограничивающих блок	Средний поперечный размер блока
Тектонический блок	I	Сотни и тысячи километров	500–1000 км
Региональный геолого-структурный блок	II III	Десятки и сотни километров Единицы и первые десятки километров	50–100 км 5–10 км
Локальный геолого-структурный блок	IV V	Сотни и первые тысячи метров > 10 м	500–1000 м 50–100 м
Трещинно-блоковая отдельность	VI VII–VIII	1–10 м < 1 м	5 м < 1 м

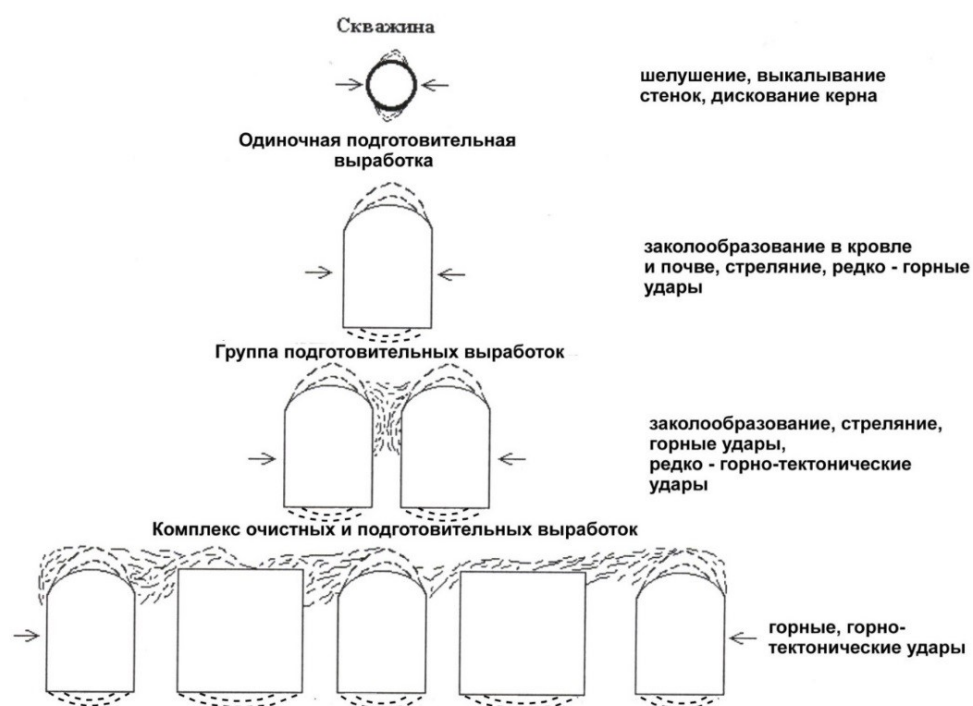


Рис. 1.1. Схема развития форм динамических проявлений горного давления с ростом масштабов горных работ при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов

Очевидно, при горных ударах, происходящих в горных выработках, проявляются поля напряжений разных рангов, существующие в массивах, и различные ранги структурной неоднородности массивов. Масштаб техногенного вмешательства (горных работ) служит своеобразным индикатором, который позволяет сочетанию двух упомянутых факторов (природному полю напряжений и структурной неоднородности разных рангов) проявиться в динамической форме. При этом это сочетание самопроизвольно выбирает тот масштаб динамического явления в горных выработках (шелушение, стреляние, горный удар, ГТУ, ТЗ), который адекватен техногенному воздействию на массив.

В соответствии с классификацией структурных неоднородностей массивов (см. табл. 1.3), можно ориентировочно оценить масштаб геологических структур, активизированных горными работами соответствующего размера, вызывающими те или иные формы динамических проявлений горного давления (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Формы экстремальных динамических проявлений горного давления, соответствующие масштабам активизированных горными работами геологических структур

Ранг геологической структуры	Масштаб горных работ (выработок), активизирующих структуру	Характерный размер выработок, см	Форма динамических проявлений горного давления
VII–VIII	Шпур, скважина	$10^0–10^1$	Шелушение, выкалывание стенок
VI	Одиночная выработка, сдвоенная выработка	$10^2–10^3$	Стреляние, заколообразование, горный удар
V–III	Комплексы подготовительных и очистных выработок	$10^4–10^6$	Горный, горно-тектонический удар, ТЗ

Горно-тектонические удары и ТЗ при горных работах относятся к специфическому классу природно-технических явлений, возникающих при воздействии человека на природную среду (горный массив) и являющихся ответной реакцией этой среды на его деятельность, которая зависит от многих факторов, но в первую очередь от масштабов воздействия горных работ на окружающий массив горных пород. ГТУ и ТЗ при горных работах значительно отличаются от естественных землетрясений и имеют целый ряд специфических особенностей [19].

1. Максимальная мощность ГТУ на подземных рудниках и в шахтах ограничивается значениями магнитуд событий $M_L = 5,0–5,5$. По нашему мнению, указанные предельные значения мощности событий на рудниках связаны с ограниченными размерами шахтных полей, в пределах которых не может накопиться энергия для событий более крупного масштаба.

2. Мощность (сейсмическая энергия) ГТУ не зависит от глубины горных работ, кроме солевых и угольных месторождений, и производительности рудников, а определяется горно-геологическими и горнотехническими условиями разработки, основным фактором при этом является площадь (объем) массивов горных пород, который одновременно вовлекается в процессы деформирования.

3. Для солевых и угольных месторождений, напряженное состояние горных выработок которых определяется силами веса толщ налегающих пород, наблюдается прямо пропорциональная зависимость энергии ГТУ от глубины разработки [19].

4. Нет взаимосвязи техногенной сейсмичности, вызванной проведением горных работ с естественной сейсмичностью территорий. Такая сейсмичность наблюдается на асейсмичных прежде территориях в тектонически спокойных регионах земного шара.

5. На сейсмически активных территориях интенсивное проведение открытых и подземных горных работ с применением технологии массового взрывания пород может вызвать сейсмические события природно-техногенной природы, более мощные, чем техногенные сейсмические события, обусловленные проведением самих горных работ.

Сейсмические характеристики ТЗ и ГТУ (магнитуда, энергетический класс, балльность) характеризуют эти явления только с сейсмологических позиций. Те же явления в горнотехнической литературе принято характеризовать также по их последствиям в горных выработках рудников и шахт, то есть по разрушениям горных выработок и принесенному экономическому ущербу. На этих принципах разработано несколько классификаций горных ударов [19], в которых, помимо энергетического уровня событий, учитывается также объем (площадь) разрушений в горных выработках. Однако если в более ранних классификациях горных ударов (Института горного дела Сибирского отделения Российской академии наук, Всероссийского научно-исследовательского маркшейдерского института (ВНИМИ)) рассматривались все виды динамических проявлений горного давления в подземных выработках, то в последнее время были предприняты попытки создания специальных классификаций ГТУ.

Группой уральских ученых предложено разделять ГТУ на три категории в зависимости от их энергетического уровня, ранга (протяженности) тектонических нарушений, по которым произошли подвижки во время события, и масштабов разрушений в горных выработках (табл. 1.5) [20]. Классификации в табл. 1.5 свойственны определенные недостатки. Во-первых, только первые две категории событий соответствуют признакам ГТУ в соответствии с другими классификациями, в частности с классификацией В. В. Адушкина. Во-вторых, рассматриваются только те события, которые произошли по тектоническим нарушениям. Однако существуют ГТУ с разрывом сплошности целого массива и образованием новой трещины. К их числу относится ГТУ на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г., который более подробно будет рассмотрен далее. Кроме того, в классификации в табл. 1.5 отсутствует само понятие «техногенное землетрясение».

Таким образом, основными характеристиками наиболее мощных геодинамических явлений — ГТУ и ТЗ на рудниках и в шахтах — при горных работах являются: 1) большая выделенная сейсмическая энергия события (10^6 – 10^{12}) Дж; 2) нарушение геодинамического равновесия геолого-структурной иерархии массивов; 3) причина события — воздействие горных работ на массив.

При этом влияние горных работ проявляется либо в относительных подвижках отдельных геолого-структурных блоков, вызванных выемкой горных масс, либо в прорастании новых трещин в массиве, вызванных наложением зон концентрации напряжений от отдельных выработок друг на друга.

Таблица 1.5

Классификация ГТУ по рангу тектонических нарушений (ТН)

Категория ГТУ	Энергетический класс события К	Размер зоны разрушения в выработках, м	Характеристика зоны разрушения
1	10–12	100–1000	Разрушения охватывают большую часть шахтного поля; прекращается добыча руды в шахте; требуется восстановление выработок и коммуникаций. Ранг ТН = 3–4 (протяженность километры — десятки километров)
2	8–10	10–100	Разрушения выработок, крепей, коммуникаций происходят в больших объемах, на длительное время останавливается процесс очистной выемки в одном или нескольких блоках (панелях). Ранг ТН = 4–5 (протяженность сотни метров — километры)
3	5–8	1–10	Обрушения в выработках, разрушения крепей, пучение почвы, нарушение шахтных коммуникаций в одном или нескольких блоках (панелях). Ранг ТН = 5–6 (протяженность десятки — сотни метров)

В работе [14] дано следующее определение приведенных выше понятий: «Горно-тектонический удар — мгновенное разрушение массива большой мощности по тектоническому нарушению, или по вновь образовавшейся трещине, под влиянием горных работ, вызывающее разрушение целиков и выработок, как правило, на больших площадях. Горно-тектонический удар сопровождается сильным сотрясением массива, резким звуком, образованием пыли и воздушной волной в горных выработках»; «Техногенное землетрясение — это динамическая подвижка пород большой мощности по тектоническому нарушению, происходящая в глубине массива, спровоцированная проведением горных выработок, вызывающая сильное сотрясение массива и поверхности, способная вызвать в горных выработках в ограниченных масштабах разрушение пород и крепи».

При ТЗ очаг события располагается за пределами горных выработок в массиве или только частично в их пределах. При ГТУ очаг события располагается непосредственно в пределах горных выработок. В этом состоит коренное отличие рассматриваемых явлений. Поскольку ГТУ происходят непосредственно в горных выработках, их последствия обычно более тяжелы, чем последствия ТЗ на рудниках. ГТУ имеют обычно большую мощность (выделенную сейсмическую энергию), чем ТЗ. В то же время ТЗ происходят чаще: ГТУ по опыту отработки Ловозерского месторождения составляют не более 5 % от числа сильных сейсмических событий [19]. Никакого различия в регистрации сейсмических событий в горных выработках для ТЗ или ГТУ сейсмологическими методами нет, они регистрируются как сейсмические сигналы той или иной магнитуды (энергии). Разница между ними заключается только в их последствиях для горных выработок: при ГТУ эти последствия (обрушения пород в выработки, разрушения целиков и горных конструкций и т. п.) обычно велики, при ТЗ — незначительны или вообще отсутствуют. Таким образом, различие между ГТУ и ТЗ терминологическое.

Ни в одном из российских горнотехнических словарей [21–23] понятия «горно-тектонический удар» и «техногенное землетрясение» при горных работах не разъясняются, так как они находятся в стадии становления. В одной из первых работ, в которых они упоминаются [24], указывается, что одним из главных направлений при их изучении является накопление экспериментального материала на действующих предприятиях по изучению сейсмичности, изменению напряженного состояния, деформаций и других показателей. Именно в этом направлении выполнена настоящая работа, в которой описаны предвестники и последствия ГТУ на руднике «Умбозеро». Главное различие между ГТУ и ТЗ, по нашему мнению, как было отмечено ранее, заключается в их последствиях для подземных горных выработок. При ГТУ эти последствия выражаются в разрушениях горных выработок и целиков, при ТЗ — в сотрясениях массива и поверхности. Именно по такому принципу, в частности, разделены сильные сейсмические явления (ТЗ и ГТУ) в работе [25] при описании сейсмических явлений на Кировском руднике апатитового месторождения Хибин. К текущему моменту на рудниках России произошло только несколько десятков ГТУ и ТЗ, описание которых (до 2010 г.) приведено в работе [19]. На основании приведенных выше определений нами выполнено разграничение этих событий по их последствиям в горных выработках (табл. 1.6).

Сейсмическое событие 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» в работах [1, 2] трактовалось как ТЗ. Понятие «техногенное землетрясение» в них было использовано, в основном, для того, чтобы подчеркнуть масштабность события. ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро», как это показано в работах [1, 2, 26] и видно из табл. 1.6, является на текущий момент сильнейшим событием такого рода за всю историю шахт и рудников России.

Таблица 1.6

Сильнейшие сейсмические события на российских рудниках

Месторождение, рудник	Дата	Энергия		Последствия на руднике и поверхности	Классификация	Глубина гипоцентра $H_{гф}$, м
		энергетический класс $k = \lg E$	магнитуда M_L			
Северо-Уральский бокситовый, шахта 15–15бис	05.10.1984	8,6	3,2	Выброс 40 м ³ породы, нарушено 740 м выработок	ТЗ	570
Хибинское апатитовое, Кировский	16.04.1989	10,5	4,3	Трещина 200 м по вертикали протяженностью 1,1 км, разрушение крепи выработок	ТЗ	300
Южно-Уральский бокситовый, шахта «Кургазакская»	28.05.1990	10,5*	4,3	$S_{обр} = 450$ тыс. м ²	ГТУ	250
Южно-Уральский бокситовый, Блиново-Каменский	29.07.1994	10,1*	4,1	$S_{обр} = 300$ тыс. м ²	ГТУ	150
Верхнекамское месторождение калийных солей, СКРУ–2	05.01.1995	10,1*	4,1	$S_{обр} = 300$ тыс. м ² ; мульда на поверхности площадью 850 × 650 м	ГТУ	300
Ловозерское редкометалльное, «Умбозеро»	17.08.1999	11,8	5,1	Разрушения выработок $S = 650$ тыс. м ² ; трещина до поверхности шириной 0,5 км	ГТУ	300
Таштагольское железорудное, Таштагольский	24.10.1999	9,4	3,6	Разрушение выработок $S = 1,5$ тыс. м ²	ТЗ	700
Ловозерское редкометалльное, «Карнасурт»	17.12.2002	9,2	3,6	Разрушение целлюлоз и выработок $S \approx 20$ тыс. м ²	ГТУ	150
Северо-Уральский бокситовый, шахта 14–14бис	25.03.2004	8,6*	3,2	Потгло три шахтера, обрушение 145 × 61 м	ГТУ	–
Ловозерское редкометалльное, «Умбозеро»	04.10.2004	9,8*	3,9	Расширение трещины на 150 м	ТЗ	300
Северо-Уральский бокситовый, шахта 15–15бис	13.02.2010	9,1	3,5	–	ТЗ	–
Хибинское апатитовое, Кировский	21.10.2010	9,7	3,8	Незначительные повреждения крепи	ТЗ	360

* Получено расчетным путем.

2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА 17 АВГУСТА 1999 ГОДА НА РУДНИКЕ «УМБОЗЕРО»

Семнадцатого августа 1999 г. в 8 час 45 мин по московскому времени практически всеми сейсмостанциями Северного полушария Земли зарегистрировано сейсмическое событие, эпицентр которого располагался в 140 км на юго-юго-восток от Мурманска; магнитуда события, характеризующая его энергию, составила $M_L \cong 4,3$ (по данным ГС РАН, город Обнинск) [27], по данным Кольского регионального сейсмологического центра Геофизической службы Российской академии наук (КРСЦ ГС РАН), магнитуда $MPVA = 5,1$ [28]. Эпицентр сейсмического события пришелся на рудник «Умбозеро» ОАО «Севредмет», добывающий руду для производства редких металлов (рис. 2.1). На самом руднике «Умбозеро» сейсмическое событие в конечном итоге квалифицировано как ГТУ, вызвавший многочисленные разрушения в горных выработках и приведший к остановке его работы.

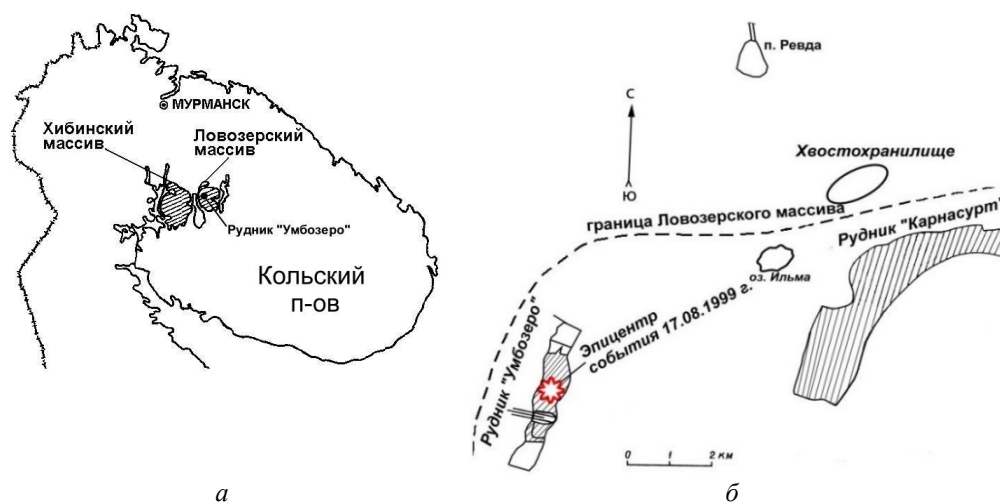


Рис. 2.1. Расположение рудника «Умбозеро» и эпицентра сейсмического события 17.08.1999 г.:

а — на Кольском полуострове; *б* — в Ловозерском горном массиве

Во время ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» было разрушено более 50 % подземных выработок, нарушены транспортные и энергетические коммуникации. В то же время поверхностные здания и сооружения на промплощадке рудника (административно-бытовой комбинат, обогатительная фабрика, ряд вспомогательных зданий и сооружений) практически не пострадали, хотя при 7–8-балльных колебаниях (по оценкам специалистов КРСЦ ГС РАН) разрушения поверхностных сооружений могли произойти. Указанный факт является косвенным свидетельством того, что сейсмическое событие на руднике не было землетрясением.

На руднике «Умбозеро» ГТУ 17.08.1999 г. зарегистрирован как авария, причиной которой «...явилось землетрясение, происшедшее, возможно, в виде подвижки по тектоническим нарушениям (очаговая зона), выходящим в район северного фланга рудника «Умбозеро», усиленное концентрацией локальных

напряжений и наличием пустот в виде горных выработок в зоне ведения горных работ и вызвавшее массовое разрушение горных выработок и целиков...»¹. Позднее это сейсмическое событие было квалифицировано как ТЗ, обусловленное высоким гравитационно-тектоническим естественным напряженным состоянием массива, его структурно-блоковым строением и воздействием горных работ [2]. Еще позднее оно было переклассифицировано на ГТУ, причиной которого стала совместная отработка двух сближенных рудных залежей в условиях действия в массиве высокого гравитационно-тектонического поля естественных напряжений [29]. В результате наложения зон концентрации напряжений, образовавшихся вокруг выработок на двух сближенных залежах, был достигнут такой уровень напряжений в междупластье и покрывающей толще, который превзошел предел прочности пород, вследствие чего произошел их резкий разрыв и проращение трещины от горных выработок до поверхности в массиве с эффектом ГТУ [29].

На руднике «Умбозеро» в момент ГТУ происходил спуск второй смены рабочих в шахту в вагонетках по рельсам наклонного транспортного ствола, вскрывающего рудные залежи. Вагонетки состава с людьми в стволе достигли самого верхнего откаточного горизонта + 290 м (глубина от поверхности 200 м), когда в окружающем массиве произошел мощный толчок, от которого стали разрушаться горные выработки. Вот как описывает свои ощущения один из инженеров, спустившийся в выработки штрека гор. + 290 м раньше других: «Я почувствовал сильный удар по ногам и сильный глухой и продолжительный звук. Воздушной волной меня отбросило к стенке выработки. Поднялось много пыли, посыпались куски горной массы с кровли; трубы, проходящие по штреку гор. + 290 м, лопнули и раскачивались... Толчки не прекращались, массив гудел. Лопнул бетонный целик в рембазе (камера для ремонта горного оборудования), был слышен звук падающих кусков горной массы, треск в бортах и кровле выработок...»

Ощущения людей, находившихся на поверхности в здании административно-бытового комбината рудника и других: «Я... находился в своем кабинете, в это время здание котельной задрожало от периодических толчков. Я выбежал из кабинета и велел всему персоналу покинуть здание. Дальнейшее обследование показало, что большое количество стекол треснуло»; «Я... находился в административно-бытовом комбинате, возле ламповой, почувствовал толчок снизу, в некоторых местах упала штукатурка, выпало несколько ламп дневного света».

Как видно из описаний, персонал рудника, находящийся под землей и на поверхности вблизи гипоцентра ГТУ, не только его почувствовал, но и был вынужден предпринимать меры для спасения. Весь персонал, находившийся на руднике, по команде руководства был выведен по наклонному стволу на поверхность. Благодаря тому что горнорабочие не успели разойтись по горным выработкам на рабочие места, так как было только начало рабочей смены и наклонный ствол, по которому выводили людей, не был разрушен, никто не пострадал, жертв не было. Однако, вследствие того что на большой площади были разрушены горные выработки и целики, нарушена крепь выработок и транспортные пути, перебиты трубы и энергетические коммуникации, рудник был полностью остановлен и выведен из эксплуатации.

¹ Протокол расширенного заседания комиссии по горным ударам ОАО «Севрдетмет» от 26 августа 1999 г. (поселок Ревда Мурманской области).

Сотрясения почвы во время сейсмического события специалисты КРСЦ ГС РАН оценили следующим образом: в эпицентре (рудник «Умбозеро») — 7–8 баллов (по 12-балльной шкале MSK–64), в поселке Ревда (12 км) — 5–6 баллов; в городах Кировске и Апатитах (50–60 км) — 2–3 балла (рис. 2.2).

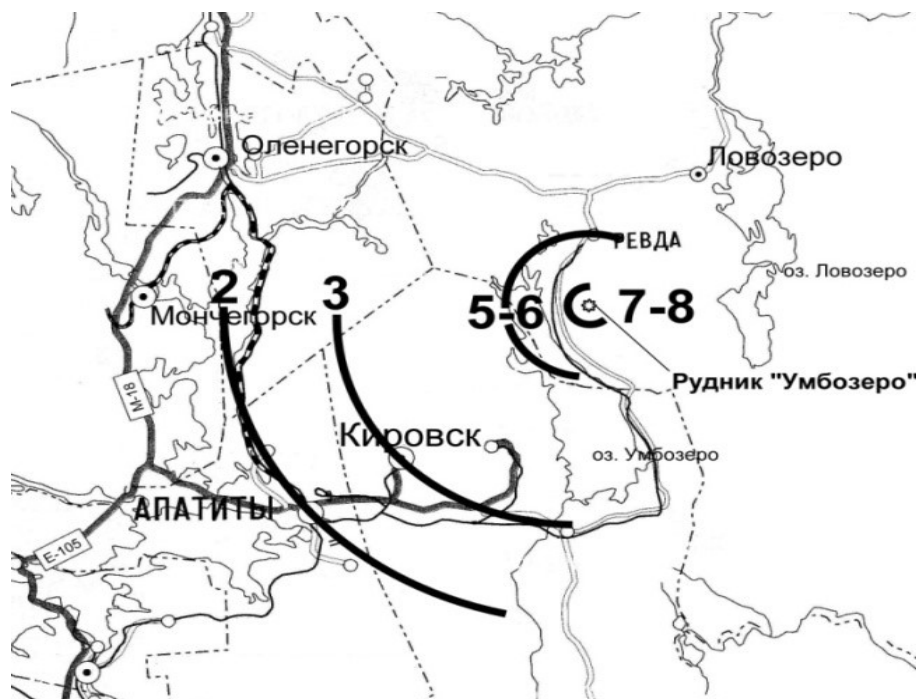


Рис. 2.2. Интенсивность сотрясения почвы в баллах (MSK–64) при ГТУ 17.08.1999 г.: 2, 3, 5 — изосейты сейсмического события

Основные сейсмологические характеристики сейсмического события по первоначальным данным КРСЦ ГС РАН приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сейсмологические характеристики ГТУ на руднике «Умбозеро»

Дата	Время (московское)	Координаты			Магнитуда M_L	Энергетический класс k
		широта, град	долгота, град	глубина очага, км		
17.08.1999 г.	8 ^h 44' 35"	67,88	34,57	0,300	4,3	11,8

Сейсмическое событие, гипоцентр которого находился на территории шахтного поля рудника «Умбозеро», зарегистрировано многими сейсмостанциями мира («Аляска» (США), ARCES (Норвегия), FINES (Финляндия), «Шпицберген», «Амдерма», «Апатиты» (Россия)), схема расположения ближайших из которых приведена на рис. 2.3, и многими другими. Сейсмограммы события, записанные некоторыми из этих станций, приведены на рис. 2.4, а, б [1].

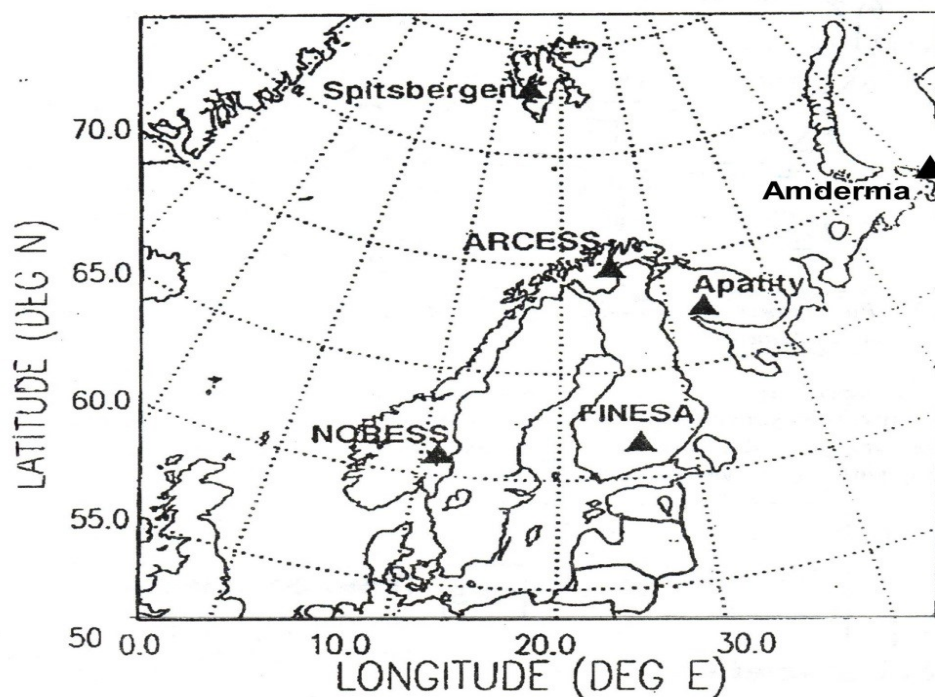


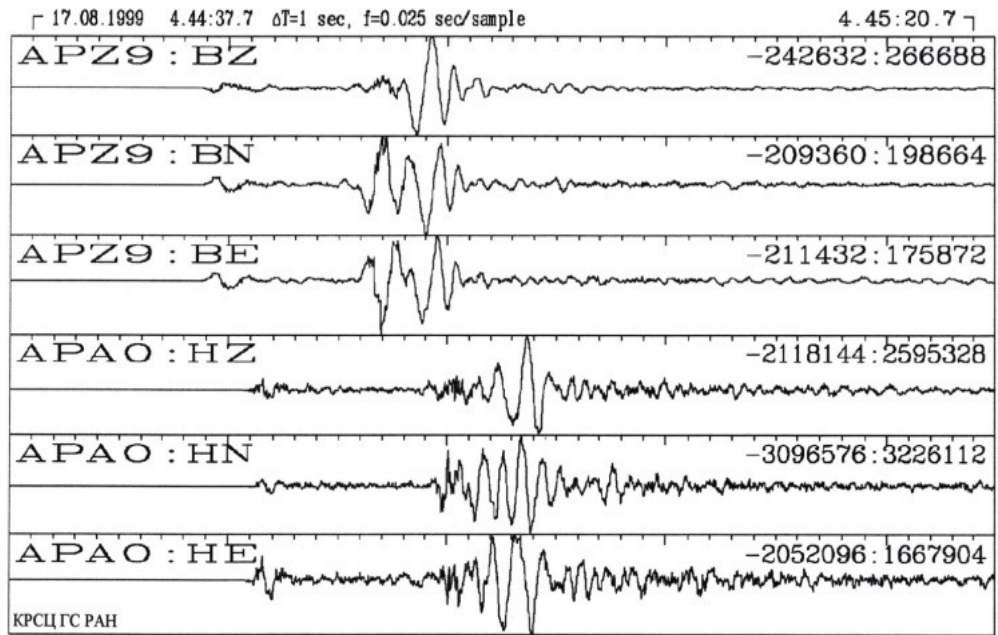
Рис. 2.3. Расположение ближайших сейсмостанций, зарегистрировавших ГТУ 17.08.1999 г.

Магнитуда главного толчка при ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро», первоначально определенная сейсмостанцией «Апатиты», составляет $M_L = 3,9-4,4$, среднее значение которого равно $M_L \cong 4,2$. В дальнейшем значение магнитуды этого толчка определено по данным записей нескольких сейсмостанций [27]. Значение магнитуды, определенное ГС РАН (город Обнинск), оказалось равным $MLH = 4,3 \pm 0,2$. Другие значения магнитуды приведены в табл. 2.2 [27].

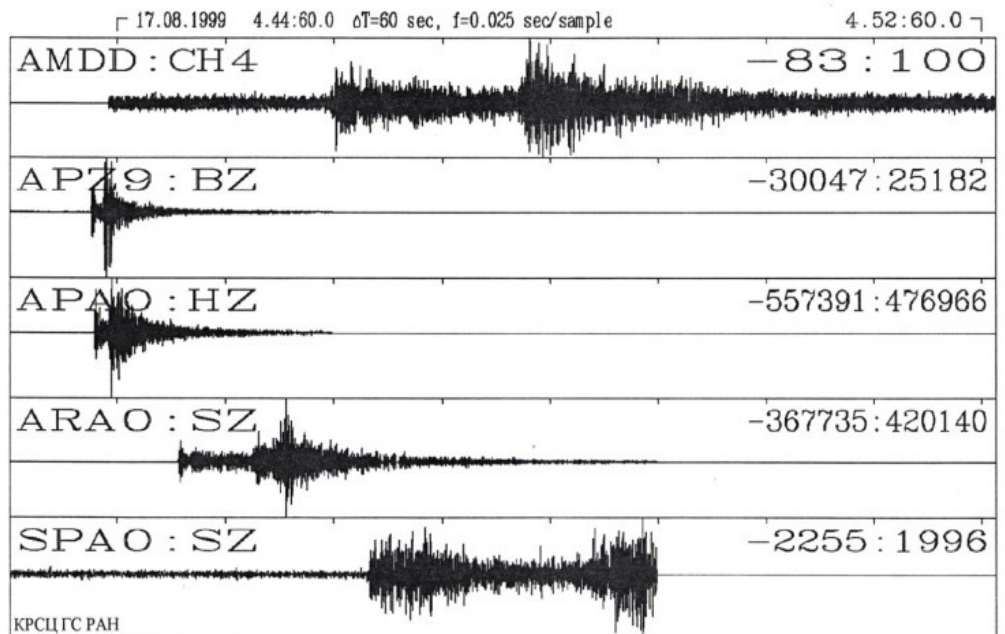
Как видно из данных табл. 2.2, значения магнитуд события 17.08.1999 г., определенные сейсмостанциями, колеблются в основном в диапазоне $M = 4,5-5,1$. Учитывая, что величина магнитуды m_b близка к значению магнитуды M_L [9], а также то обстоятельство, что наиболее верное значение магнитуды дают сейсмостанции, ближе всего расположенные к эпицентру (как это следует из формулы (1.1)), можно обоснованно предполагать, что магнитуда ГТУ 17.08.1999 г. составляет $M_L \cong 5,0$.

Во время ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» в течение суток после главного толчка произошло еще тринадцать толчков с магнитудой $M_L = 1,2-2,7$ (афтершоки) и множество других, более мелких динамических событий. Последовательность толчков, по данным КРСЦ ГС РАН на 1999 г., приведена на рис. 2.5 [1].

Описание последствий сейсмических событий 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» приведено далее.



a



b

Рис. 2.4. Запись события 17.08.1999 г. станциями «Апатиты» (*a*, вверху), «Апатитский ARRAY» (*a*, внизу) и удаленными станциями (*б*) сверху вниз: «Амдерма», «Апатиты», «Апатитский ARRAY», «АРКЕСС» (Норвегия), «Шпицберген». Низкие частоты отфильтрованы с 2 Гц

Таблица 2.2

Магнитудные оценки сейсмического события 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» по данным разных источников [27]

Источник	Организация	Магнитуда
ВЛ	China Earthquake Networks Center	$M_S = 5,0; m_b = 4,6$
EPSI	Reference events computed by the ISC for EPSI project	$M_S = 4,3; m_b = 4,5$
NEIC	National Earthquake Information Center, USA	$m_b = 4,6$
HEL	Institute of seismology, University of Helsinki	$M_d = 4,1; M_L = 4,3$
EIDC	Experimental (GSETT3) International Data Center, USA	$M_L = 4,6; M_S = 4,4; m_b = 4,2$
LDG	Laboratoire de Détection et de Géophysique / CEA, France	$m_b = 4,7$
NAO	NORSAR, Norway	$M_L = 3,9$
BER	University of Bergen, Norway	$M_L = 4,7$
ISC	International Seismological Centre, UK	$M_S = 4,3; m_b = 4,5$
APA	Apatity	$MPVA = 5,1$

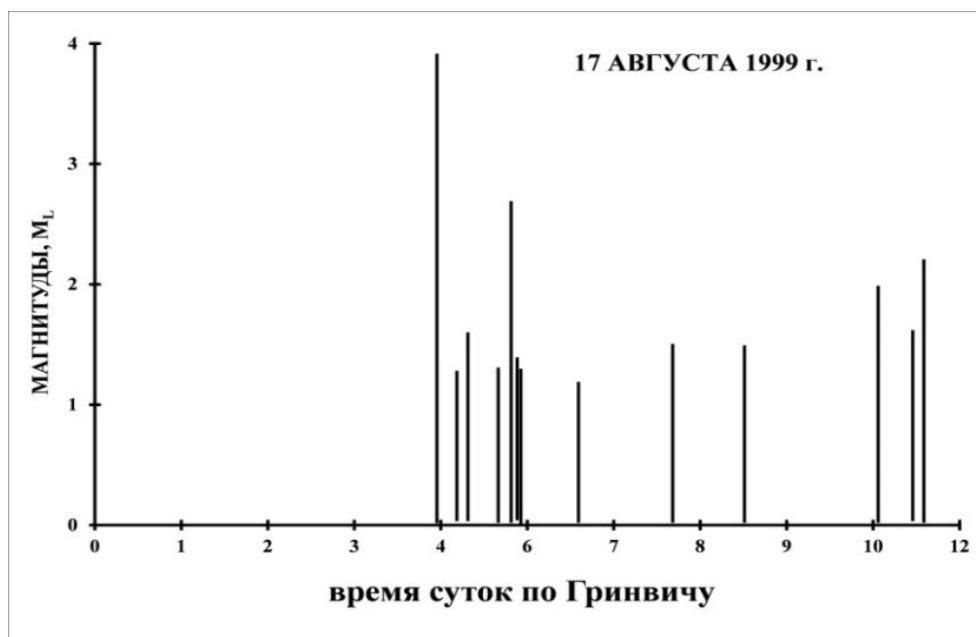


Рис. 2.5. Сейсмические события в массиве рудника «Умбозеро» 17.08.1999 г. (по данным КРСЦ ГС РАН)

3. ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РУДНИКА «УМБОЗЕРО» И СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ К 17 АВГУСТА 1999 ГОДА

Рудник «Умбозеро» не отличался бы ничем от других подобных рудников в России, если бы не сильнейший ГТУ в его недрах 17.08.1999 г. Недооценка влияния существовавших в массиве рудника больших горизонтальных тектонических напряжений на горные выработки вместе с господствовавшими в то время взглядами о превалирующем влиянии в массивах гравитационных сил веса пород, последовательность развития горных работ на руднике в зоне сближенной отработки двух пологопадающих пластообразных залежей III–14 и III–10 привели к тому, что в процессе его проектирования и эксплуатации произошло сильнейшее сейсмическое событие, разрушившее рудник и ставшее причиной его закрытия. Между тем, уже на стадии строительства в 1978 г. рудник «Умбозеро» совместно с рудником «Карнасурт» на Ловозерском редкометалльном месторождении первыми из рудников Кольского полуострова были отнесены к угрожаемым и опасным по горным ударам². Еще в период строительства и на начальных этапах эксплуатации рудника Горным институтом КНЦ РАН неоднократно указывалось на необходимость учета в процессе его эксплуатации высоких тектонических напряжений в массиве³. Однако этим предостережениям в проектном институте «Гиредмет» (город Москва) и на Ловозерском ГОКе ОАО «Севредмет» уделялось мало внимания.

Рудник «Умбозеро» расположен на западных склонах Ловозерского щелочного массива, в 10 км на юго-запад от поселка Ревда Мурманской области (рис. 2.1). Рудник отрабатывал две пластообразные, согласно залегающие пологопадающие рудные залежи: III–14 мощностью 2,5 м и III–10 мощностью 5,5 м, расстояние между которыми по вертикали составляет 50–60 м. Поперечный вертикальный геологический разрез рудника приведен на рис. 3.1. Угол падения каждой из залежей равен в среднем 17°. Глубина разработки нижней залежи от поверхности составляет 200–420 м. Нижняя залежь III–14 вскрыта тремя центральными наклонными транспортно-вентиляционными стволами и одним фланговым вентиляционным стволом, пройденными по рудному телу. Первоначально в период 1984–1990 гг. на руднике отрабатывалась только нижележащая рудная залежь III–14. Основная часть очистных и подготовительных выработок рудника сосредоточена на нижней залежи, план горных работ по которой приведен на рис. 3.2.

Для отработки залежи запроектирована камерно-целиковая система разработки с выемкой запасов руды в две стадии и закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. В процессе первой стадии отработки применялись камеры шириной 15–20 м, длиной 60–150 м, располагаемые либо по простиранию, либо по падению рудной залежи, и высотой 2,5 м. Для поддержания покрывающих пород использовались ленточные целики, шириной 3–15 м, оставляемые между камерами и вокруг капитальных выработок.

² Протокол техсовета Северо-Западного Управления Госгортехнадзора СССР от 6 апреля 1978 г., город Ленинград.

³ Заключение бригады специалистов Минцветмета СССР по рассмотрению состояния горных работ на рудниках Ловозерского ГОКа, 14–19 ноября 1988 г., поселок Ревда.

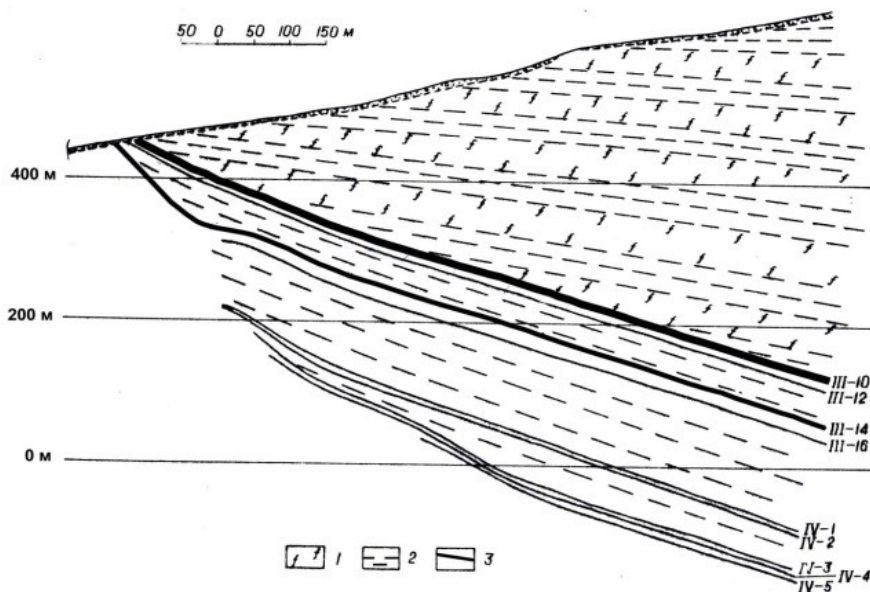


Рис. 3.1. Геологический разрез в центральной части шахтного поля рудника «Умбозеро»: 1 — фойяиты и ювиты; 2 — луявриты; 3 — рудные тела

Около 50 % запасов руды оставлено в целиках для выемки во вторую и третью стадии отработки после закладки выработанного пространства. Однако, вследствие корректировки проекта отработки месторождения, внесения изменений в систему разработки, заложено менее 10 % выработанного пространства нижней залежи. Общая площадь выемки с целиками по нижней залежи составила $\sim 2,0 \times 0,5$ км при высоте выработанного пространства и целиков 2,5 м.

Отработка верхней залежи III–10 мощностью 5,5 м началась в 1990 г., то есть на пятнадцать лет позднее, чем отработка нижней, поскольку руда верхней залежи по содержанию полезных компонентов первоначально считалась некондиционной. Верхняя залежь вскрыта квершлагами из выработок гор. + 290 м нижней залежи и отрабатывалась такой же системой разработки, как и на нижней залежи, с аналогичными геометрическими параметрами. Применялись камеры шириной 15–20 м и длиной 60–150 м при высоте 5,5 м, разделяемые ленточными целиками, минимальная ширина которых составляла 4 м. Площадь выработанного пространства с целиками по верхней залежи составила к 1999 г. ~ 1 км по простиранию и 0,2 км по падению при высоте выработанного пространства и целиков 5,5 м. Закладка выработанного пространства при отработке залежи III–10 не применялась. Глубина горных выработок верхней залежи до поверхности — 100–150 м. План горных работ по верхней залежи приведен на рис. 3.3.

Соотношение размеров выработанного пространства, характеризующееся его шириной L_1 и L_2 для каждой из залежей, к мощности толщи покрывающих пород H как для нижней, так и для верхней залежей составляет $L_1/H \geq 1$; $L_2/H \geq 1$, то есть для обеих залежей выдерживаются условия полной подработки подработанных толщ пород, при которой на целики действует весь вес их толщи, вплоть до поверхности. В то же время расстояние между залежами $h = 60$ м, что меньше пролета выработанного пространства как для верхней, так и для нижней залежей, то есть $L_1/h > 1$; $L_2/h > 1$. Эти соотношения показывают, что отработка обеих залежей на смежных участках производилась в условиях их взаимного влияния друг на друга.

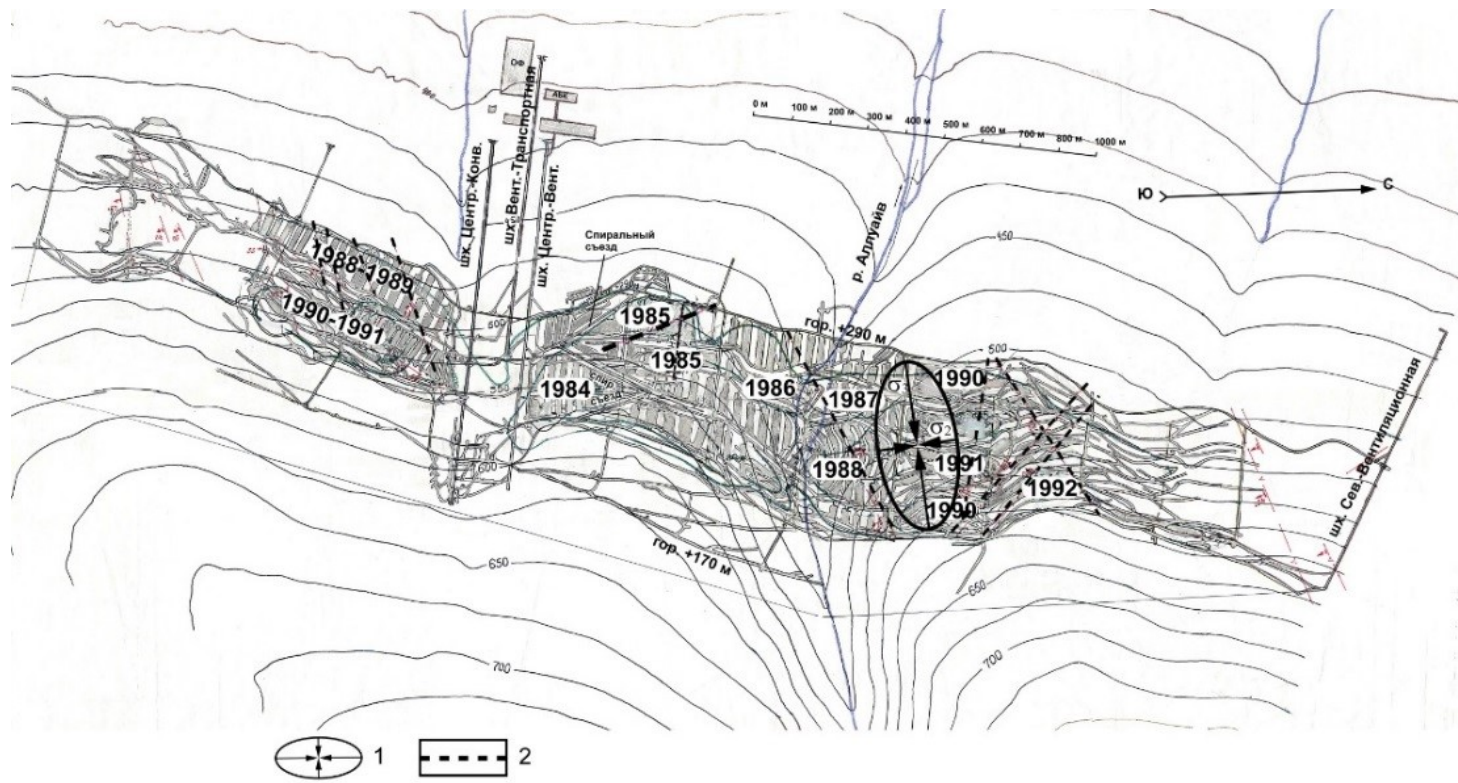


Рис. 3.2. План горных работ по нижней рудной залежи III-14 с горизонталями поверхности:
 1 — эллипс горизонтальных тектонических напряжений в массиве; 2 — тектонические и техногенные нарушения

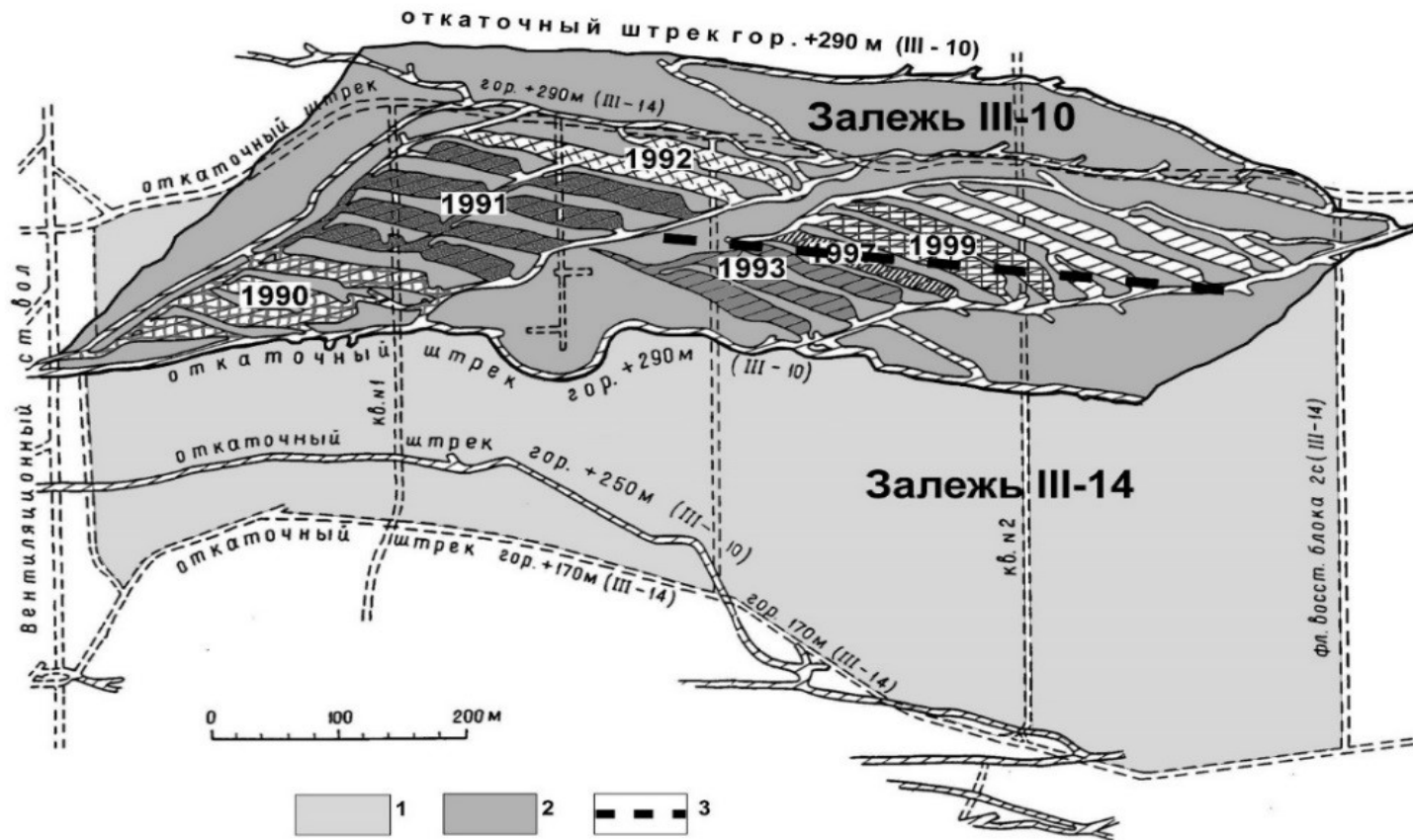


Рис. 3.3. Совмещенный план горных работ по верхней залежи III-10 и нижней залежи III-14:
 1 — III-14; 2 — III-10; 3 — трещина

Свойства пород и руд рудника «Умбозеро» приведены в табл. 3.1, в последней графе которой приведен коэффициент хрупкости, вычисляемый как отношение прочности породы на сжатие к прочности на растяжение [30]:

$$k_{\text{хр}} = \frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{р}}}, \quad (3.1)$$

где $\sigma_{\text{с}}$ — прочность пород при сжатии, МПа; $\sigma_{\text{р}}$ — прочность пород при растяжении, МПа.

Коэффициент хрупкости характеризует склонность пород к разрушению в форме горного удара [30]. Как видно из табл. 3.1, рудосодержащие и вмещающие породы рудника «Умбозеро» являются высокопрочными и хрупкими; по деформационно-прочностным свойствам все они относятся к удароопасным. По мнению некоторых исследователей, наиболее высокие тектонические напряжения в тектонически напряженных массивах приурочены к наиболее прочным породным разновидностям [31]. Поскольку по показателям деформационно-прочностных свойств пород можно судить об энергии потенциальных геодинамических процессов в массиве, приведем показатели таких свойств для наиболее удароопасных рудных месторождений России (табл. 3.2). Из сопоставления данных табл. 3.2 с данными табл. 3.1 видно, что прочность руд и пород Ловозерского месторождения как минимум в 1,5–2,0 раза выше, чем на других наиболее удароопасных месторождениях России, что говорит о возможности накопления больших запасов потенциальной энергии в породах месторождения в ходе геомеханических процессов при образовании комплексов подготовительных и очистных выработок в условиях рудника «Умбозеро», породы которого обладают наиболее высокими показателями прочностных свойств. Таким образом, наличие весьма крепких и хрупких скальных рудосодержащих и вмещающих пород является одной из отличительных особенностей массива рудника «Умбозеро».

Другой отличительной особенностью горно-геологических условий рудника является гравитационно-тектоническое напряженное состояние его массива, численные характеристики которого установлены в результате натурных измерений методом разгрузки [32] и приведены в табл. 3.3.

Как видно из данных табл. 3.3, горизонтальная тектоническая составляющая напряжений в массиве рудника имеет величину $T = (50 \div 60)$ МПа, достигая в отдельных случаях $(70 \div 80)$ МПа [32]. Величина гравитационной составляющей главных напряжений в массиве, обозначенная σ_1 в табл. 3.3, соответствует силам веса толщи пород до поверхности и является минимальной по численной величине. Максимальная тектоническая составляющая напряжений в 7–10 раз превышает гравитационную составляющую, обусловленную весом толщи налегающих пород. Направление максимальных тектонических напряжений в горизонтальной плоскости субширотное, оно практически ортогонально направлению простирания рудных залежей (см. рис. 3.2). Направление максимальных тектонических напряжений в массиве в горизонтальной плоскости показано на плане горных выработок рудника по залежи III–14 в виде эллипса напряжений в массиве на рис. 3.2.

Таблица 3.1

Физико-механические свойства руд и пород рудника «Умбозеро»

Порода	Плотность, т / м ³	Прочность, МПа		Модуль упругости, 10 ⁴ МПа	Коэффициент	
		при сжатии	при растяжении		Пуассона	хрупкости
Фойяит	2,64	308 ± 81	10 ± 3,3	5,3	0,25	30,8
Луаврит лейкократовый	2,65	308 ± 94	12 ± 3,0	5,0	0,29	25,6
Луаврит мезократовый	2,72	248 ± 112	13 ± 4,1	3,4	0,19	19,0
Ювит	2,65	231	12	—	—	19,2
Ювит-уртит	2,54	208	16	—	—	13,0
Фойяит-ювит	2,60	313 ± 56	6,6 ± 1,4	—	—	16,0
Рудосодержащие породы (пласт П-14)	2,70	193 ± 10	7,0 ± 3,5	4,1	0,26	27,6

Таблица 3.2
Деформационно-прочностные свойства руд и пород некоторых наиболее удароопасных месторождений России [17]

Месторождение	Породы	Плотность, г / м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Коэффициент хрупкости
Северо-Уральское бокситовое	Бокситы (руда)	2,7-3,2	32-220	2,8-12,8
	Известняки (вмещающие породы)	2,6-2,7	45-155	3,7-10
Таштагольское железорудное	Магнетит (руда)	3,3-4,9	120-140	14,6-28,1
	Силенины, скарны, порфириды (вмещающие породы)	2,6-3,2	50-180	
Хибинское апатитовое	Апатитофелиновые руды	2,8-3,1	60-150	~ 20-30
	Ийолит-уртиты, рисчорриты (вмещающие породы)	2,8-2,9	100-250	~ 30-40

Таблица 3.3

Характеристика естественного напряженного состояния массива пород на руднике «Умбозеро»

Участок, рудная залежь	Глубина измерений от поверхности, м	Местоположение участка измерений	Величина и направление главных напряжений			Соотношение компонент напряжений $\sigma_3 : \sigma_2 : \sigma_1$	
			σ_3	σ_1			
			МПа	азимут град, $\pm 180^\circ$	МПа	наклон, град	
Залежь III-14 (блок Iгo)	300	Гор. + 250 м	50	265	7	90	7 : 3 : 1
Залежь III-14 (блок Iс)	200	Гор. + 250 м	60	230	6	90	10 : 5 : 1

Высокие горизонтальные тектонические напряжения в массиве вызывали динамические проявления горного давления в выработках в течение всего периода строительства и эксплуатации рудника «Умбозеро». Уже в процессе его строительства при проходке центрального вентиляционного и центрального конвейерного наклонных стволов и околоствольных дворов отмечались многочисленные динамические проявления горного давления с отскакиванием кусков пород из кровли выработок со звуком «стреляния». Сечение выработок за счет отслаивания кусков пород из кровли превосходило проектное на 20–30 % [33]. Стенки выработок при этом были устойчивы. Отмечалось, что наибольшее количество динамических проявлений горного давления происходило в горизонтальных выработках широтного направления, а их масштабы возрастали с глубиной. Если в откаточных штреках гор. + 290 м (200 м от поверхности), пройденных по простиранию рудной залежи, отмечались эпизодические отслоения кровли, то в таких же штреках на гор. + 170 м (глубина 400 м от поверхности) нарушения кровли выработок наблюдались повсеместно. Выработки за счет отслаиваний кровли приобретали шатрообразную форму (рис. 3.4). При этом штанговая крепь, устанавливаемая для ее крепления, «обыгрывалась», несмотря на увеличение плотности установки штанг с 1 шт / м² кровли до 2,5 шт / м² кровли [34].



Рис. 3.4. Искажение проектного сечения кровли выработки вследствие влияния горизонтальных тектонических сил (рудник «Умбозеро», штрек гор. + 170 м, глубина 400 м). Фигура на снимке — автор монографии

С начала очистной выемки руд на руднике «Умбозеро» интенсивность динамических проявлений горного давления в выработках еще более возросла. Помимо разрушения кровли штрековых выработок, отмеченных выше, стреляния, интенсивного заколообразования пород отмечались толчки в массиве; зарегистрированы три случая микроударов в целиках вокруг капитальных выработок — спиральных съездов, предназначенных для транспортировки оборудования и грузов с горизонта на горизонт (см. рис. 3.2).

Как видно из данных табл. 3.3, направление действия максимальных тектонических напряжений σ_3 в горизонтальной плоскости является субширотным и практически ортогональным направлению осей штреков, пройденных по простиранию рудного тела. Поэтому динамические проявления горного давления (стреляние, интенсивное заколообразование, «обрывание» штанговой крепи) наиболее интенсивно наблюдались в кровле штрековых выработок. На руднике «Умбозеро» был проведен производственный эксперимент по изменению направления осей горизонтальных выработок в соответствии с направлением максимальных напряжений в массиве [34]. Тангенциальные напряжения на контуре выработки кругового поперечного сечения при действии в массиве тектонических сил рассчитываются по формуле [35]:

$$\sigma_\theta = \sigma_1(1 + 2 \cos 2\theta) + \sigma_2(1 - 2 \cos 2\theta), \quad (3.2)$$

где θ — угол, отсчитываемый от направления алгебраически большего напряжения против часовой стрелки; σ_1, σ_2 — главные напряжения, действующие в массиве в точке расположения выработки.

Распределение напряжений вокруг выработки кругового поперечного сечения не сильно отличается от выработки сводчатого сечения, поэтому рассмотрим эффект влияния тектонических сил на устойчивость кровли выработок, рассчитанный по формуле (3.2). На рис. 3.5 приведены графики тектонических и гравитационных напряжений на контуре выработки, пройденной по направлению тектонических сил (рис. 3.5, а) и ортогонально им (рис. 3.5, б) на глубине 400 м от поверхности, при параметрах тектонических напряжений в массиве, обозначенных в табл. 3.3.

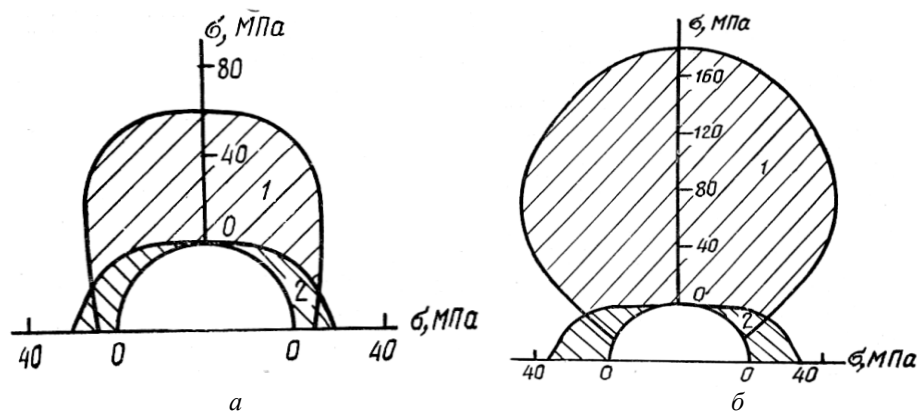


Рис. 3.5. Эпюры тектонических (1) и гравитационных напряжений (2) вокруг горизонтальных выработок:

a — ось выработки параллельных вектору тектонических сил *T*; *б* — ось выработки перпендикулярна вектору тектонических сил *T*

На глубине 400 м расчетные напряжения на контуре кровли штрека ($\alpha = 90^\circ$, пройден ортогонально направлению тектонических сил) равны 180 МПа, на контуре кровли квершлага ($\alpha = 0^\circ$, пройден по направлению тектонических сил) эта величина составляет 60 МПа. Применительно к условиям рудника величины напряжений в кровле штреков втрое выше напряжений в кровле перпендикулярных им квершлага. Из приведенных расчетных и экспериментальных данных следует, что наиболее сложные условия разрушения наблюдаются в кровле штреков, так как здесь

тектонические напряжения с учетом их концентрации превосходят предельно допустимые значения:

$$\sigma_d > K_c[\sigma_c], \quad (3.3)$$

где σ_d — напряжение, действующее на контуре выработки; σ_c — прочность пород на сжатие; K_c — эмпирический коэффициент, учитывающий неоднородность свойств пород и их напряженного состояния.

Установлено, что при $K_c > 0,8$ в массивах, испытывающих тектонические напряжения, вероятность проявления стреляния и активного расслаивания пород близка к 1. График напряжений σ_d на контуре кровли в зависимости от изменения угла α показан на рис. 3.6, а. С учетом условия проявления стреляния пород на графике выделено критическое значение угла $\alpha_{кр}$, равное 40° .

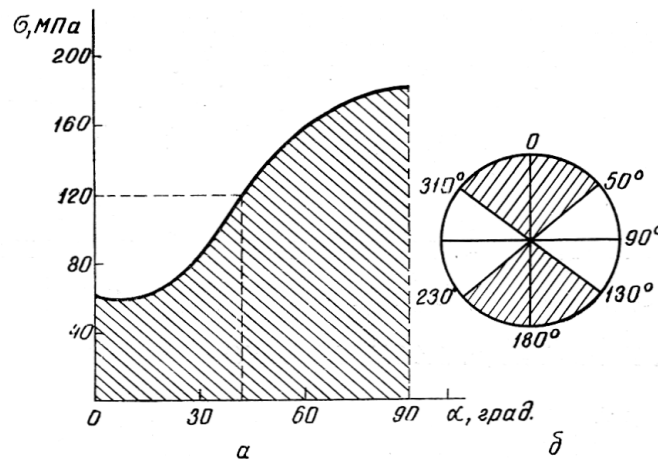


Рис. 3.6. Определение критического значения угла $\alpha_{кр}$ между направлением вектора тектонических сил и направлением выработки по фактору проявления стреляния пород в кровле (а); направления осей выработок, ограниченные критическими значениями угла $\alpha_{кр}$ для условий рудника (б)

На основе графика (см. рис. 3.6, а) можно установить, что при расположении горизонтальных выработок в пределах сектора, ограниченного азимутами $0 \pm 50^\circ$ или $180 \pm 50^\circ$, будут происходить нарушения устойчивости, а в пределах сектора, ограниченного азимутами $90 \pm 40^\circ$ или $270 \pm 40^\circ$, выработки будут иметь устойчивое состояние (см. рис. 3.6, б). С учетом данных о напряженном состоянии массива были сформулированы условия для перепроектирования комплекса выработок главного водосборника рудника. Первоначальный проект водосборника предусматривал расположение камер по простиранию рудного тела, то есть в меридиальном направлении (рис. 3.7, а). Переработанный проект предусматривает расположение большинства выработок и камер в широтном направлении (рис. 3.7, б). Так как вопрос о перепроектировании водосборников решался на стадии, когда наклонные стволы и околоствольные двory горизонтов были уже пройдены, то оказалось возможным изменить направления только ограниченного числа выработок, составляющих около 30 % суммарной их протяженности, хотя по условиям устойчивости необходимо расположить все выработки комплекса водосборника таким образом, чтобы они размещались осями по азимутам, не выходящим за пределы критических значений угла α (см. рис. 3.6, б), то есть в пределах секторов, ограниченных азимутами $90 \pm 40^\circ$ и $270 \pm 40^\circ$.

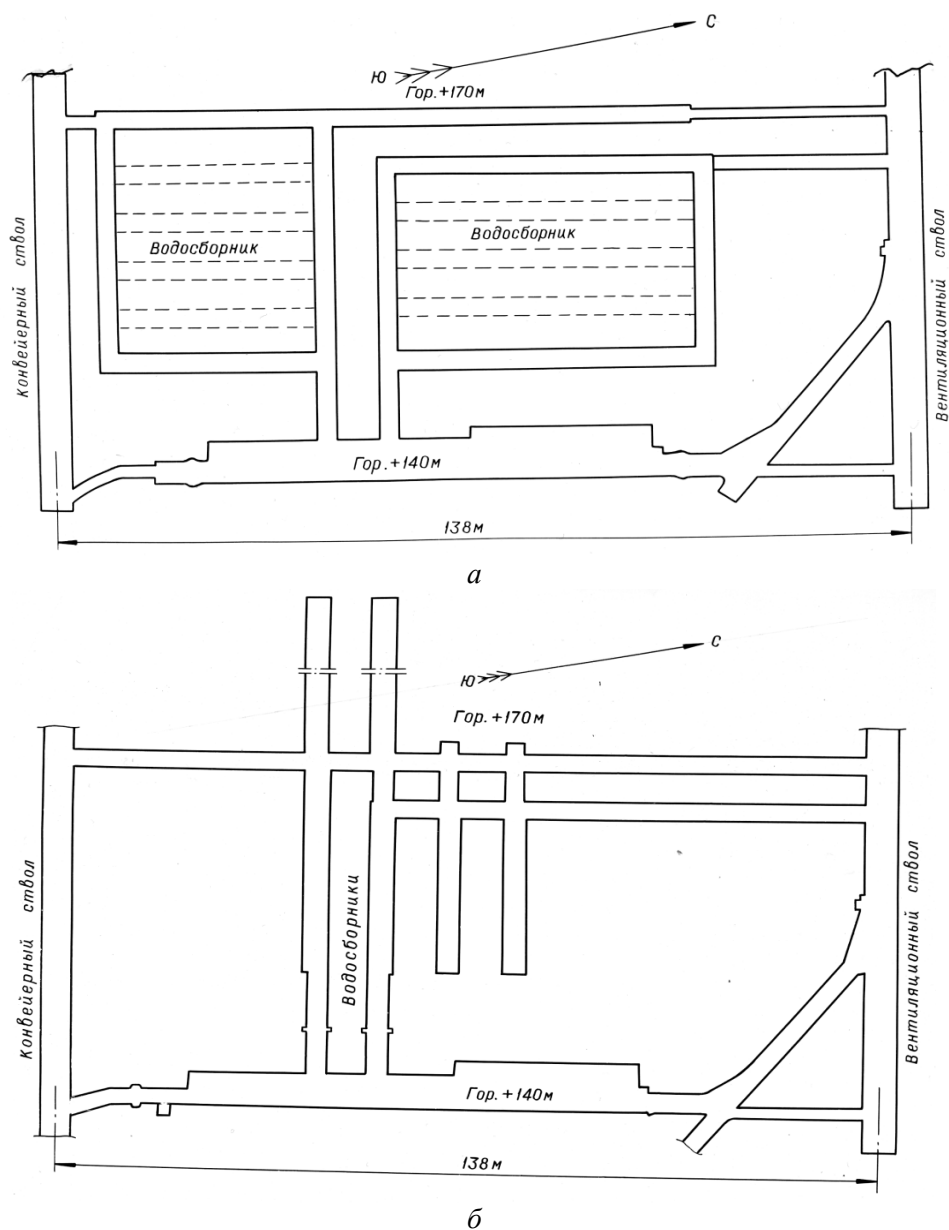


Рис. 3.7. Первоначальный (а) и переработанный (б) проекты расположения водосборников на руднике «Умбозеро»

Однако, как показывают расчеты, даже при относительно небольшом изменении положения выработок (30 %) расходы только на установку штанговой крепи в выработках комплекса водосборников были уменьшены на 20 тыс. руб.⁴, не считая уменьшения расходов на транспортировку излишней горной массы, образующейся за счет вывалов пород из кровли. Многолетние наблюдения за состоянием кровли выработок водосборников, пройденных и закрепленных по измененному проекту, свидетельствуют об эффективности принятого решения.

⁴ В ценах 1980 г.

Рудник «Умбозеро» запроектирован на производительность 800 тыс. т руды в год. С начала пуска в эксплуатацию в 1984 г. он постоянно набирал производительность и к 1990 г. практически вышел на проектные показатели, когда началась отработка верхней рудной залежи III–10. Отбойка руды в очистных камерах на обеих залежах производилась мелкошпуровым способом. Количество одновременно взрываемого ВВ составляло не более 100 кг. Отбитая руда доставлялась самоходным транспортом к рудоспускам и по конвейерному стволу выдавалась на поверхность. Описание технологии добычи руды на руднике приведено в работе [36]. Вследствие повышенного горного давления, обусловленного влиянием горизонтальных тектонических напряжений в массиве, капитальные выработки широтного направления (штреки, спиральные съезды) крепились штангами с сеткой и набрызг-бетоном, кровля очистных камер крепилась штангами длиной 2,0–2,5 м. Таким образом были отработаны блоки 1с, 2с, 3с и частично блок 1ю на залежи III–14 в течение 1984–1990 гг.

Геодинамические условия эксплуатации рудника «Умбозеро» резко изменились с начала 1990-х гг., когда над отработанной частью залежи III–14 стала отрабатываться залежь III–10. Напомним, что очистные камеры на верхней залежи III–10 имели по горизонтали такие же размеры, как и на нижней, — 60–150 м в длину и 15–20 м в ширину, но высота этих камер была вдвое больше — 5,5 м (на нижней залежи 2,5 м). Учитывая, что расстояние между залежами составляет ~ 50 м, а расстояние от кровли верхней залежи до поверхности ~ 100 м, изменения в напряженно-деформированном состоянии массива, внесенные совместной отработкой сближенных залежей, оказались весьма существенными, что более подробно рассмотрено далее. Визуально изменение геодинамического режима массива рудника после 1990 г. выразилось в том, что в месте совместной отработки залежей стали происходить сильные сейсмические события с магнитудой $M_L > 1$ ($E > 10^5$ Дж). Гистограмма распределения по годам сильных сейсмических событий ($M_L > 1$) в массиве рудника начиная с 1990 г. вплоть до его закрытия и затопления приведена на рис. 3.8.

На рисунке 3.9, а, б показаны диаграммы объемов выемки руды на залежах III–10 и III–14 за период 1990–2003 гг., то есть до закрытия рудника. Как видно из сопоставления данных рисунков 3.8 и 3.9, количество сильных сейсмических событий в массиве рудника «Умбозеро» следует за объемами выемки руды по верхней залежи III–10 (рис. 3.9, б). Сейсмичность массива в зоне совместной отработки залежей возникла и резко возросла в 1991–1993 гг., когда выемка руды на залежи III–10 имела наибольшие объемы. Сейсмичность резко упала в 1994–1996 гг., когда выемка руды резко сократилась и упала до нулевых значений. Сейсмичность массива резко возросла в 1997 г. при возрастании выемки руды на залежи III–10. И, наконец, сейсмичность резко возросла в 1999 г., вплоть до аварии 17.08.1999 г., когда добыча руды на залежи III–10 была больше, чем на залежи III–14.

Всего за время существования рудника «Умбозеро» в его недрах было зарегистрировано четыре серии ГТУ и ТЗ, основные характеристики которых представлены в табл. 3.4. Приведены энергетические характеристики только главных событий (толчков) в сериях динамических проявлений горного давления на руднике. В действительности, как это показано выше, кроме главного толчка в сериях наблюдалось еще несколько толчков более низкого энергетического уровня. На рис. 3.10 приведена схема геолого-структурного строения массива рудника «Умбозеро» и местоположение очагов ГТУ и ТЗ, перечисленных в табл. 3.4. Геолого-структурная схема массива рудника «Умбозеро» (см. рис. 3.10) и последовательность развития горных работ на залежах III–14 и III–10 (см. рисунки 3.2 и 3.3) позволяют объяснить геодинамические события в массиве рудника.

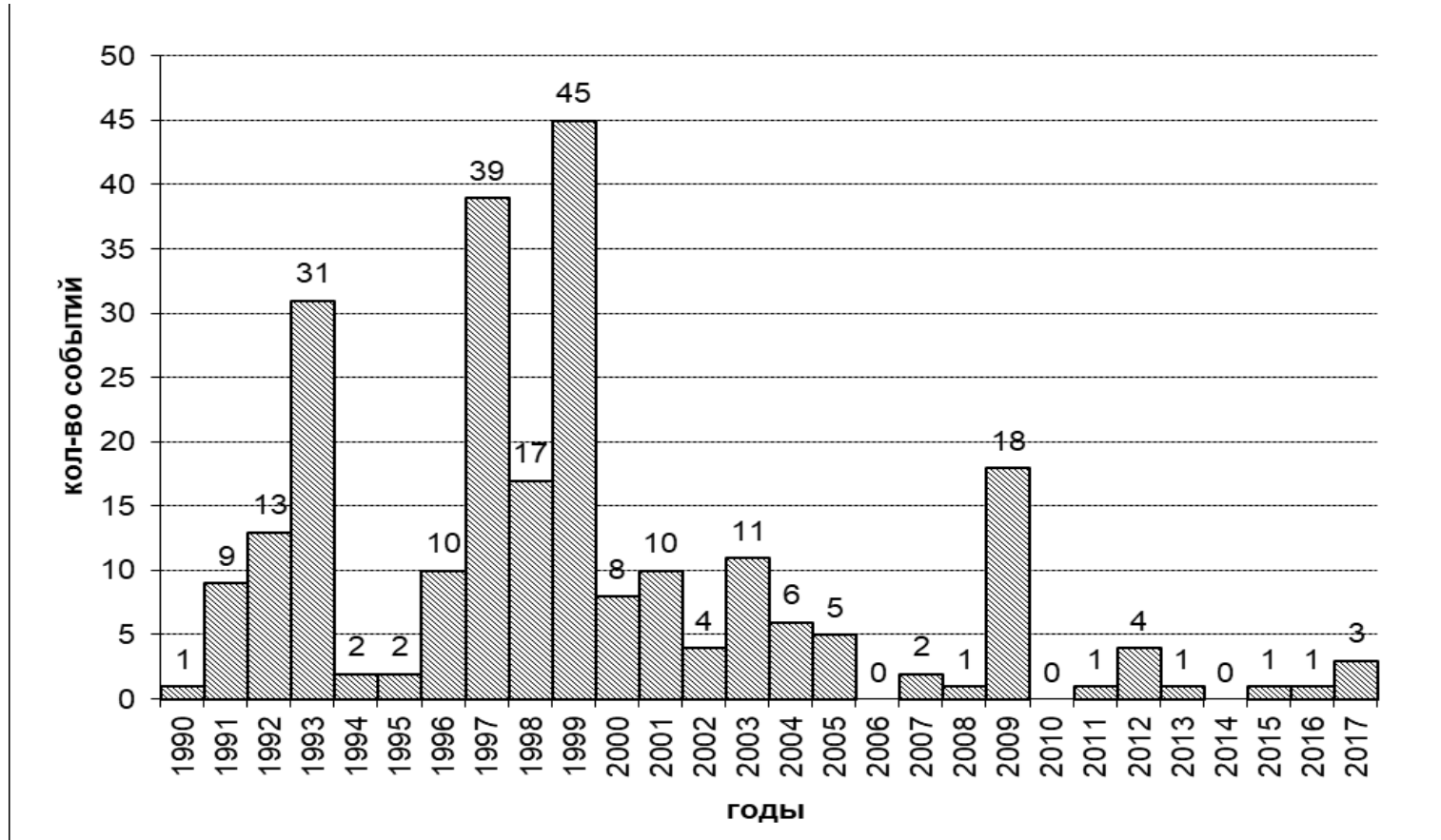
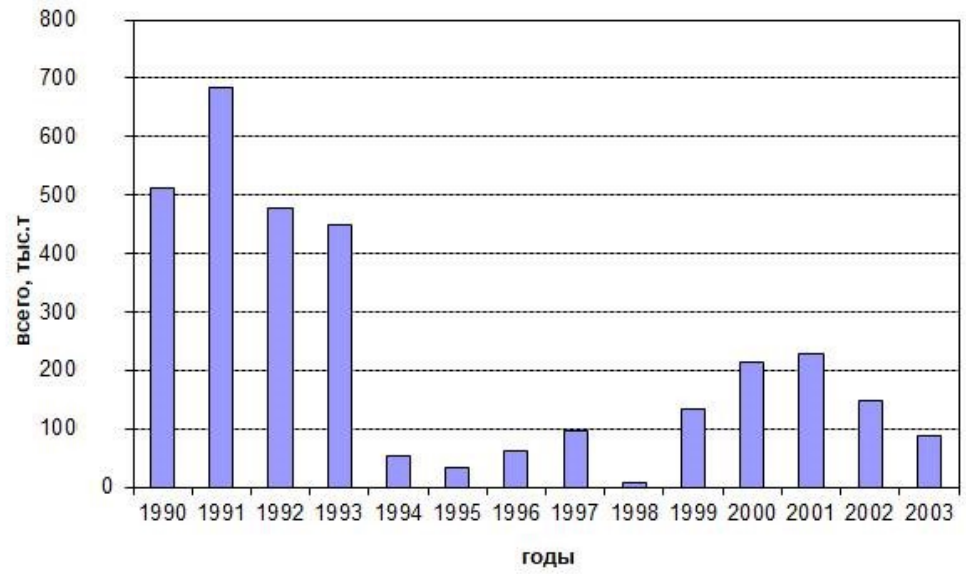
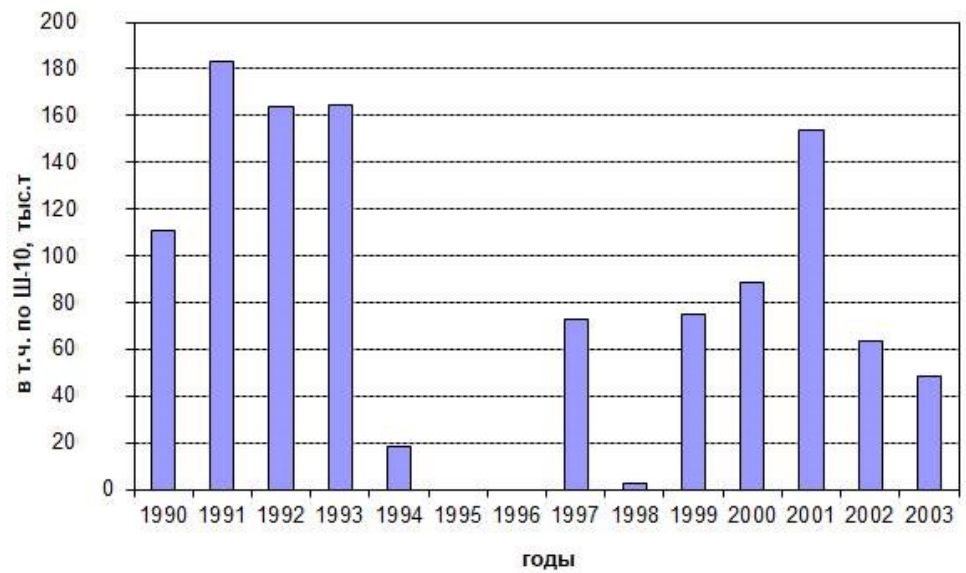


Рис. 3.8. Гистограмма распределения сильных сейсмических событий ($M_L > 1$) в массиве рудника «Умбозеро» (по данным КРСЦ ГС РАН)



a



б

Рис. 3.9. Отбойка горной массы на руднике «Умбозеро» по годам:
a — всего; *б* — в том числе по залежи Ш-10 (тыс. т)

Таблица 3.4

Характеристика ГТУ и ТЗ на руднике «Умбозеро»

Дата	Мagnitude события	Местоположение очага		Последствия	Тип события
		на плане горных работ	средняя глубина, м		
25.10.1991 г. 03.11.1991 г. 09.11.1991 г.	2,2–2,5	Блок 1ю	300	Обрушение стенок и кровли в камерах, разрушение откаточных штреков на площади около 80 тыс. м ² , горные работы в блоке прекращены	ГТУ
30.11.1992 г. 17.08.1999 г.	1,5 5,0	Блок 3с Блоки 1с–3с	250 300	Вывалы в камерах 6/230–10/230, 5/210 площадью до 400 м ² Разрушение штреков, капитальных транспортных выработок и очистных камер на площади 600–650 тыс. м ² . Образование трещины от камер залежи III–10 до дневной поверхности длиной 500 м. Полная остановка рудника на 3,5 мес.	ТЗ ГТУ
04.10.2004 г.	3,9	Блоки 1с–2с		Расширение трещины в покрывающей толще пород на 150–200 м в длину. Вывал пород из кровли камеры 300 м ³	ТЗ

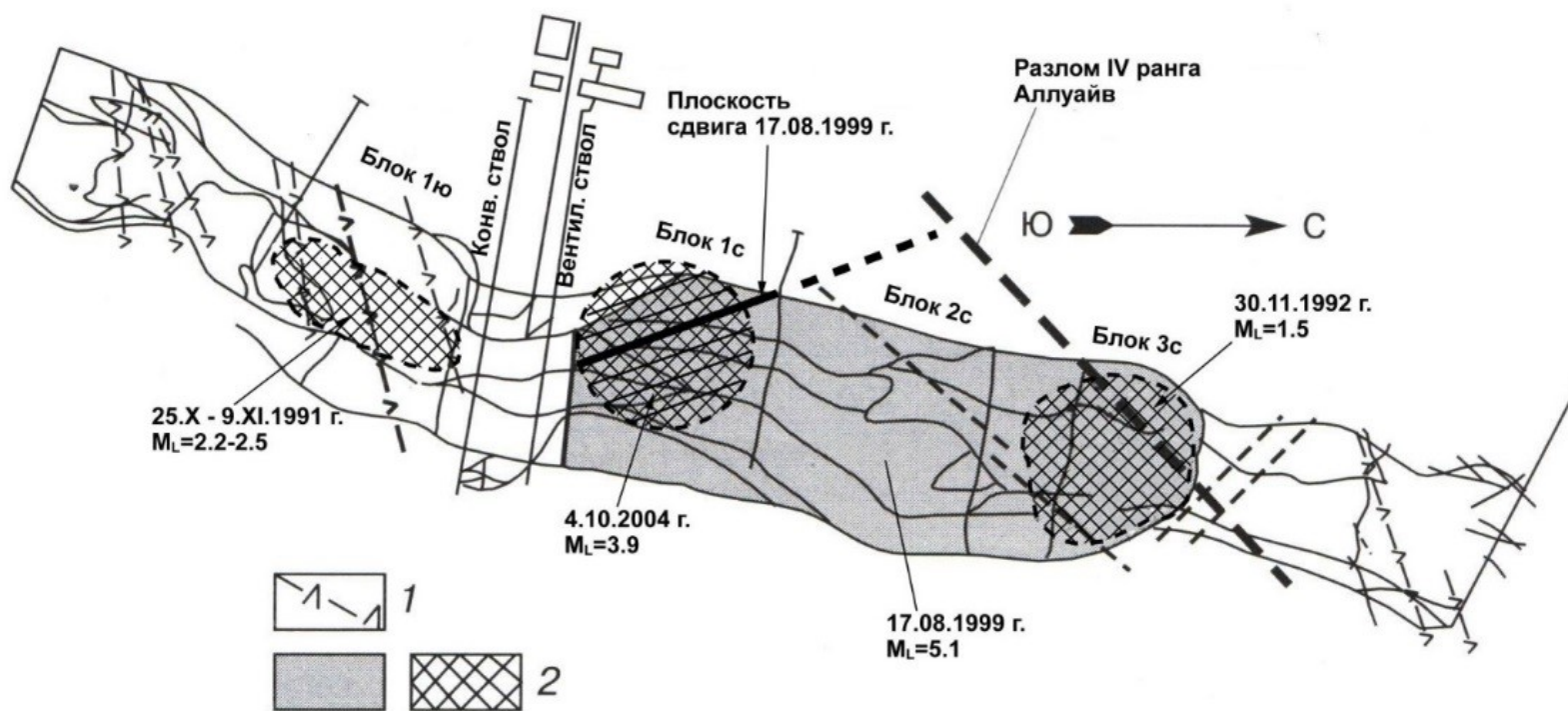


Рис. 3.10. Схема геолого-структурного строения массива рудника «Умбозеро» с местоположением очагов происшедших ГТУ:
1 — тектонические нарушения; 2 — очаги ГТУ

Возникшая в 1990-х гг. и возрастающая сейсмичность в массиве Ловозерского месторождения [37] была неожиданной, тем более что до 1990-х гг. в этом районе за все время сейсмологических наблюдений на Кольском полуострове (с 1956 г.) там не было зарегистрировано ни одного сейсмического события [38]. Изменение геодинамического режима массива рудника «Умбозеро» отразилось на ведении горных работ: вскоре после начала выемки верхней залежи III–10 над отработанной частью залежи III–14, в блоке Iю рудника, на залежи III–14 произошли сразу три ГТУ — 25 октября, 3 и 9 ноября 1991 г. — с магнитудами $M_L = 2,2–2,6$ (см. табл. 3.4) [39]. Они выразились в разрушениях целиков и выработок в нижней части блока Iю (площадь блока 400×500 м) на площади 80 тыс. м². На поверхности ГТУ ощущались как периодические толчки и расценивались техническим персоналом рудника как землетрясения. Это были первые сильные сейсмические события в Ловозерском массиве. Сама регистрация событий 25 октября — 9 ноября 1991 г. и оценка их магнитудного уровня выполнена КРСЦ ГС РАН (50 км от рудника «Умбозеро»). Вследствие ГТУ и разрушения выработок отработка запасов руды в блоке Iю выполнена только на 60 % [40], поскольку оставшиеся в нем запасы руд пришлось бросить, хотя все капитальные и подготовительные выработки для выемки этих запасов были построены.

Причиной ГТУ в блоке Iю рудника, как показано в работе [19], стала выемка руды на верхней залежи III–10 в 1990–1991 гг. и на нижней залежи III–14 в 1984–1990 гг. По нашему мнению, это привело к тому, что началось «всплытие» геолого-структурного блока IV ранга (по классификации табл. 1.4). Для инициирования подвижки блока в новое положение геодинамического равновесия необходимо изменение его массы всего на 0,001 %. Поскольку очистной блок Iю находился на грани крупного геолого-структурного блока IV ранга [39], его подвижка в новое положение геодинамического равновесия привела к ГТУ. Схема проявлений горного давления в результате ГТУ 25 октября, 3 и 9 ноября 1991 г. в блоке Iю приведена на рис. 3.11.

Следует отметить, что горно-геологические условия блока Iю имели несколько особенностей, отличающих его от других блоков. Весь блок в диагональном направлении пересекает серия почти параллельных крутопадающих даек диабаз мощностью 0,2–15 м с углом падения 55–80 °. Направление плоскостей даек почти широтное ($A = 60–80$ °); расстояние между ними в среднем около 150 м; иногда (на южном фланге) отмечается сближение даек до 20–50 м. В средней части блок пересекает почти по продольной его оси дайка другого направления, с углом падения 60–70 °, простирания 40–50 °, мощностью 0,4–0,5 м. Зоны сопряжений даек сопровождаются более интенсивной трещиноватостью массива. В северной части блока отмечается ряд еще более мелких тектонических трещин и даек, а также зон интенсивной трещиноватости разных направлений. Таким образом, по степени нарушенности массива дайками, тектоническими трещинами и зонами интенсивной трещиноватости разных направлений массив блока Iю является наиболее нарушенным из всех эксплуатируемых очистных блоков. В нем на стадии подготовки к эксплуатации служба СППГУ неоднократно определяла категории удароопасности пород методом дискования керна скважин. Категорий удароопасности определено немного. Однако ряд из них (на семи станциях по методу дискования керна (см. рис. 3.11)) показали I–II категорию удароопасности.

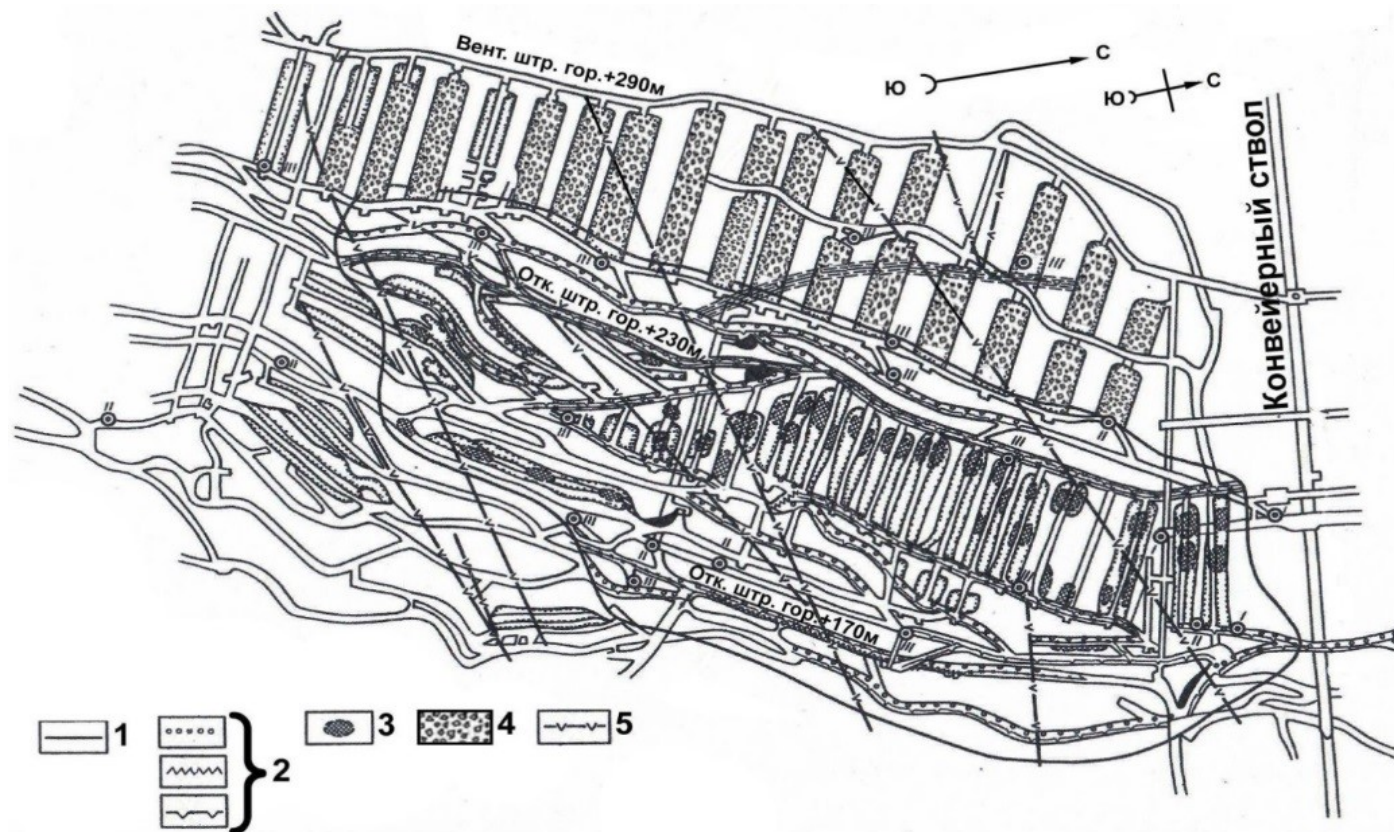


Рис. 3.11. Последствия ГТУ в блоке Iю:

1 — граница суммарной площади воздействия удара; 2 — разрушение свода кровли и крепи выработок; 3 — отслоение в кровле камер; 4 — гидравлическая закладка камер; 5 — тектонические нарушения

По указанию СППГУ на этих участках проводились локальные мероприятия (щелевая разгрузка в сопряжении борта выработок с кровлей) по снижению степени удароопасности. Характерно, что, как это видно из рис. 3.11, практически весь участок, где в последующем произошел ГТУ, оконтуривался на стадии подготовки к выемке запасов как высоконапряженная, склонная потенциально к проявлениям горных ударов зона I–II категории удароопасности.

Определения удароопасности пород в выработках по методу дискования керна в скважинах проводились по всей площади шахтного поля на залежи III–14. Схема распределения гравитационно-тектонических напряжений на отработанной части залежи III–14 по определениям напряженности пород методом дискования керна с расположением тектонических нарушений приведена на рис. 3.12.

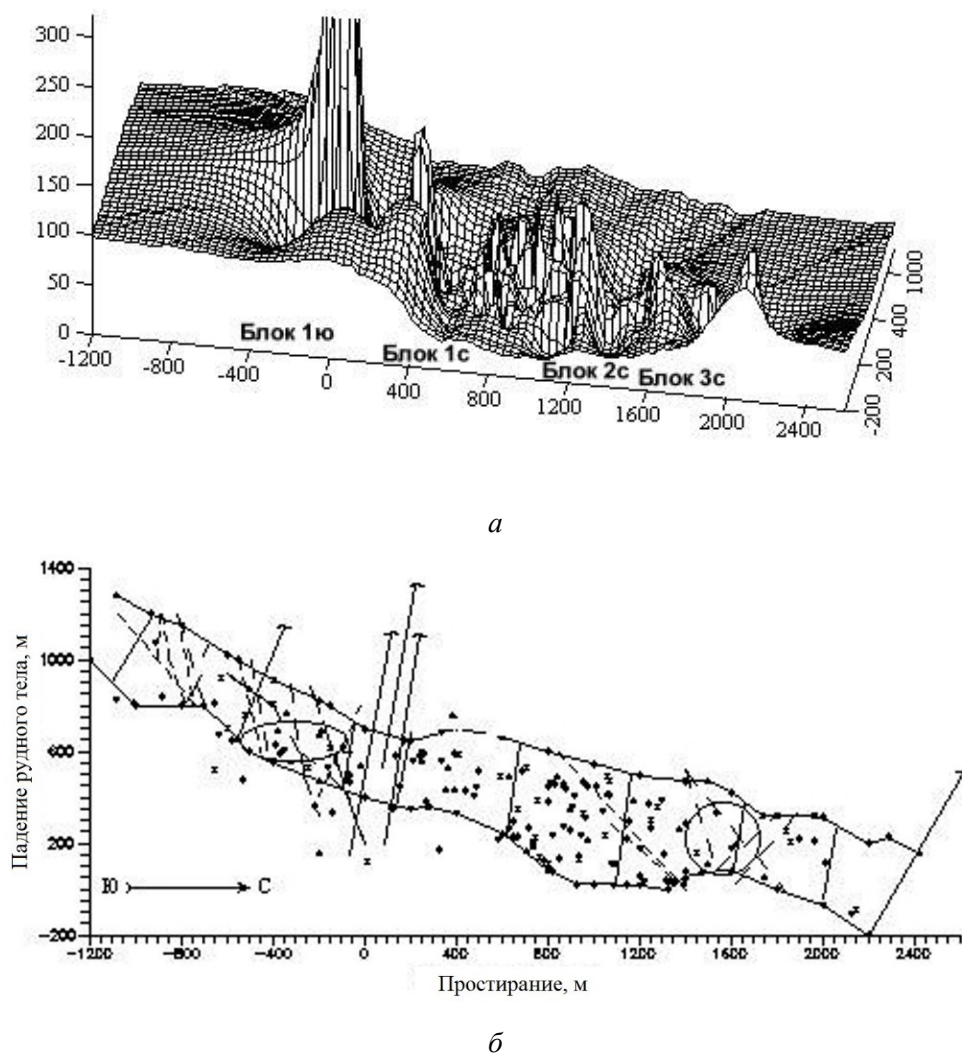


Рис. 3.12. Распределение гравитационно-тектонических напряжений и очагов ГТУ по площади отработанной залежи III–14: *а* — пространственное изображение распределения напряжений; *б* — расположение очагов ГТУ

По сочетанию большого количества тектонических нарушений и трещин, повышенной напряженности массива местоположение блока 1ю позволяет считать его границей геолого-структурного блока IV ранга, в котором находится рудничное поле рудника «Умбозеро». Другой границей этого геолого-структурного блока можно считать разлом Аллуайв, пересекающий блок 3с (см. рис. 3.10). Именно на этих участках произошли ГТУ при производстве выемки руды на залежи III–14 (см. рисунки 3.10, 3.12). Судя по приведенным данным о развитии горных работ, выемка руд на вышележащей залежи III–10 «развязала» сейсмичность в массиве рудника «Умбозеро». Выемка горных масс из залежей III–10 и III–14 стала причиной ГТУ у южной грани геолого-структурного блока IV ранга в блоке 1ю. Развитие горных работ к северному флангу по залежи III–14 стала причиной еще одного ГТУ, у северной грани геолого-структурного блока, в очистном блоке 3с (см. табл. 3.4). Дальнейшее наращивание объемов выемки горных масс на залежи III–10 привело к лавинному нарастанию сейсмичности в массиве (см. рис. 3.8) и ГТУ 17.08.1999 г., разрушившему рудник, что более подробно рассмотрено далее.

Наконец, возрастание объемов выемки руды на залежи III–10 в 2000–2003 гг. из-за того, что выработки на залежи III–14 были разрушены, привело к тому, что трещина в покрывающей толще пород, образовавшаяся 17.08.1999 г., еще более расширилась во время ТЗ 4 октября 2004 г. (см. табл. 3.4). Таким образом, сильные геодинамические события в массиве рудника «Умбозеро» объяснимы последовательностью развития горных работ при сближенной выемке двух пологопадающих залежей в условиях действия в массиве больших горизонтальных тектонических напряжений. Немаловажную роль при этом сыграли тектонические нарушения массива IV ранга, расположенные в пределах шахтного поля рудника. Крупноблоковая структурная нарушенность массива рудника подверглась подвижкам только в тот момент, когда стала отрабатываться вторая вышележащая рудная залежь, то есть когда сплошность массива была в достаточной мере нарушена горными выработками. Количественные изменения напряженного состояния массива при этом описаны далее.

4. ПОСЛЕДСТВИЯ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА 17 АВГУСТА 1999 ГОДА НА РУДНИКЕ «УМБОЗЕРО»

Для оценки последствий ГТУ 17.08.1999 г. в подземных выработках рудника «Умбозеро» и на поверхности шахтного поля была выполнена маркшейдерская съемка разрушений непосредственно после самого события, в результате которой установлено, что в подземных условиях разрушены горные выработки трех очистных блоков залежи III–14: 1с, 2с и 3с (площадь каждого блока 400 × 500 м); общая площадь разрушений составила 650 тыс. м². Результаты съемки последствий ГТУ в горных выработках блоков 1с, 2с, 3с представлены на рис. 4.1 и в общем виде опубликованы в работе [1]. На рис. 4.1 детально показаны разрушения в каждом из очистных блоков 1с, 2с и 3с.

В блоке 1с наибольшим разрушениям подвержены узкие капитальные выработки шириной 3–4 меридионального направления — штреки гор. + 290, +250, + 230, + 170 м — и спиральный съезд, имеющий диагональное направление (см. рис. 4.1). В то же время такие же выработки широтного направления уцелели. В узких капитальных выработках меридионального направления разрушены кровля и отмечается выпучивание почвы таким образом, что разрушенными породами перекрыто от 10 до 90 % поперечного сечения выработок. Наибольшее количество обрушений кровли отработанных очистных камер, расположенных между ленточными целиками спирального съезда (ширина целиков 10 м) и охранными целиками наклонных стволов (ширина целиков 140 м), имеют место в южной части блока 1с. Также обрушение кровли очистных камер произошло в панелях гор. + 290, + 250, + 230, + 209, + 184 м. Всего — в 50 % отработанных камер. Мощность обрушений кровли в очистных камерах невелика и не превышает 3 м. Площадь обрушений в камерах составляет от трети до половины площади каждой камеры. Целики практически не разрушены; разрушения приконтурной части целиков имели место только в 10-метровых ленточных целиках, ограждающих спиральный съезд. Более подробно об этом сказано далее.

Как видно из рис. 4.1, в блоке 2с в наибольшей степени разрушены капитальные выработки шириной 3–4 м меридионального направления (штреки, спиральные съезды): вентиляционный штрек самого верхнего горизонта + 290 м, и откаточный штрек самого нижнего горизонта + 170 м, то есть выработки, граничащие с нетронутым массивом. Выработки широтного направления (разрезные штреки, восстающие) уцелели. Вывалы и отслоения зафиксированы в отработанных очистных камерах, однако в меньшем количестве, чем в блоке 1с, поскольку в блоке 2с они имеют место только в 40 % камер. Мощность вывалов и отслоений в очистных камерах блока 2с, так же как и в блоке 1с, невелика и не превышает 3 м. Площадь обрушений в камерах, также как и в блоке 1с, составляет от трети до половины площади камер. Разрушение целиков незначительное и имеет место только в их приконтурной части.

В блоке 3с наибольшим разрушениям подвержены капитальные выработки меридионального направления: вентиляционный штрек гор. + 290 м, откаточные штреки гор. + 235 и + 209 м, доставочный штрек гор. + 176 м. Выработки широтного направления (восстающие, съезды) уцелели. Вывалы и отслоения небольшой мощности имеют место в 30 % отработанных камер блока 3с. Они располагаются вблизи крутопадающих трещин разлома Аллуйв, пересекающего блок 3с по диагонали.

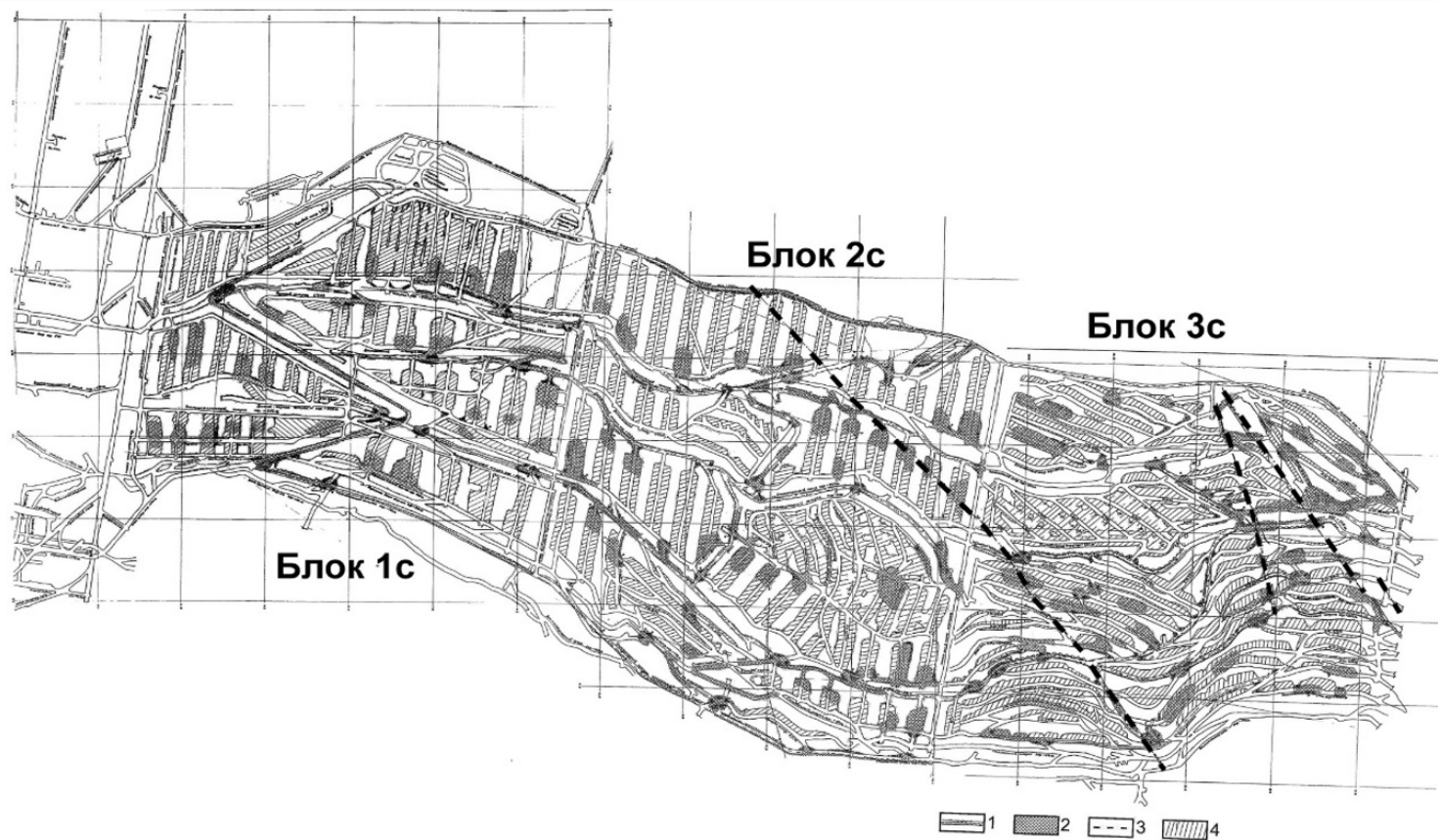


Рис. 4.1. План разрушительных последствий ГТУ 17.08.1999 г. в очистных блоках рудника «Умбозеро»:
 1 — капитальные выработки с разрушением крепи, образованием «шатра» в кровле, поднятием почвы; 2 — обрушения кровли в камерах;
 3 — тектонические нарушения; 4 — отработанные очистные камеры

Наиболее масштабным последствием ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро», с нашей точки зрения, является образование обширной трещины в покрывающей толще горных пород, от междупластья совместной отработки сближенных рудных залежей III-10 и III-14 до дневной поверхности, протяженность которой составила ~ 500 м по ее падению (наклон 40° к горизонту). Трещина в подземных выработках пересекла два квершлага, соединяющих выработки залежей III-10 и III-14 на гор. +290 м, расположенных параллельно на расстоянии 150 м друг от друга (рис. 4.2). Ее положение в вертикальном поперечном разрезе рудника приведено на рис. 4.3. Трещина, выраженная как зона интенсивной трещиноватости толщиной 10–30 см, нарушающая выработки под углом 40° к горизонту с вывалом пород из кровли квершлага гор. +290 м, показана на рис. 4.4.

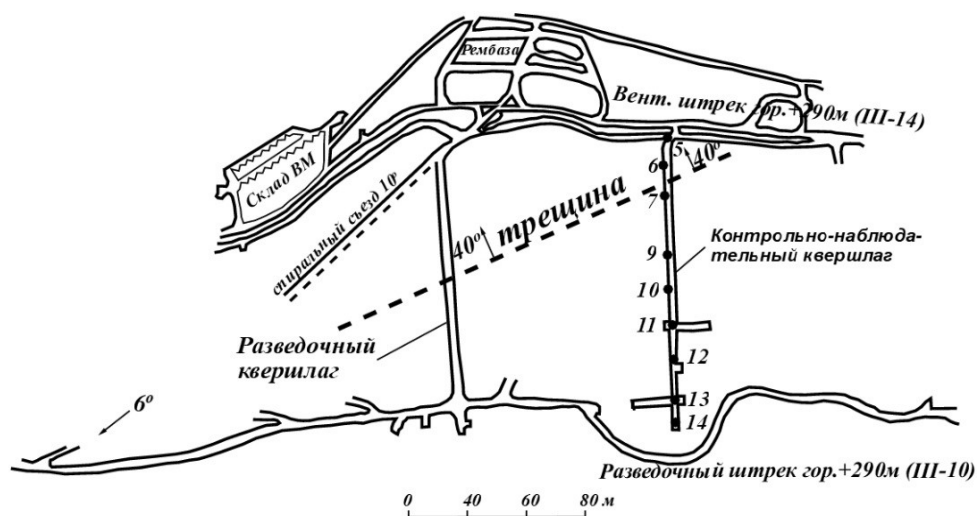


Рис. 4.2. Схема расположения трещины в междупластье, образовавшейся в результате ГТУ 17.08.1999 г.

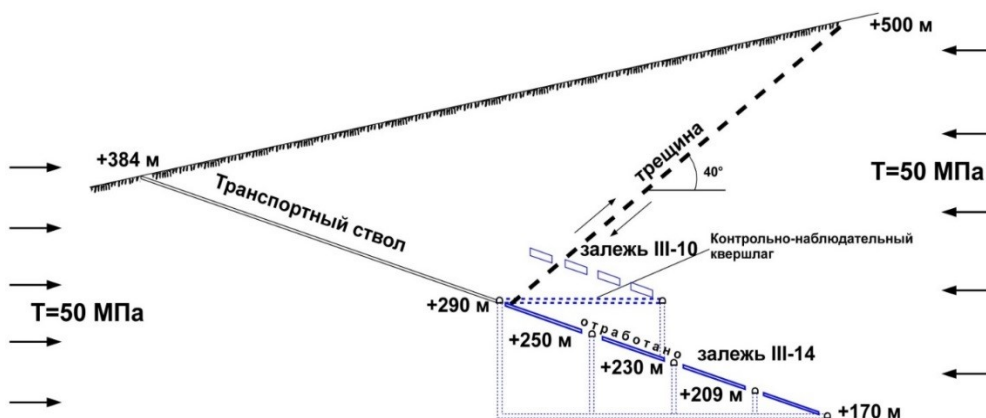


Рис. 4.3. Схема трещины разрушения (зоны сдвига) в вертикальном поперечном сечении шахтного поля рудника «Умбозеро»

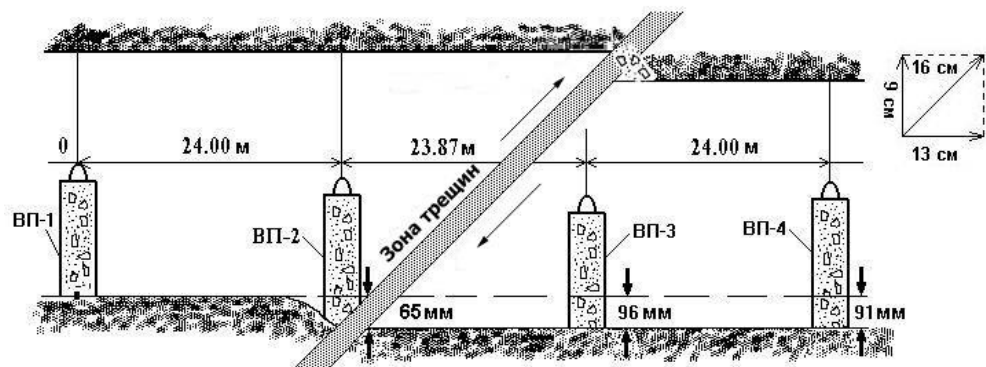


Рис. 4.4. Схематический вид трещины разрушения в контрольно-наблюдательном квершлаге гор. + 290 м (ВП-1, ВП-2 ... — высокоточные пункты наблюдений).

Трещина вышла на дневную поверхность горного склона и пересекла устье ручья Аллуайв, текущего по поверхности из одноименного горного цирка на склоне Ловозерского массива (рис. 4.5).

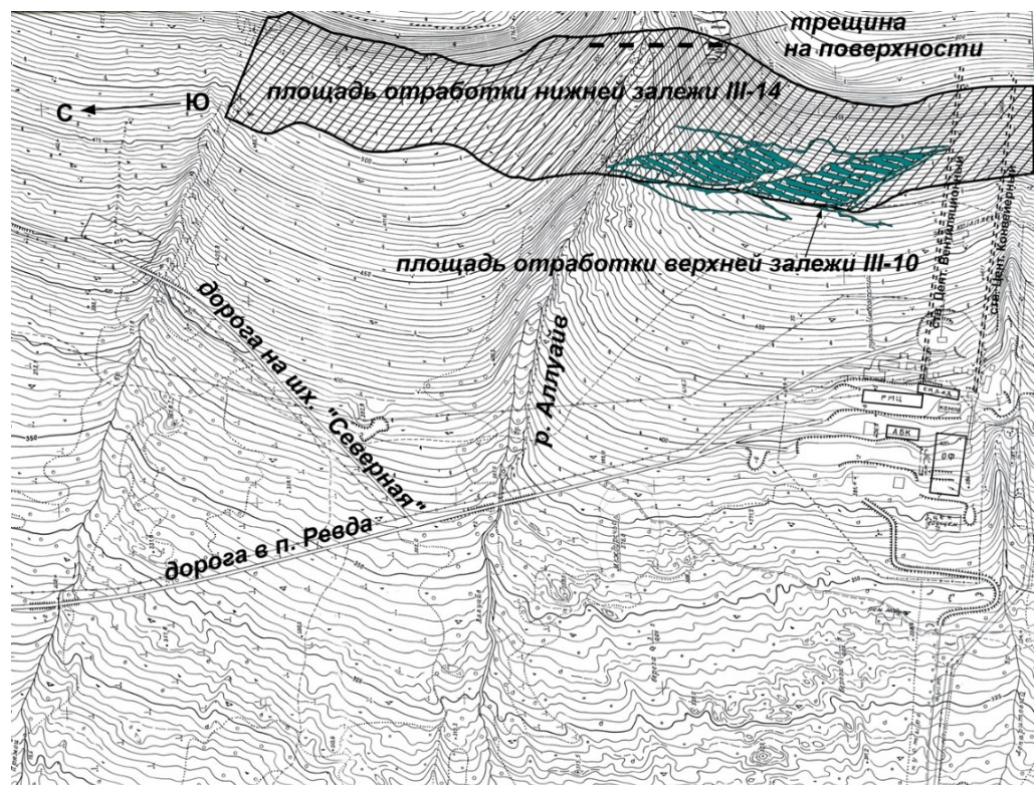


Рис. 4.5. Расположение зон отработки руд рудника «Умбозеро» относительно ручья Аллуайв и трещины, вышедшей на поверхность 17.08.1999 г.

Ручей Аллуайв по образовавшейся трещине ушел в горные выработки залежи III–10 на глубину 150 м по вертикали от поверхности. На почве горных выработок залежи III–10 образовался водный поток, а водоприток на руднике после 17.08.1999 г. увеличился вдвое. По следам образовавшейся трещины была произведена маркшейдерская съемка поверхности и подземных выработок рудника, результаты которой приведены на рис. 4.6, *а*, *б*, из которого видно, каким образом вода из ручья Аллуайв попала в горные выработки. Сама трещина толщиной 1–2 см непрерывно прослежена в кровле и бортах выработок залежи III–10 на длину 500–600 м (см. рис. 3.3). Как видно из рис. 4.6, водоприток из трещины наблюдался в средней части ее протяженности, то есть местоположение водопритока находится в ее центральной части, в которой ручей Аллуайв сдренировал в горные выработки. Сам ручей, текущий сотни лет по поверхности Ловозерского массива, после трещины исчез с поверхности (рис. 4.7).

Трещина, по нашему мнению, является очагом ГТУ 17.08.1999 г. Ее геометрические параметры (см. рисунки 4.5, 4.6) были использованы в дальнейшем для оценки энергии произошедшего геодинамического события. Фактически измеренные геометрические параметры трещины (длина, ширина, величина подвижки) оказались весьма важными с точки зрения восприятия ее как очага сейсмического события, поскольку они не измерялись на других удароопасных российских рудниках, за исключением последствий сейсмического события 16 апреля 1989 г. на Кировском руднике в Хибинах, описанных в работе [41]. При этом параметры трещины сдвига на Кировском руднике [41] определены достаточно приближенно, тогда как в контрольно-наблюдательном квершлага гор. + 290 м рудника «Умбозеро» оказалось возможным точно измерить (до 0,1 мм) параметры подвижки по трещине, поскольку в нем был заложен специальный геодезический полигон, по которому осуществлялись регулярные мониторинговые измерения, о результатах которых сказано далее.

Поскольку геометрические параметры трещины разрыва, по которой произошел ГТУ 17.08.1999 г., оказались принципиально важными и в дальнейшем использовались для расчетов энергии события, приведем их численные значения: длина трещины по падению от выхода на дневную поверхность до междупластья залежей III–10 и III–14 — 500 м; ширина по простиранию — 500–600 м; угол наклона трещины к горизонту — 40 °; величина подвижки берегов трещины относительно друг друга, измеренная в контрольно-наблюдательном квершлага гор. + 290 м, — 16 см. Ширину трещины по простиранию точно определить было невозможно, поскольку она уходит в массив, где горные выработки отсутствуют. Следует отметить, что ее плоскость является свежей, то есть трещина прошла по сплошной породе, пересекая ее слои, никаких предыдущих трещин или плоскостей ослабления в месте ее расположения, как следует из изучения геологических материалов, не выявлено.

В результате ГТУ 17.08.1999 г. в блоках 1с, 2с, 3с откаточные штреки шириной 3,5–4,5 м на всех откаточных горизонтах (+ 290, + 250, + 230, + 200, +170 м), отделенные по восстанию и падению залежи от очистных выработок ленточными целиками шириной 10–20 м, разрушены в максимальной степени с перекрытием поперечного сечения от 10 до 90 %. При этом почва штреков во многих местах вздыбилась на высоту до 0,5–1,0 м, а кровля обрушилась на высоту до 1,0–2,0 м с формированием свода шатровой формы.

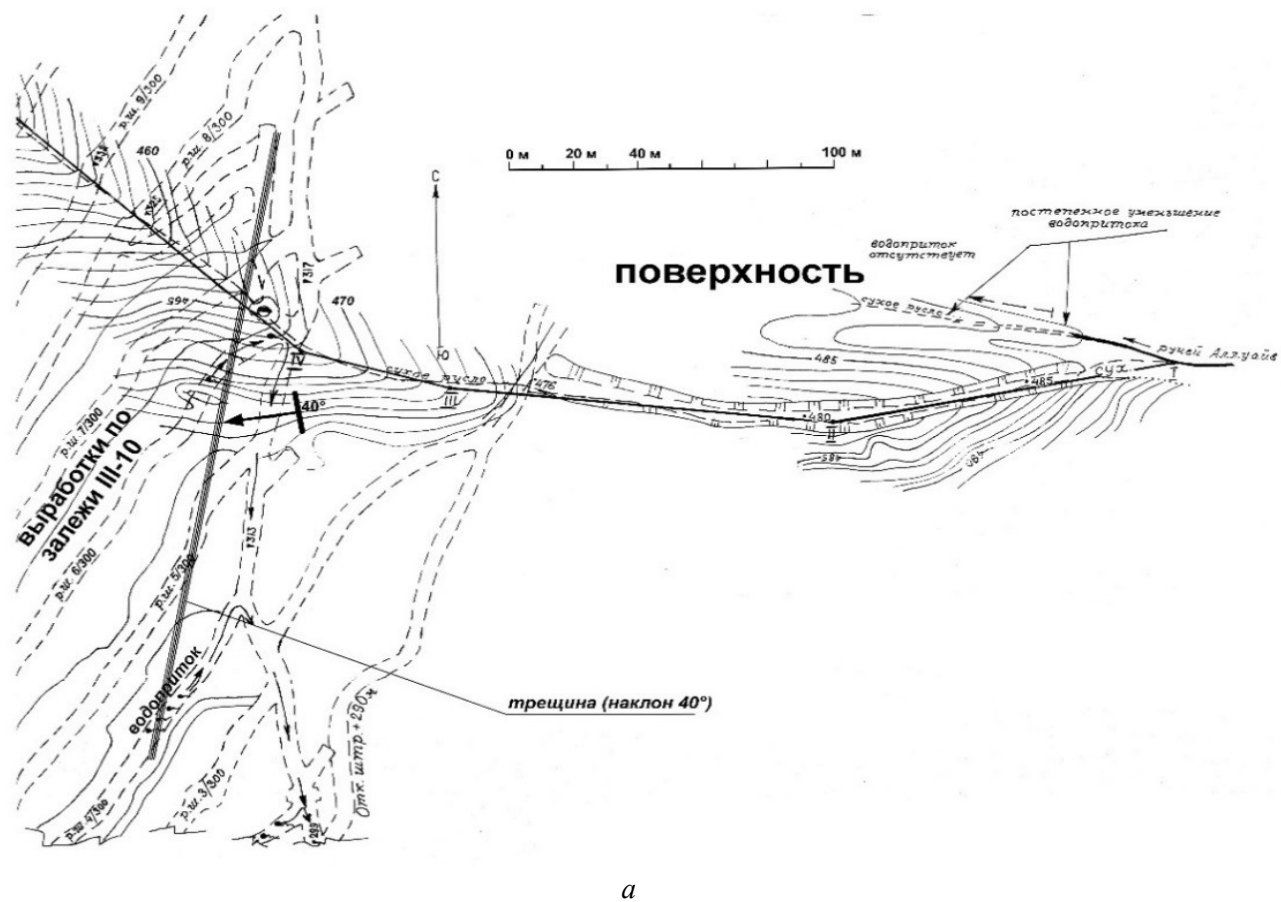


Рис. 4.6. Схема дренирования ручья Аллуайв в горные выработки (начало):
a — совмещенный план поверхности и горных выработок залежи III-10;

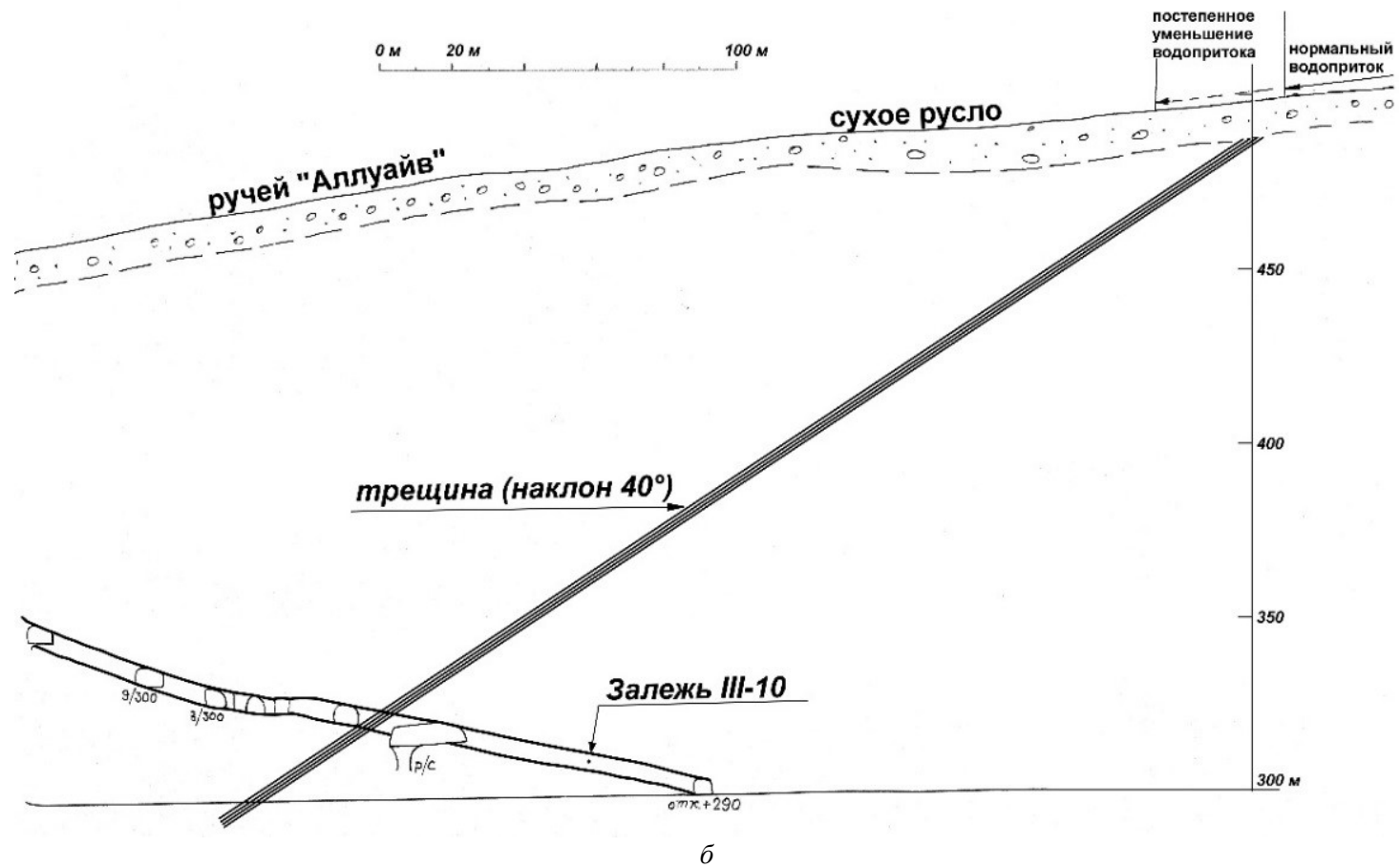


Рис. 4.6. Схема дренирования ручья Аллуйв в горные выработки (окончание):
б — вертикальный разрез по руслу ручья Аллуйв



Рис. 4.7. Вид сухого ручья Аллуайв

Схема деформирования штреков показана на рис. 4.8, *а*, разрушения кровли и почвы штреков показаны на рис. 4.8, *б–г*. Вид разрушений штреков позволяет сделать вывод, что выработки сдавило мощным прессом в широтном направлении горизонтальными силами на величину 0,5–0,7 м. В то же время выработки меридионального направления (наклонные стволы, фланговые вентиляционные восстающие, разрезные восстающие очистных камер) разрушениям не подвержены. Именно из-за этого после ГТУ удалось вывести персонал из рудника по наклонному стволу, имеющему широтное направление на поверхность.

Сильным разрушениям, главным образом со стороны почвы, подвержен спиральный съезд блока 1с, построенный для спуска-подъема в рудник крупногабаритной самоходной техники, имеющий бетонное дорожное полотно толщиной 40 см. Съезд шириной 4 м, имеющий спиральную в плане форму (см. рисунки 3.2, 4.1), огражден на всем протяжении с обеих сторон ленточными целиками шириной 10 м. Бетонное полотно почвы съезда в результате удара практически повсеместно поднято к центру на высоту до 0,5 м и разрушено трещинами на отдельные плиты (рис. 4.9). Набрызг-бетонная крепь кровли съезда повсеместно нарушена.

Следует заметить, что степень разрушения капитальных выработок (откаточных штреков, автодорожных съездов) увеличивается с ростом глубины: если на верхнем вентиляционном штреке (гор. + 290 м, глубина до поверхности 200 м) разрушено по протяженности 400 м выработки, то на нижнем откаточном штреке (гор. + 170 м, глубина до поверхности 420 м) разрушено 800 м выработки. При этом в выработках, кроме глыбовых отслоений со стороны кровли и стенок, вспучивания почвы, отмечается разрыв и передавливание трубопроводов, обрыв кабелей, срезание штангового крепления

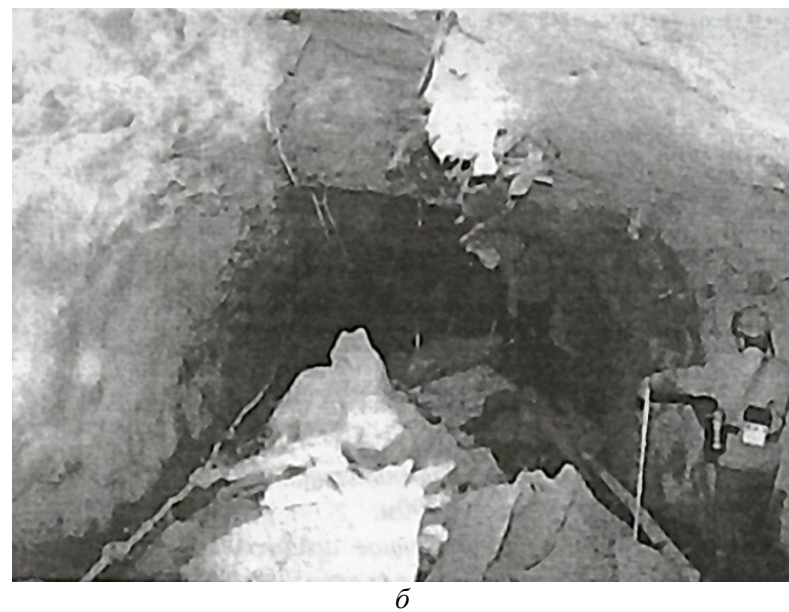
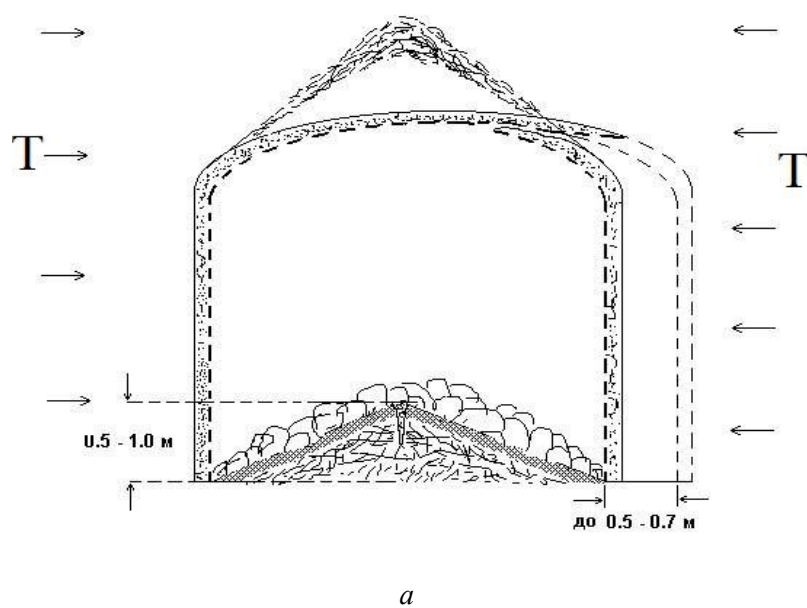


Рис. 4.8. Разрушение штреков на руднике «Умбозеро» (начало): *a* — схема разрушения; *б* — вид разрушения кровли и почвы транспортного штрека гор. + 290 м;



a



b

Рис. 4.8. Разрушение штреков на руднике «Умбозеро» (окончание):
a — кровли откаточного штрека гор. + 230 м; b — кровли доставочного штрека гор. + 250 м

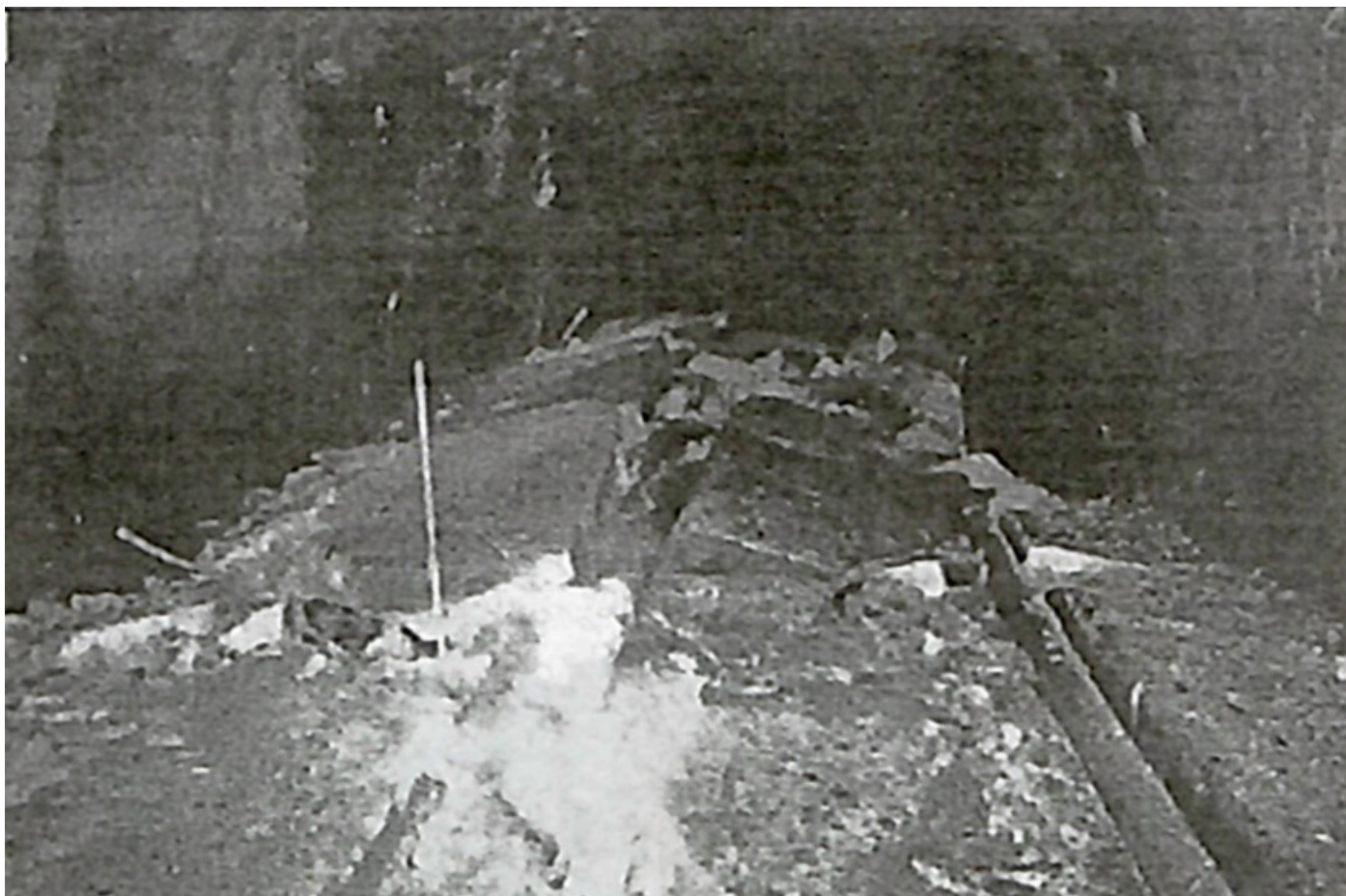


Рис. 4.9. Вид разрушения бетонного дорожного полотна спирального съезда блока 1с

Широкие очистные камеры рудника шириной 15–20 м разрушены в значительно меньшей степени, чем узкие откаточные штреки меридионального направления. Обрушения пород из кровли камер на всю их ширину имеют место только в сопряжениях с околоштрековыми целиками, обычно не более чем на треть длины камер, при этом обрушения пород кровли наблюдаются только в части камер, составляющей не более половины (45 %) их общего числа (см. рис. 4.1). Из рис. 4.1 видно, что обрушения кровли камер систематически наблюдаются только по линии пересечения горных работ крутопадающим (84–88 °) разломом Аллуайв в северной части блока 3с, пересекающем горные выработки по диагонали в направлении СВ–ЮЗ. Мощность разлома 0,5–0,7 м. Обрушения кровли в камерах вблизи разлома являются косвенным свидетельством того, что во время ГТУ по разлому происходили подвижки пород. Судя по картине разрушений, участок сдавило сверху и снизу в широтном направлении — по направлению максимальных тектонических напряжений в массиве. Соответственно, количество разрушений почвы и кровли выработок больше там, где больше оставленных целиков, и, наоборот, там, где отработанная площадь участков рудной залежи больше и целиков меньше, разрушения минимальны. То есть, если следовать предыдущей аналогии сдавливания выработок с боков мощным прессом, там, где породы кровли и почвы имели возможность прогнуться в выработанное пространство, разрушения минимальны; там, где этому процессу мешали целики, разрушения максимальны.

В результате обследования установлено, что при ГТУ разрушения совершенно не коснулись верхней залежи III–10, отработанной над разрушенным участком нижней. Очевидно, появившаяся трещина послужила защитным экраном от действия горизонтальных сжимающих напряжений для выработок верхней залежи. В результате большого количества разрушений, обрыва энергетических и трубопроводных коммуникаций рудник «Умбозеро» был полностью остановлен на 3,5 месяца. Для полного восстановления и выхода на плановую производительность понадобилось полтора года.

5. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА РУДНИКА «УМБОЗЕРО» В ЗОНЕ ВЫЕМКИ СБЛИЖЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Проектирование, строительство и эксплуатация рудника «Умбозеро» в 1980–2004 гг. осуществлялись в период, когда в российской горнотехнической литературе господствовало представление о том, что единственной силой, вызывающей проявления горного давления, в том числе горные удары, является вес толщи покрывающих пород. Поскольку при отработке нижней залежи III–14, так же как и при отработке верхней залежи III–10, применялась камерно-целиковая система разработки, при которой устойчивость подрабатываемых толщ обеспечивалась поддерживающими опорными целиками, одной из вероятных причин происшедшего ГТУ 17.08.1999 г., на первый взгляд, могла бы оказаться недостаточная прочность оставленных поддерживающих целиков. Поэтому была произведена проверка их прочности на каждой из отработанных залежей рудника.

Расчет целиков при проектировании рудника проводился на полный вес толщи налегающих пород до поверхности (без учета тектонических напряжений) с достаточным запасом прочности. Соотношение размеров выработанного пространства к глубине отработки для верхней и нижней отрабатываемых залежей, как это показано выше, позволяет утверждать, что на целики каждой из залежей приходится полный вес толщи покрывающих пород до поверхности. Оценка нагрузок на целики по весу толщи налегающих пород рассчитывалась по соотношению:

$$P = \frac{S_b}{S_{ц}} \gamma H_{ср}, \quad (5.1)$$

где P — удельная нагрузка на целик, т; S_b — площадь выработанного пространства, прилегающего к целику, с целиком, м²; $S_{ц}$ — площадь целика, м²; γ — плотность покрывающих пород, т / м³; H — средняя мощность толщи покрывающих пород над целиком, м.

Не вдаваясь в детали, отметим, что для оценки прочности поддерживающих целиков на каждой из залежей удельная нагрузка на целики рассчитана по соотношению (5.1). Распределение удельных нагрузок на целики по отработанной площади нижней залежи III–14 и верхней залежи III–10 в изолиниях нагрузок приведена на рис. 5.1, а, б. Как видно из показателей рис. 5.1, а, удельная нагрузка на каждый целик нижней залежи составляет от 10 до 40 МПа, а на большей части шахтного поля она равна 15 ÷ 25 МПа. Наибольшие значения нагрузок на целики имеют место в верхней части блока 1с (см. рис. 3.2) и в южной половине блока 3с, достигая здесь уровня $P = 40$ МПа. Именно на этих участках плотность оставленных целиков минимальна, так как в блоке 1с производилась частичная выемка целиков (вторая стадия очистной выемки руд), а в блоке 3с частично применялась камерно-столбовая система разработки, при которой ленточные целики частично извлекались, а оставлялись целики-столбы.

Средняя прочность пород в целиках при сжатии составляет $\sigma_c = 200$ МПа (см. главу 3). Таким образом, запас прочности целиков на отработанной части нижней залежи (по соотношению с прочностью пород на сжатие) составляет:

$$k_3 = \frac{\sigma_c}{P} = \frac{200}{10} \div \frac{200}{40} = 20 \div 5, \quad (5.2)$$

где k_3 — коэффициент запаса прочности; σ_c — прочность пород при сжатии, МПа; P — удельная нагрузка на целики, МПа.

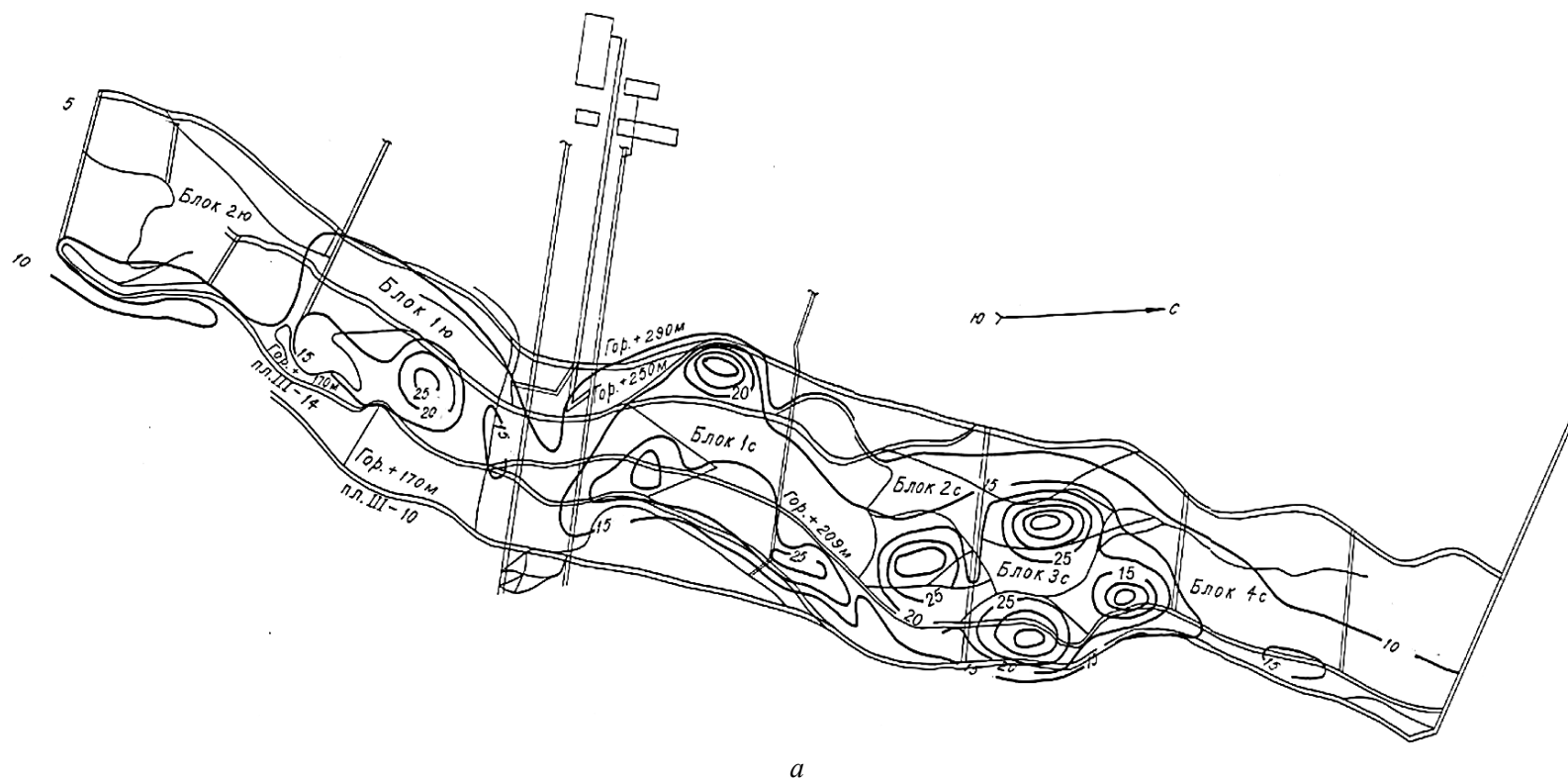


Рис. 5.1. Распределение нагрузок на опорные целики (начало) на отработанной площади залежи Ш-14 (а)

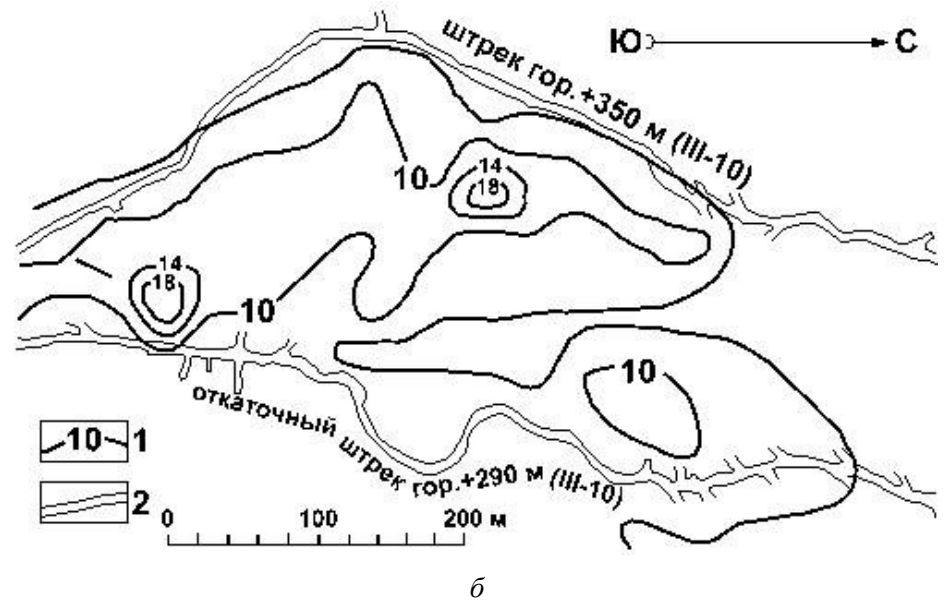


Рис. 5.1. Распределение нагрузок на опорные целики (окончание) на отработанной площади залежи III-10 (б):
 1 — изолинии нагруженности целиков, МПа; 2 — контуры основных горных выработок

Как видно из соотношения (5.2) и рис. 5.1, а, вертикальные нагрузки на целики на нижней отрабатываемой залежи составляют от 10 до 20 % их прочности, то есть совсем невелики. Именно поэтому, как показывают результаты визуального обследования, проведенные после ГТУ 17.08.1999 г., целики практически не были разрушены.

Распределение нагрузок на целики верхней отрабатываемой залежи III–10 в изолиниях нагрузок по отработанной площади залежи приведено на рис. 5.1, б, из которого видно, что удельные нагрузки на целики этой залежи еще меньше, чем на нижней, и составляют от 10 до 20 МПа, что вполне объяснимо, так как мощность толщи покрывающих пород до поверхности не превышает здесь 100–200 м. При прочности пород в целиках на сжатие $\sigma_c \cong 200$ МПа, нагрузки на целики не превышают 10 % от их несущей способности. Таким образом, приведенные результаты расчетов показывают, что прочность поддерживающих опорных целиков на нижней залежи III–14 и на верхней залежи III–10 вполне достаточна, чтобы поддерживать вес толщи налегающих пород. Целики на верхней залежи нагружены на 10 % от их несущей способности, а на нижней — не более 20 %. Прочность поддерживающих целиков достаточна, чрезмерные напряжения в целиках от гравитационных сил веса толщ покрывающих пород ни в коей мере не должны служить причиной ГТУ, происшедшего 17.08.1999 г.

Причиной ГТУ на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г. [2, 19, 26 и др.] послужила концентрация гравитационно-тектонических напряжений в зоне совместной отработки двух сближенных рудных залежей III–10 и III–14, при которой величина напряжений вокруг выработок в массиве превзошла прочность пород. При проектировании рудника в 1970–1980-х гг. возможность возникновения подобной ситуации не предусматривалась, поскольку единственной силой, вызывающей горное давление в подземных выработках, считался вес толщ налегающих над ними пород. В частности, в работах [42, 43] обосновано, что вышележащие залежи, расположенные над отработанной пологопадающей залежью, безопасны по возможности проявления горных ударов в их выработках, поскольку находятся в защищенной зоне по условиям проявления горного давления. Эта точка зрения превалировала в российской горнотехнической литературе и инструктивных документах вплоть до 1980-х гг. и, к сожалению, остается основной в директивных документах Ростехнадзора Российской Федерации в настоящее время [44].

На схеме рис. 5.2 показано расположение «защищенной зоны» над отработанной частью залежи III–14, построенной по правилам инструкции [44]. Как видно из схемы, вся отработанная часть вышележащей залежи III–10 находится в пределах «защищенной зоны» (при гравитационном напряженном состоянии массива). Следовательно, если исходить из традиционных гравитационных представлений о естественном напряженном состоянии массива, никаких горных и горно-тектонических ударов в массиве рудника «Умбозеро» при отработке двух залежей не должно было происходить. Тот же вывод следует из условий напряженного состояния и прочности целиков при нагружении их гравитационными силами веса толщи покрывающих пород, как это вытекает из приведенных выше расчетов. Однако тот факт, что ГТУ 17.08.1999 г. произошел и вызвал огромные разрушения в подземных выработках и массиве, является свидетельством неправомерности самого принципа и методики построения «защищенных зон», приведенных в инструкции [44], в условиях действия в массивах тектонических сил.

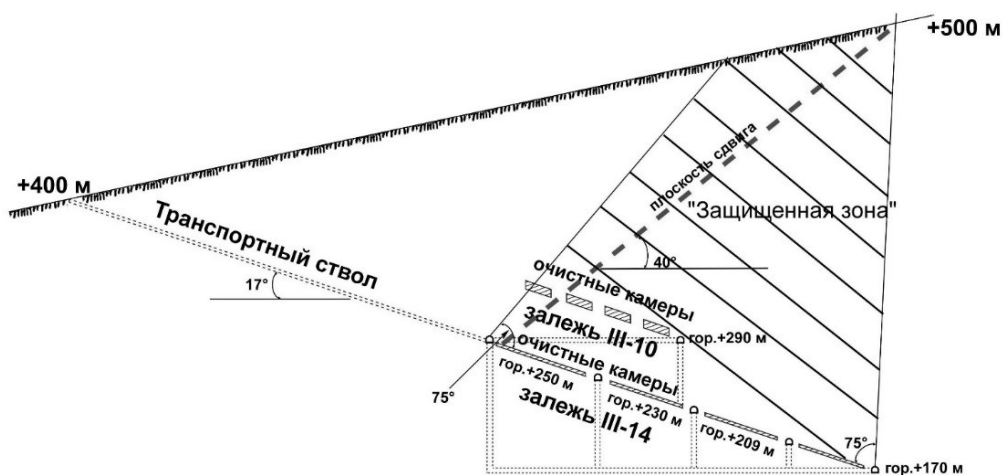


Рис. 5.2. Образование трещины в «защищенной зоне» на руднике «Умбозеро»

В дальнейшем представления о природе и источниках проявлений горного давления на рудниках кардинально изменились. В первой отечественной публикации на эту тему [31] показано, что главным источником горного давления в скальных породах рудников являются горизонтальные тектонические силы, существующие вследствие современных горообразовательных процессов в земной коре. В мировой геологической и горнотехнической литературе эта точка зрения обоснована в работе [45] и многих других. Указанные идейные взгляды о напряжениях в горных массивах коренным образом изменили представления о распределении напряжений в одиночных выработках рудников и при разработке нескольких рудных залежей. Одной из первых работ, в которой рассматривалось напряженное состояние пород вокруг очистных выработок рудника «Умбозеро» в условиях действия в массиве больших горизонтальных тектонических напряжений, является работа [46], выполненная Горным институтом КНЦ РАН совместно с Институтом физики Земли РАН (ИФЗ РАН). В ней рассмотрена отработка двух верхних панелей на залежи III–14 рудника «Умбозеро» шириной по 75 м каждая и высотой 3 м с целиком шириной 20 м между ними. Задача решалась методами численного моделирования (методом конечных элементов) в плоской (двухмерной) постановке. Моделировался плоский вертикальный поперечный разрез рудника в центре блока 1с при отработке двух верхних панелей. Схема постановки задачи приведена на рис. 5.3. Геометрические элементы целиком и выработок принимались близкими к фактическим, применяемым на руднике «Умбозеро». Свойства пород, задаваемые в условиях задачи: плотность пород $\gamma = 2,7 \text{ т / м}^3$; модуль упругости $E = 6 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Вертикальная нагрузка в задаче — вес толщи пород до поверхности; горизонтальная — тектонические напряжения величиной $T = 0, 20, 40, 60 \text{ МПа}$, действующие в массиве.

На рисунке 5.4, *a–г* приведено распределение горизонтальных σ_x и вертикальных σ_y напряжений вблизи контура кровли очистных панелей при действии в массиве гравитационных ($T = 0$; *a, б*) и горизонтальных тектонических ($T = 60 \text{ МПа}$; *в, г*) напряжений.

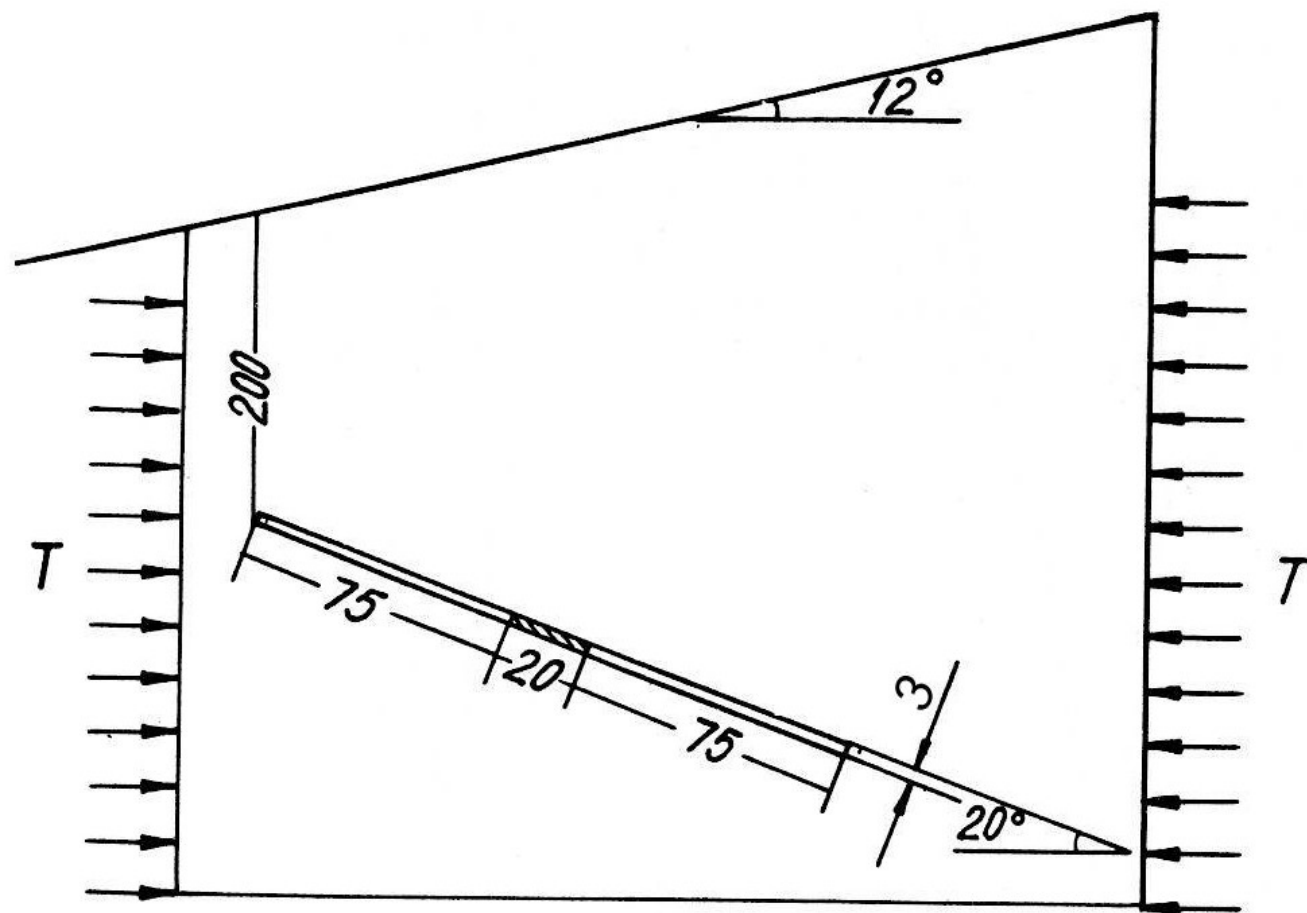


Рис. 5.3. Схема постановки задачи о распределении напряжений в кровле очистных выработок

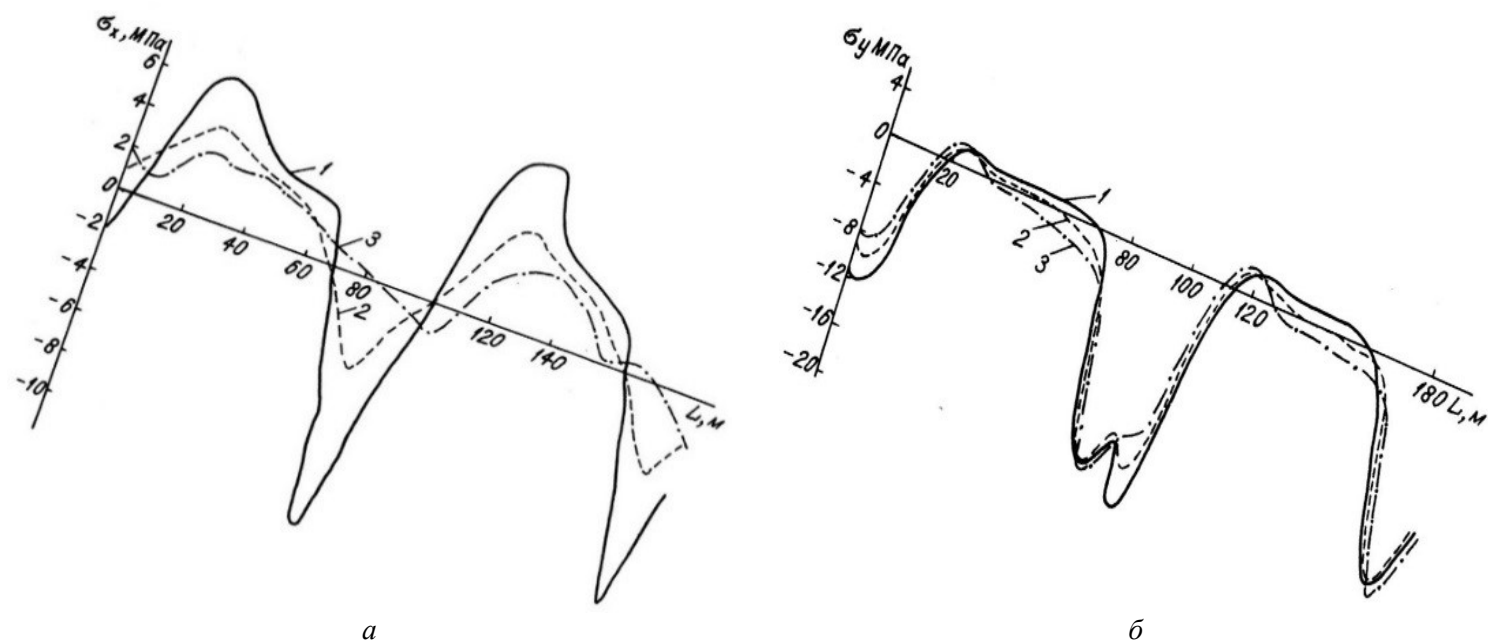


Рис. 5.4. Распределение горизонтальных σ_x и вертикальных σ_y напряжений в кровле очистных панелей при гравитационном ($T = 0$; а, б) состоянии массивам (начало)

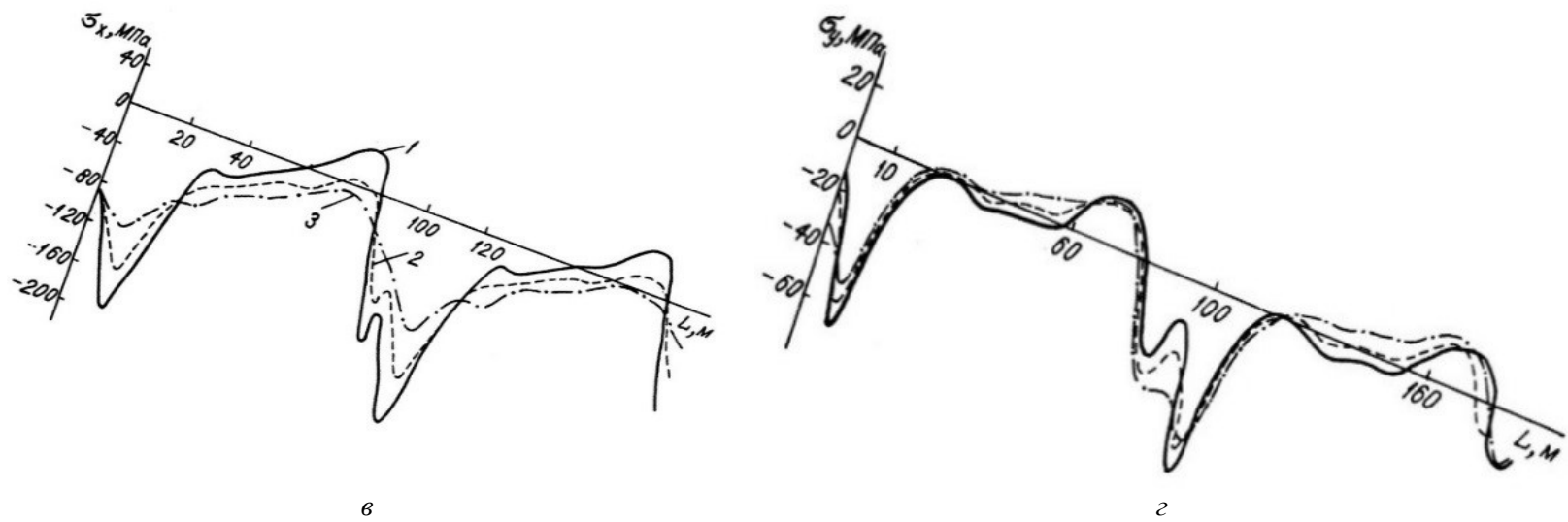


Рис. 5.4. Распределение горизонтальных σ_x и вертикальных σ_y напряжений в кровле и при гравитационно-тектоническом ($T = 60$ МПа; б, з) состоянии массива (окончание)

Из показаний графиков рис. 5.4 видно, что распределение напряжений вблизи контура кровли щелеобразных пологопадающих очистных выработок при отсутствии в массиве тектонических сил (рис. 5.4, а, б) и их действии в массиве (рис. 5.4, в, г) принципиально отличается. При отсутствии тектонических сил ($T = 0$) вся кровля очистных выработок охвачена растягивающими напряжениями (рис. 5.4, а), максимальная величина которых достигает $\sigma_x = (6-10)$ МПа. При действии в массиве горизонтальных тектонических напряжений $T = 60$ МПа, в кровле очистных выработок наблюдается резко неравномерное распределение горизонтальных напряжений σ_x по протяженности пролета кровли. Растягивающие напряжения σ_x при этом наблюдаются только на небольшом отрезке протяженности пролета кровли (величина отрезка не более 0,3 величины пролета), прилегающем к нижнему целику или массиву. Максимальная величина растягивающих напряжений достигает $0,7 T$ (до 40 МПа) при $T = 60$ МПа, в других участках пролета она меньше и достигает значений $\sigma_x = 0$ в средней части пролета. Далее, на всем протяжении пролета кровли, примыкающему к целику или массиву, горизонтальные напряжения σ_x становятся сжимающими (рис. 5.4, в). Вблизи нижнего контура кровли выработок, прилегающего к целику или массиву, отмечаются растягивающие напряжения величиной до $0,7 T$ (до 40 МПа). Величина зоны растягивающих напряжений невелика и составляет до 0,1 протяженности пролета кровли очистной выработки. Вблизи верхнего сопряжения очистной выработки с массивом или целиком при действии тектонических сил ($T = 60$ МПа) отмечается концентрация горизонтальных напряжений сжатия величиной до $3,0-3,5 T$ (до 200 МПа). Вертикальные напряжения σ_y при этом имеют вблизи контура кровли выработок меньшую величину (не более $1,1 T$) (рис. 5.4, г). Таким образом установлено, что действие больших горизонтальных тектонических напряжений в массиве приводит к резко неравномерному распределению напряжений на контуре очистных выработок: в верхнем сопряжении кровли с массивом или целиком наблюдается концентрация напряжений сжатия, что связано с опасностью проявления горных ударов в этом сопряжении; в нижнем сопряжении кровли с массивом или целиком наблюдаются большие по величине (до $0,7 T$, то есть до 40 МПа) растягивающие напряжения, что связано с опасностью вывалов и отслоений пород в этом сопряжении, так как горные породы слабо сопротивляются напряжениям растяжения.

Из рассмотренного распределения напряжений выявляются тенденции развития наиболее опасных с точки зрения устойчивости кровли растягивающих напряжений при наличии в массиве горизонтальных тектонических напряжений. Как показывает анализ графиков рис. 5.4, в, величина растягивающих напряжений быстро снижается по мере удаления от контура кровли выработки. В частности, на рис. 5.5 показан график изменения величины горизонтальных растягивающих напряжений вблизи контура очистной выработки, на участке около нижнего ее сопряжения с целиком (массивом), по мере удаления от контура.

Растягивающие напряжения на контуре достигают величины $0,7-0,8 T$, однако уже на расстоянии 6 м от контура они переходят в сжимающие. Таким образом, отличительной особенностью распределения горизонтальных напряжений в кровле очистных выработок при действии боковых тектонических сил являются более локальное распространение в кровле зоны растягивающих напряжений и относительно небольшая мощность этой зоны. Как показывают расчеты (см. рис. 5.4), протяженность зоны растягивающих напряжений

составляет по длине около трети пролета выработки, а по глубине зоны распространения — около десятой части пролета кровли. Общая тенденция развития растягивающих напряжений вблизи контура очистной выработки при действии боковых горизонтальных тектонических сил заключается в том, что с увеличением пролета выработок по рассмотренной геометрической схеме задачи растут величина растягивающих напряжений на контуре, а также протяженность и мощность зоны растяжения пород. Соответственно, при уменьшении пролета относительная величина растягивающих напряжений на контуре и глубина зоны растяжения пород снижаются.

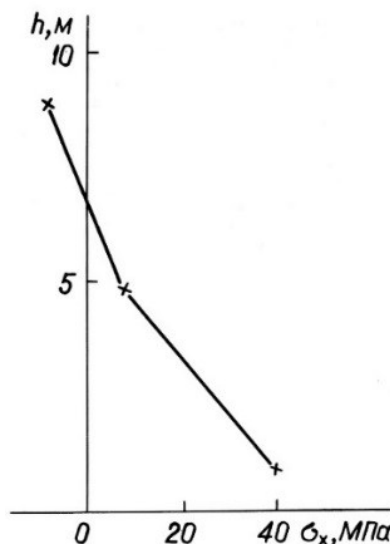


Рис. 5.5. График изменения величины горизонтальных напряжений по мере удаления от контура выработки вглубь массива ($T = 60$ МПа)

Для обеспечения безопасных условий работы от отслоений и вывалов в очистных блоках в работе [46] рекомендуется снижать пролет кровли очистных выработок в перпендикулярном направлении (в направлении простирания залежей) до 15–20 м и применять штанговую крепь для крепления кровли с длиной штанг 2,0–2,5 м, что перекрывает величину зоны возможных вывалов и обеспечивает безопасность работ от вывалов. Опытно-промышленные испытания указанных мер безопасности показали их эффективность [46].

Наличие сжимающих напряжений вблизи контура кровли пологопадающих щелеобразных выработок при действии в массиве горизонтальных тектонических сил подтверждено натурными измерениями на руднике. На рис. 5.6 приведены результаты измерений напряжений, выполненных методом разгрузки, по контуру кровли щелеобразной выработки на руднике «Карнасурт», соседнем с рудником «Умбозеро» (расстояние 10 км).

Условия измерений: кровля щелеобразной выработки с пролетом (шириной) $\ell = 60$ м, высота выработки $h = 1$ м; величина тектонических напряжений в массиве $T = 40$ МПа; глубина расположения выработки от поверхности $H = 260$ м. То есть условия измерений полностью аналогичны горнотехническим условиям рудника «Умбозеро». Измерения в кровле, результаты которых приведены на рис. 5.6, выполнялись в неглубоких скважинах непосредственно на контуре кровли выработки по одной линии с интервалом 1 м друг от друга. Как показывают графики

распределения максимальных сжимающих напряжений по контуру кровли, это распределение полностью соответствует распределению горизонтальных напряжений на контуре, полученному в результатах моделирования (рис. 5.4, в), как по характеру, так и по величине напряжений. Вблизи верхнего сопряжения кровли выработки с целиком отмечается концентрация сжимающих напряжений, их величина достигает здесь (80–115) МПа, то есть (2,0–2,5) T . Таким образом, результатами натурных измерений подтверждена правомерность выводов, полученных в работе [46].

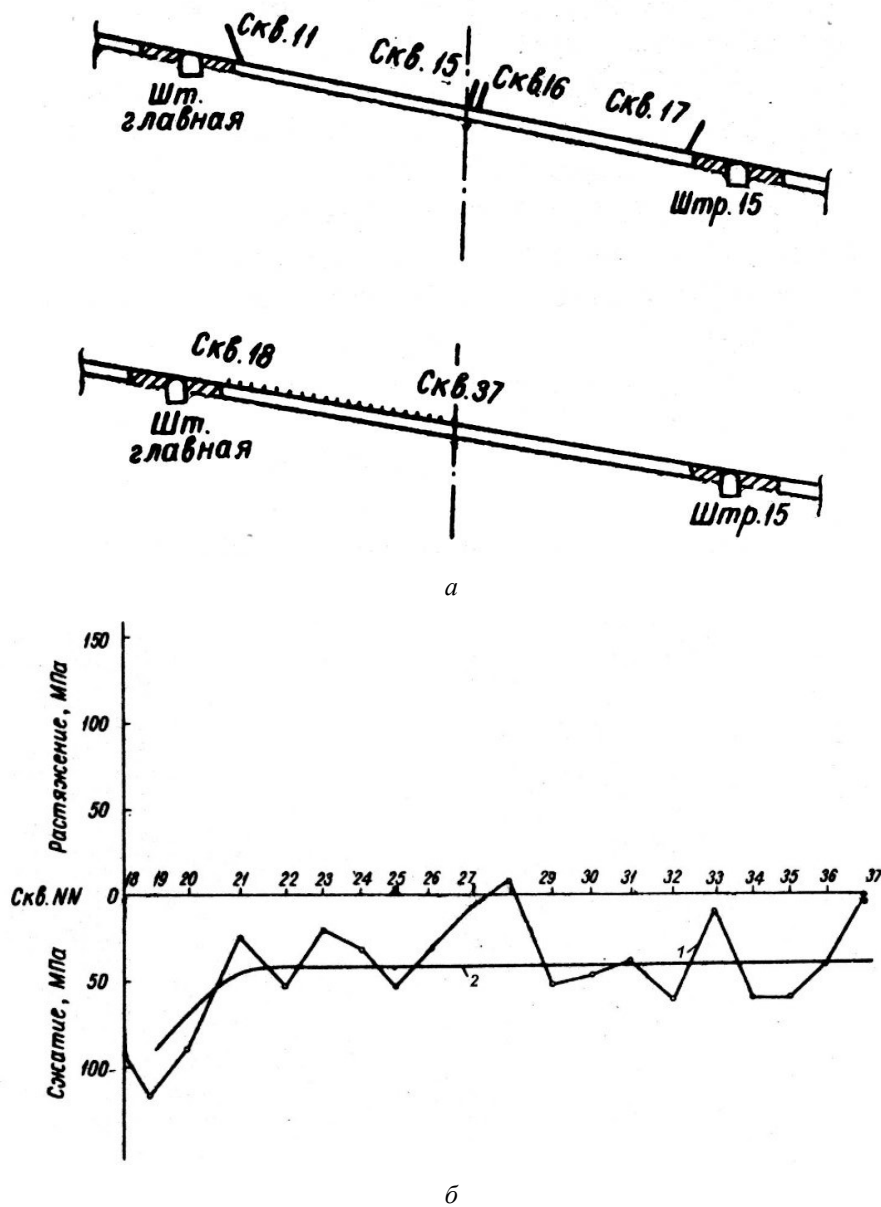


Рис. 5.6. Распределение максимальных (по величине) измеренных напряжений по контуру кровли щелеобразных выработок:
а — схемы проведения измерений; *б* — результаты измерений: *1* — фактические результаты измерений, *2* — усредненная кривая полученных результатов

В условиях действия в массивах рудных месторождений больших горизонтальных тектонических напряжений при отработке нескольких залежей выемка нижней из них не только является «защитной» по отношению к вышележащим залежам, но и усиливает опасность горных и горно-тектонических ударов при их выемке, что показано в работе [47] и др. Поэтому была поставлена и решена методами численного моделирования задача о распределении упругих напряжений в массиве рудника «Умбозеро» при выемке двух сближенных залежей в условиях действия в массиве больших сжимающих горизонтальных тектонических напряжений. Геометрическая схема и граничные условия задачи представлены на рис. 5.7. Моделировался вертикальный поперечный разрез шахтного поля рудника «Умбозеро» в центральной части блока 1с, при этом геометрические показатели отработки (наклон залежей и дневной поверхности, размеры очистных выработок и целиков, расстояние между залежами) принимались максимально близкими к фактическим. Обе залежи в модели принимались пластообразными и наклоненными к горизонту под углом 17° ; расстояние между залежами по вертикали — 50 м; мощность (выемочная) нижней залежи — 2,5 м, верхней — 5,5 м. Ширина очистных панелей между гор.+ 290, + 250, + 230, + 209, + 170 м на нижней залежи принималась одинаковой — 90 м; ширина над- и подштрековых целиков по горизонтали — по 10 м; высота очистных камер и целиков — 2,5 м.

На верхней залежи, ширина камер в которой фактически была равной 20 м, а длина 60–150 м, было принято: ширина камер 25 м, ширина целиков 15 м, высота камер и целиков 5,5 м. Ширина камер и целиков между ними приняты одинаковыми. Камеры на нижней и верхней залежах принимались пустыми (незаполненными). Свойства руд и вмещающих пород в целиках и вокруг камер принимались изотропными и одинаковыми со следующими численными характеристиками: плотность пород $\gamma = 2,7 \text{ т / м}^3$; модуль упругости $E = 5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$; $\sigma_c = 200 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 10 \text{ МПа}$. В качестве граничных условий принималось, что в вертикальном направлении действует вес пород, а в горизонтальном — равномерно распределенные тектонические напряжения величиной $T = -50 \text{ МПа}$.

Сначала моделировалась поэтапная отработка нижней залежи III–14, что соответствовало фактическому развитию очистных работ на руднике. На рис. 5.8 показано распределение главных напряжений при выемке первой (самой верхней) очистной панели на залежи III–14. Как видно из рис. 5.8, распределение напряжений вокруг очистной выработки отличается резкой неравномерностью: в верхнем сопряжении выработки с массивом отмечается концентрация напряжений сжатия до $0,5 T$; в нижнем сопряжении кровли выработки с массивом отмечаются растягивающие напряжения до $0,3 T$. Протяженность зоны растягивающих напряжений невелика и приурочена к углу сопряжения кровли с массивом. То есть отмечаются те же закономерности распределения напряжений в кровле щелеобразной выработки, которые установлены в работе [46].

На рисунке 5.9 показано распределение главных напряжений σ_1 при выемке четырех очистных панелей на нижней залежи, разделенных 20-метровыми целиками. Как видно из рис. 5.9, вокруг каждой из очистных выработок сохраняются закономерности распределения напряжений, которые были свойственны распределению напряжений вокруг одиночной очистной выработки.

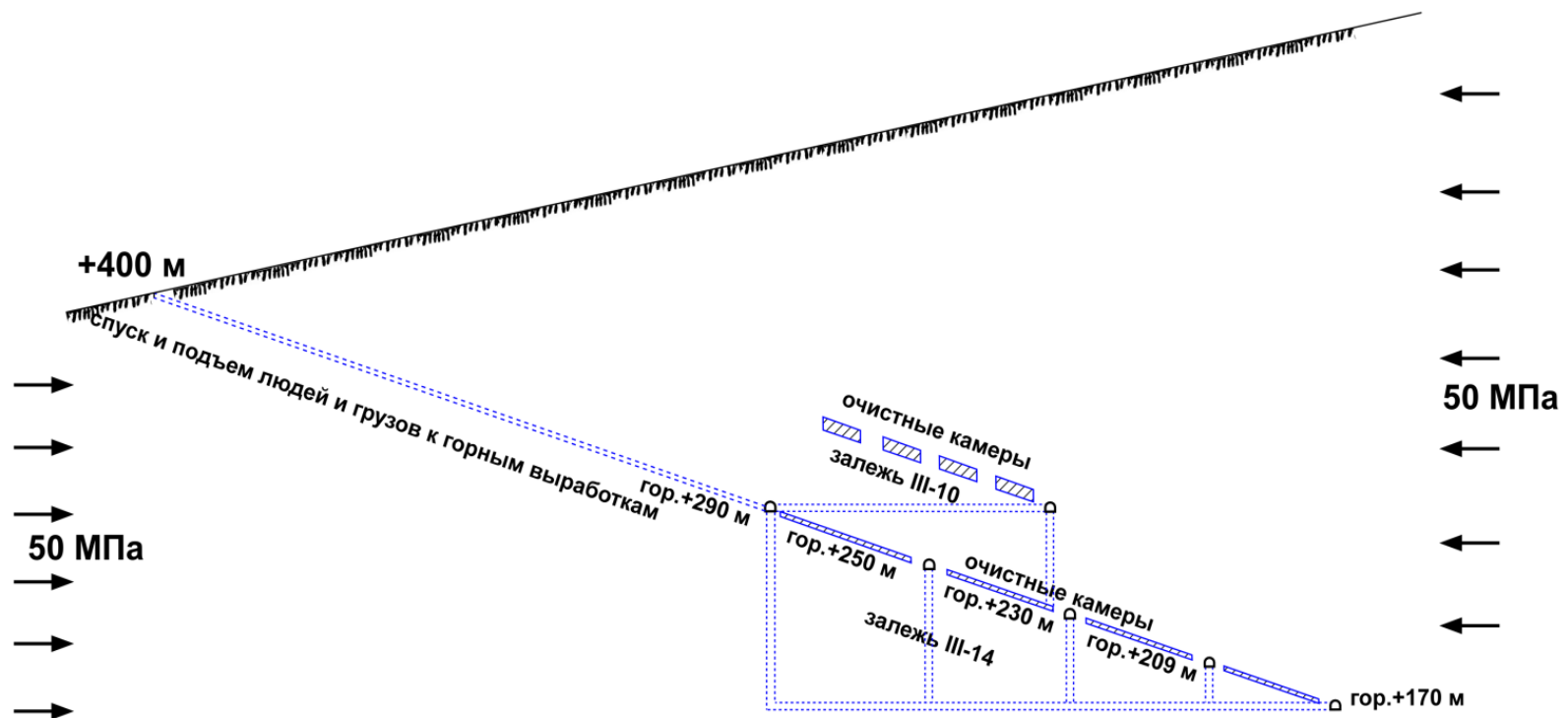


Рис. 5.7. Схема постановки задачи о распределении напряжений в массиве при выемке сближенных залежей

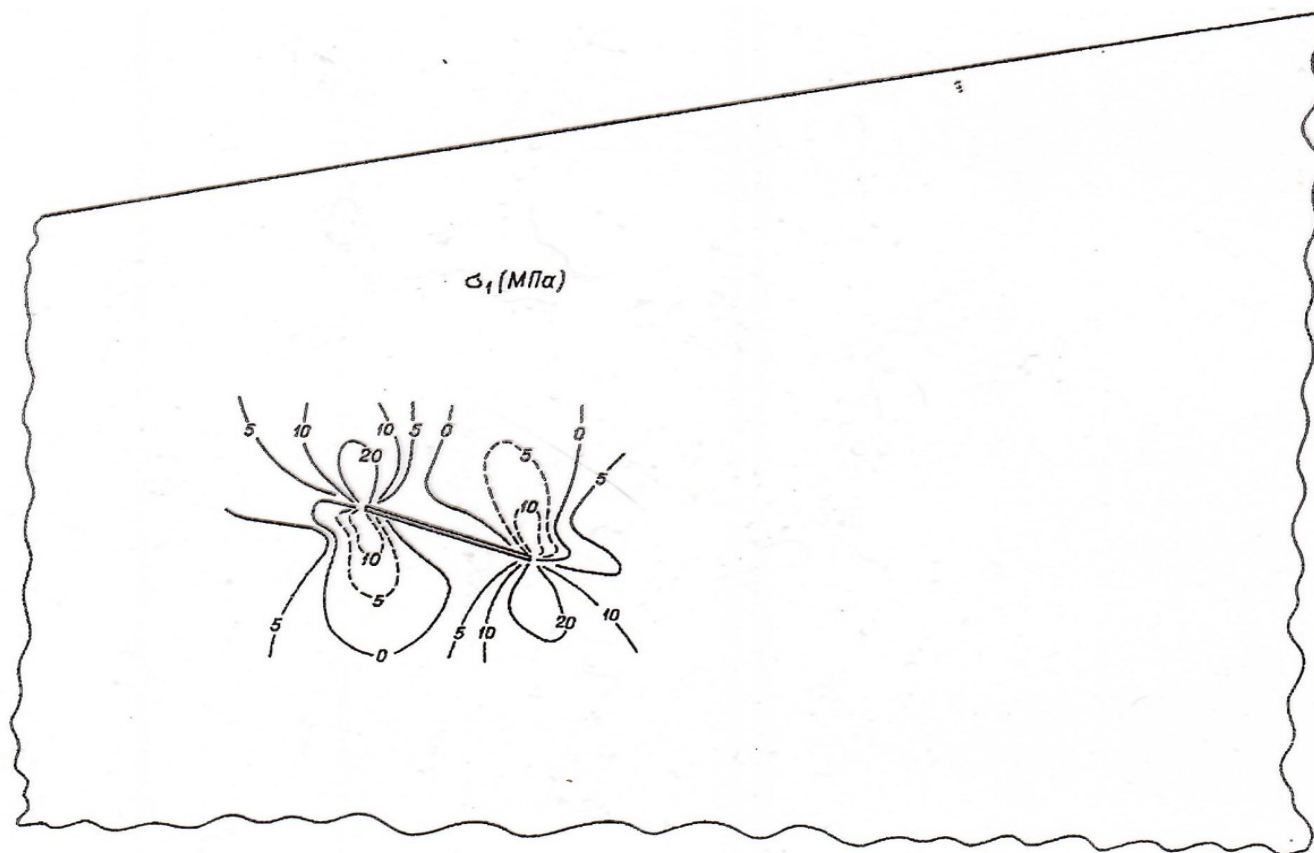


Рис. 5.8. Распределение главных напряжений σ_1 на первом этапе отработки нижней залежи III-14

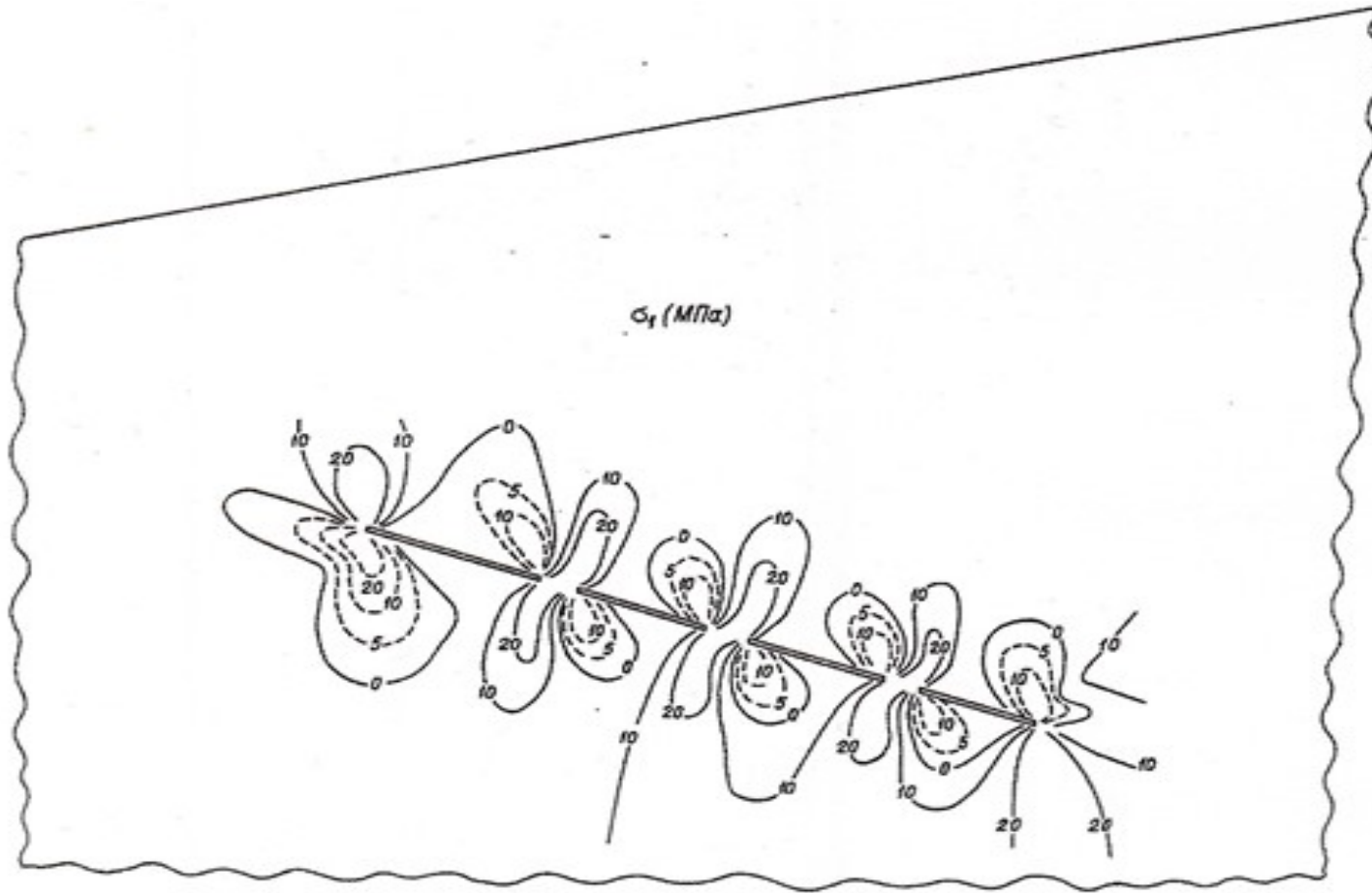


Рис. 5.9. Распределение главных напряжений σ_1 при отработке четырех камер нижней залежи III-10

Поскольку, как выяснилось в процессе эксплуатации рудника и показано выше, сейсмичность массива резко возросла по мере выемки верхней залежи III–10 над выработанным пространством нижней залежи III–14, промоделировано изменение напряженного состояния массива по мере возрастания объемов выемки руд на верхней залежи. На рис. 5.10, *а* показано распределение напряжений σ_1 вокруг выработок обеих залежей после выемки первой из очистных панелей на верхней залежи, из которого видно, что резко возросла зона действия растягивающих напряжений в кровле выработок нижней залежи, охватывающей все пространство междупластья. При увеличении количества выработок в верхней залежи до двух (рис. 5.10, *б*) зона растягивающих напряжений не только охватывает междупластье залежей, но и начинает распространяться над верхней залежью в сторону дневной поверхности. При выемке трех (рис. 5.11, *а*) и четырех (рис. 5.11, *б*) очистных панелей на верхней залежи зона растягивающих напряжений возрастает по величине и выходит на дневную поверхность, а значение растягивающих напряжений вблизи контура кровли очистных выработок и в междупластье достигает величины 20 МПа и более, что значительно превосходит прочность пород на растяжение. В результате по направлению действия максимальных напряжений растяжения σ_1 происходит разрыв пород от междупластья залежей до дневной поверхности (рис. 5.12), что и наблюдалось фактически. В массиве образовалась трещина разрыва (рис. 5.12), сопровождающаяся ГТУ в массиве, которая была фактически зафиксирована в выработках, о чем сказано выше.

С. Н. Савченко рассчитано изменение удельной энергии упругого деформирования массива между верхней и нижней залежами в слое толщиной 1 м на протяжении всего периода эксплуатации рудника [29].

На первых этапах отработки месторождения (до 1990 г.), когда горные работы выполнялись на нижней залежи, изменение удельной энергии упругого деформирования в рассматриваемом объеме междупластья было незначительным. Это продолжалось до начала 1990 г. На рис. 5.13 показаны объемы выемки горной массы по годам начиная с 1990 г. на верхней и нижней залежах. Видно, что в первые три года (1990–1993 гг.) добыча руды на верхней залежи велась достаточно интенсивно, а с 1994 г. практически прекратилась. В 1997–1999 гг. добыча возобновилась. Изменение удельной энергии упругого деформирования по результатам численного моделирования на рис. 5.14 показано пунктирной кривой.

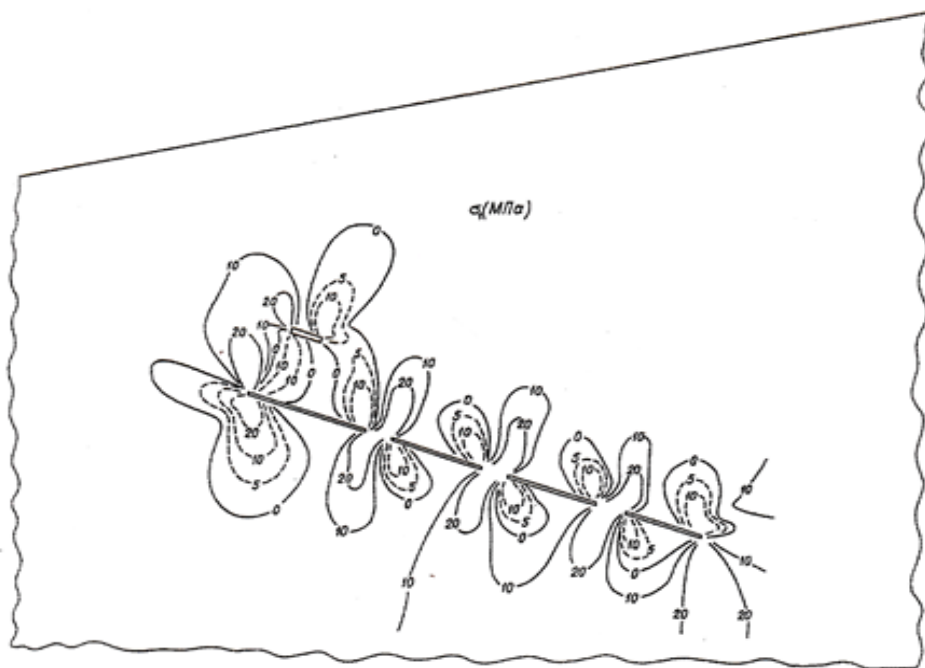
Если в качестве единицы времени взять два года, то ее изменение в период с 1984 по 1992 гг. можно представить зависимостью:

$$w_1 = 0,026[1 + (0,0275t^2 - 0,1465t + 0,215)sh t], \quad (5.3)$$

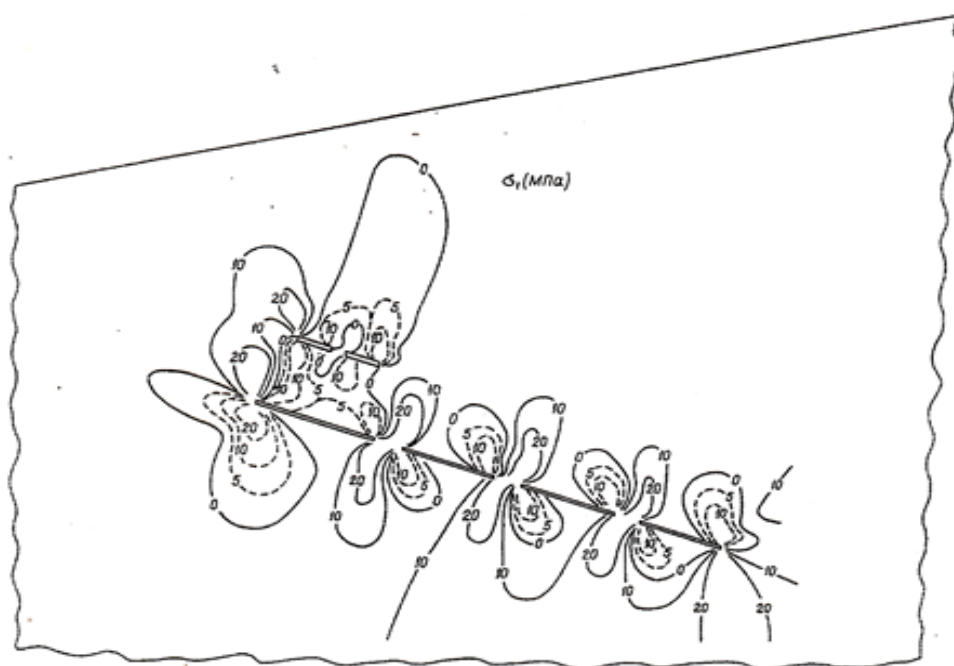
где w_1 — удельная энергия упругого деформирования массива, Дж / м³; t — время, год. На рис. 5.14 эта зависимость показана сплошной кривой.

В силу того что к началу 1992 г. упругая энергия за время отработки верхней залежи изменилась резко и значительно, а в последующем отработка велась медленно, этот момент времени можно считать началом нового отсчета изменения энергии. Оставляя по-прежнему в качестве единицы времени два года, дальнейшее изменение удельной энергии упругого деформирования можно аппроксимировать зависимостью:

$$w_2 = 0,075[1 + (0,0046t^2 - 0,0339t + 0,0787)sh t]. \quad (5.4)$$

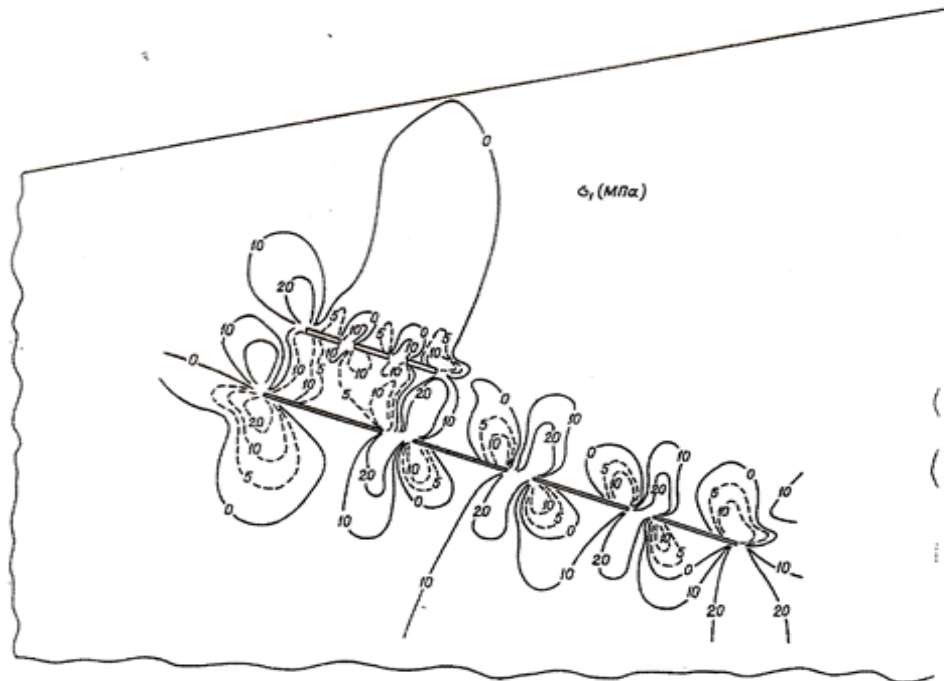


a

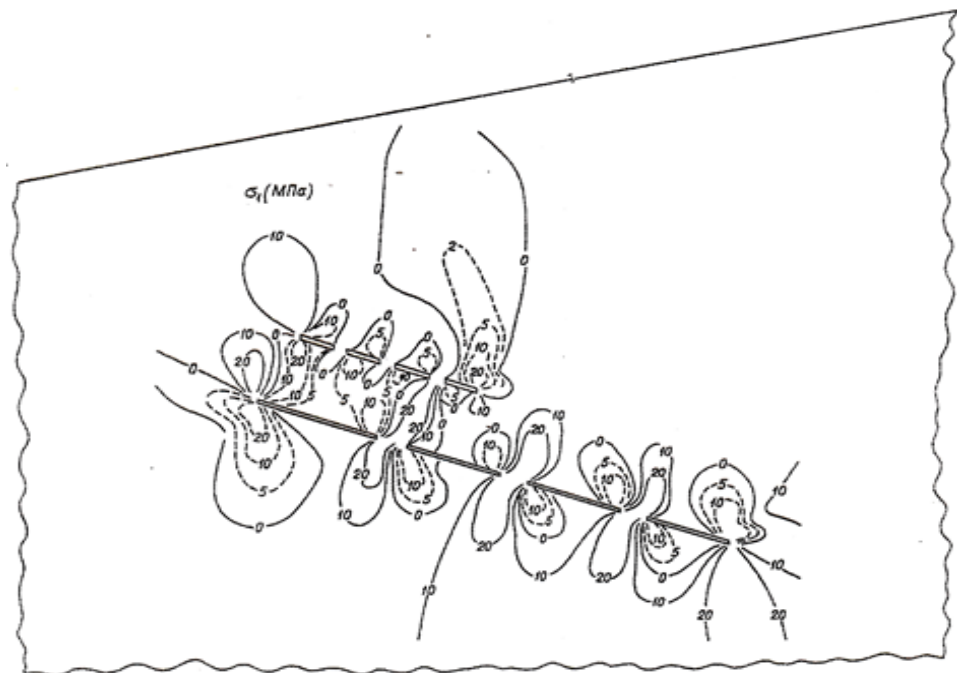


б

Рис. 5.10. Распределение главных напряжений σ_1 на различных этапах разработки верхней залежи III-10 и нижней залежи III-14:
a — первый этап, одна камера; *б* — второй этап, две камеры



a



b

Рис. 5.11. Распределение главных напряжений σ_1 на различных этапах разработки верхней залежи III-10 и нижней залежи III-14:
a — третий этап, три камеры; *b* — четвертый этап, перед ТЗ

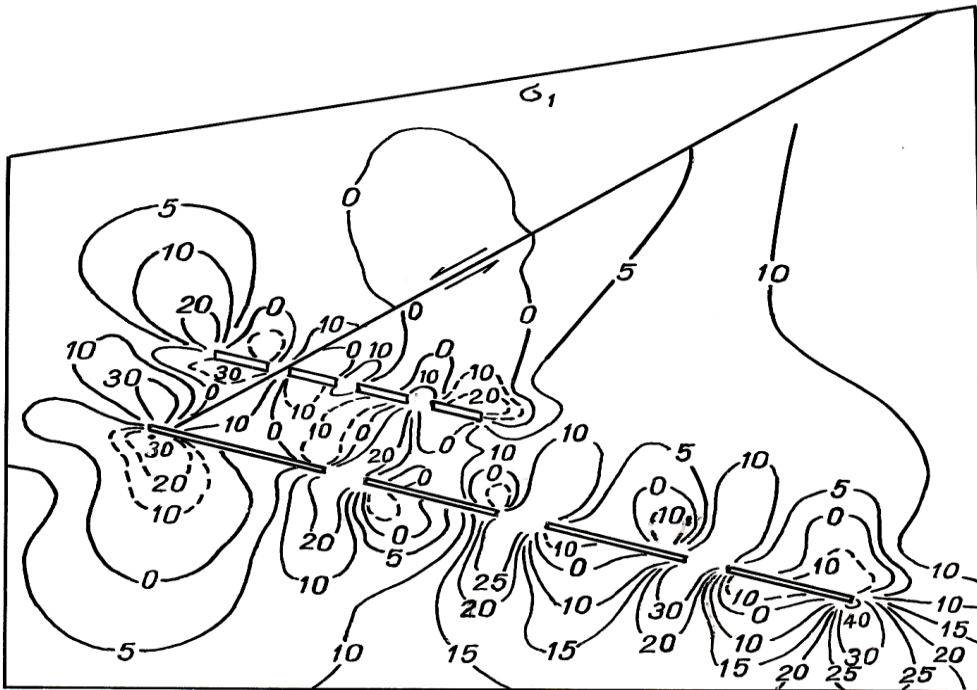


Рис. 5.12. Распределение напряжений σ_1 вокруг двух сближенных залежей после образования трещины разрыва

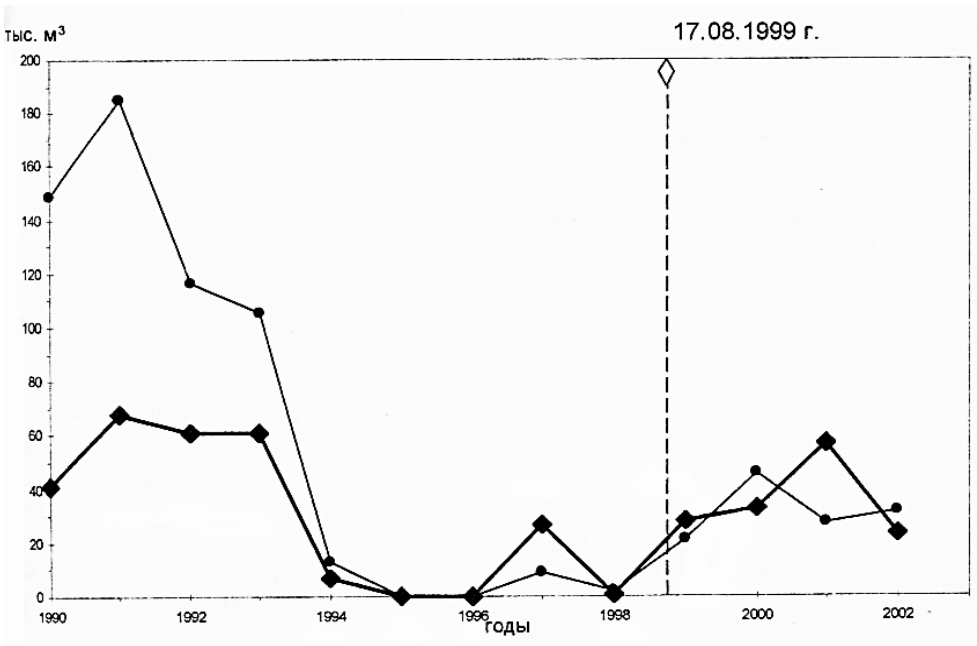


Рис. 5.13. Объем выемки руды по верхней и нижней залежам в период 1990–2002 гг.:
 —◆— верхняя залежь; —●— нижняя залежь; ТЗ 17.08.1999 г.

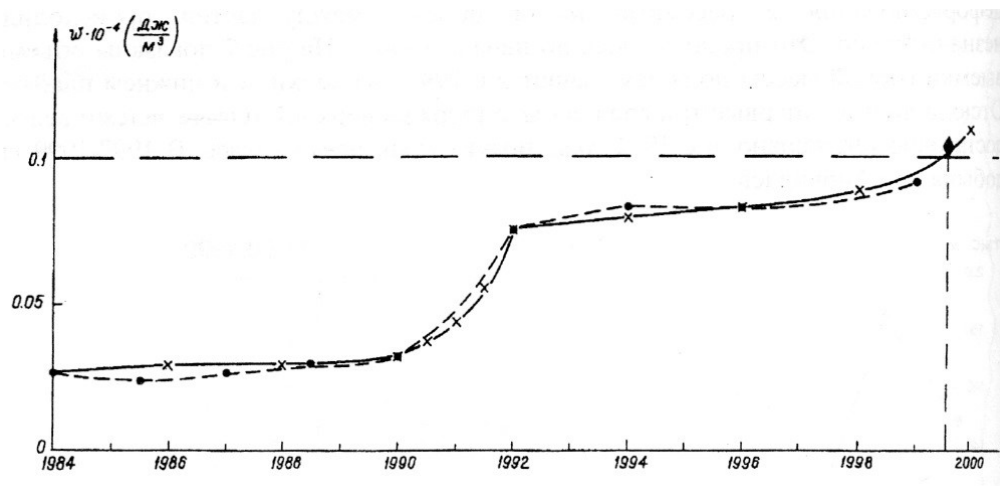


Рис. 5.14. Изменение удельной энергии упругого деформирования в междупластье по мере отработки месторождения

Из рисунка 5.14 видно, что расчетные значения удельной энергии упругого деформирования и их аппроксимация с приведенными зависимостями совпадают удовлетворительно. ГТУ 17.08.1999 г. произошел в тот момент, когда величина удельной энергии упругого деформирования достигла порогового значения при разрушении вследствие действия растягивающих напряжений. Кроме того, из данных на рис. 5.14 можно сделать заключение, что если бы темпы добычи руды в 1993–1994 гг. оставались такими же, как в начале отработки верхней залежи (1990–1993 гг.), то это событие могло бы произойти в 1993 или 1994 гг.

Таким образом, численным моделированием отработки двух сближенных пологопадающих залежей на руднике «Умбозеро» камерно-целиковой системой разработки с незаполненными (пустыми) камерами шириной около 100 м, разделяемыми целиками шириной 10–20 м, в условиях действия в массиве горизонтальных тектонических напряжений величиной $T = 50$ МПа было установлено, что в зоне сближенной отработки камер на двух залежах возникла концентрация растягивающих и сжимающих напряжений вокруг выработок, в результате которой величина напряжений в массиве превзошла предел прочности пород. В зоне концентрации напряжений в междупластье залежей величина растягивающих напряжений превзошла предел прочности пород на растяжение, в результате чего в массиве проросла трещина разрыва от междупластья до дневной поверхности с эффектом ГТУ.

Численным моделированием определено местоположение трещины — от верхней границы отработки по нижней залежи III–14, через нижнюю границу отработки по верхней залежи III–10 до дневной поверхности, которая проходит точно по линии расположения максимальной концентрации растягивающих напряжений в массиве под углом 40° к горизонту. Именно по такой линии зафиксировано расположение трещины разрыва в натуре на руднике «Умбозеро», что является несомненным свидетельством правомерности постановки задачи численного моделирования. Возникновение трещины в массиве одновременно с эффектом ГТУ говорит о неправомерности методических положений инструкции [44] о защитных залежах при сближенной отработке залежей на рудных месторождениях.

Далее об ошибочных положениях и методике построения «защищенных зон», приведенных в инструкции [44], будет сказано более подробно. ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» показал, к каким разрушительным последствиям может привести неучет тектонических напряжений при проектировании и эксплуатации свиты пологопадающих рудных залежей в высоко тектонически напряженных массивах. Указанный ГТУ явился первым на рудниках России геодинамическим событием такого рода в горнорудной практике. Анализ материалов об изменении напряженного состояния массива при отработке залежей позволил понять его причину.

Итак, расчетами и численным моделированием горнотехнических условий эксплуатации рудника «Умбозеро» установлено, что ГТУ на руднике 17.08.1999 г. не мог быть вызван гравитационными силами веса толщи подработанных покрывающих пород. Указанное геодинамическое событие в массиве рудника оказалось возможным только вследствие сочетания ряда сопутствующих горнотехнических факторов: отработки двух параллельных пологопадающих залежей в месте их сближенного расположения, наличия крепких и хрупких удароопасных пород, действия в массиве высоких по уровню горизонтальных тектонических напряжений и, наконец, неучета взаимодействия полей напряжений вокруг выработок на обеих залежах при действии в массиве тектонических сил при проектировании и эксплуатации рудника. Более того, исследование причин ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» показало ошибочность и несостоятельность современных инструктивных документов [44] об удароопасности пород на сближенных рудных залежах в условиях действия в массивах тектонических напряжений [47], заключающиеся в том, что они основываются на старых представлениях о гравитационном естественном напряженном состоянии массивов рудных месторождений, развитых, в частности, в работах [42, 43] и др. Анализ причин и последствий события 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» указывает на необходимость менять устаревшее понимание опасности горных ударов на рудных месторождениях.

6. СЕЙСМО-ДЕФОРМАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РУДНИКА «УМБОЗЕРО»

Геомеханические и сейсмодеформационные наблюдения за проявлением горного давления на Ловозерском месторождении по инициативе Горного института КНЦ РАН начались в 1960-х гг. практически сразу, как его ввели в эксплуатацию [48]. До строительства рудника «Умбозеро» эти наблюдения проводились на руднике «Карнасурт» (10 км от рудника «Умбозеро»). Уже тогда (в 1970-х гг.) натурными измерениями было установлено, что в Ловозерском массиве действуют высокие горизонтальные сжимающие тектонические напряжения, превышающие по величине силы веса толщи покрывающих пород на соответствующей глубине от поверхности. В массиве рудника «Карнасурт» на верхних горизонтах обрабатываемых залежей (глубина 400 м от поверхности) методом разгрузки замерены сжимающие горизонтальные тектонические напряжения максимальной величиной $T = 40$ МПа, которые в 5–10 раз превышали максимальные вертикальные напряжения, обусловленные силами веса толщи налегающих пород [48]. Позднее подобные натурные измерения методом разгрузки выполнены в массиве строящегося рудника «Умбозеро», результаты которых опубликованы в работах [24, 32]. Установлено, что в массиве рудника «Умбозеро» величина горизонтальных сжимающих тектонических напряжений выше, чем в массиве рудника «Карнасурт», и составляет $T = 50–60$ МПа (см. табл. 3.4), достигая в отдельных случаях (70–80) МПа, что в 7–10 раз больше, чем максимальные напряжения сжатия от сил веса толщи налегающих пород.

При проектировании рудника «Умбозеро» первоначально намечалась отработка только одной рудной залежи (III–14) мощностью 2,5 м, хотя уже в тот период было известно, что над нею в 50–60 м по вертикали располагается другая более мощная рудная залежь (III–10) толщиной 5,5 м (см. рис. 3.1) и несколько других. Однако, по данным геологоразведки, считалось, что руды залежи III–10 являются некондиционными по содержанию полезных компонентов. Учитывая, что покрывающая толща пород над обрабатываемой залежью III–14, в том числе и залежь III–10, будут удерживаться на опорных целиках, по инициативе Горного института КНЦ РАН предложено контролировать деформации толщи подработанных покрывающих пород в период эксплуатации рудника с помощью специального наблюдательного комплекса. С этой целью запроектирован, сооружен и оборудован над блоком 1с рудника «Умбозеро» контрольно-наблюдательный квершлаг на гор. +290 м с комплексом прецизионных деформометрических и сейсмоакустических наблюдений [49].

Процесс развития деформаций, вызванных ведением очистных работ, в породах Ловозерского массива протекает со скоростью не более $1 \cdot 10^{-6}$ / месяц, как это установлено натурными измерениями в подобных условиях на руднике «Карнасурт» [50]. Смещения в выработках и целиках имеют величину первых миллиметров или их долей в течение длительных периодов времени. Возникающие вблизи выработок упругие деформации быстро затухают. Так как непосредственный доступ в выработанное пространство для проведения там наблюдений в большинстве случаев исключен, возникает необходимость регистрации деформаций на удалении в десятки и сотни метров от очагов их

возникновения. Для уверенной регистрации таких весьма малых перемещений в массиве пород необходимы специальные высокочувствительные методы контроля.

С учетом всех этих факторов для условий рудника «Умбозеро» был выбран комплекс высокоточных деформационных методов контроля состояния подработанных толщ: наклономерный, метод кварцевых деформометров и прецизионных нивелировок. Опыт эксплуатации в течение нескольких лет подобного контрольно-наблюдательного комплекса в условиях рудника «Карнасурт» показал практическую возможность контроля медленных процессов, развивающихся в массиве [50].

Система контрольных наблюдений на руднике «Умбозеро» включала в себя трехкомпонентный деформометрический комплекс КД–III (конструкции ИФЗ РАН), двухкомпонентные наклономерные станции УН–ЗМ (либо наклономеры другого типа), полигоны высокоточного геометрического нивелирования.

Для реализации высокой чувствительности деформометров и наклономеров необходимо было выполнить ряд требований к условиям их размещения. Основными из них являются: изотермия помещений, в которых проводятся наблюдения, возможность обеспечения жесткой связи приборов со скальным массивом, минимальное влияние тепловых деформаций массива, обусловленных сезонными изменениями наружной температуры воздуха. Кроме того, для длиннобазисных деформометрических и нивелирных наблюдений желательнее ориентировать базу деформометра и длинную ось нивелирного полигона в направлении максимальных ожидаемых деформаций массива. Для нивелирных наблюдений желательнее часть реперов располагать в зоне минимального влияния очистных работ.

На рисунке 6.1 показано расположение контрольно-наблюдательного квершлага (КНК) относительно участка массива, изменения напряженно-деформированного состояния которого контролировались в процессе отработки залежи III–14. Квершлаг представляет собой горизонтальную тупиковую выработку сечением $3 \times 3,5$ м, пройденную из вентиляционного штрека гор.+ 290 м висячем боку рудного пласта III–14, расположен над блоком 1с шахтного поля рудника и ориентирован длинной осью в направлении падения пласта. Глубина квершлага от поверхности составляет 200–250 м, протяженность 195 м. Из квершлага перпендикулярно его оси в противоположных направлениях пройдены две горизонтальные рассечки (Р–1 и Р–2) длиной 25 м и вертикальный восстающий (В) высотой 5 м (рис. 6.2).

Для изоляции квершлага от температурных изменений шахтной атмосферы по всей его длине возведены перемычки, одинарные и двойные (с тамбуром). В тупиковой части квершлага, камерах и вертикальном восстающем сооружены постаменты из бетона для установки приборов. Для более жесткой связи постаментов с массивом место их закладки очищалось от обломков пород и заколов до сплошного массива.

Деформографический комплекс КД–III конструкции ИФЗ РАН, установленный в КНК, включал в себя три штанговых деформометра — два горизонтальных и один вертикальный. Горизонтальные деформометры установлены в тупиковой части квершлага и в рассечке Р–2, вертикальный — в восстающем. Длина базы деформометров составляет соответственно 16 (СЮ), 14 (ЗВ) и 5 (вертикальный) м и определяется длиной эталона — кварцевого стержня, один конец которого закреплен в бетонном постаменте, а к другому, свободному, подсоединен преобразователь малых

механических перемещений — дифференциальный емкостной преобразователь аналогового типа. Сам преобразователь устанавливается на другом бетонном постаменте, удаленном от первого на величину эталона длины. В вертикальном восстающем один конец эталона длины жестко закреплялся (бетонировался) в скважине, пробуренной в забое восстающего, а другой конец с датчиком выведен к постаменту, размещенному на почве квершлага. Для более полной термо- и влагоизоляции эталоны длины и датчики перемещений деформометров защищены специальными кожухами из листов пенопласта. Вид деформометрического комплекса КД-III на руднике «Умбозеро» приведен на рис. 6.3.

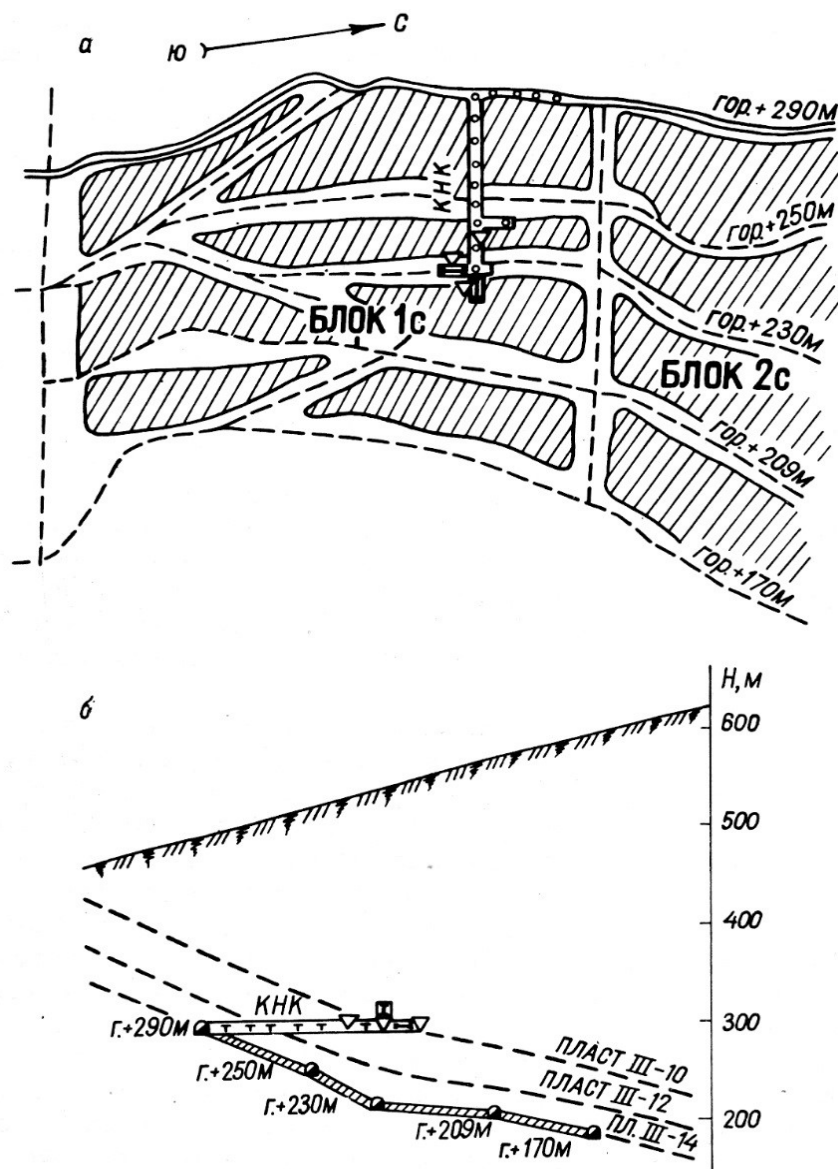


Рис. 6.1. Схема расположения КНК относительно участка шахтного поля рудника «Умбозеро»: *а* — на плане горных работ по залежи III-14; *б* — в вертикальной плоскости (разрез вдоль оси КНК)

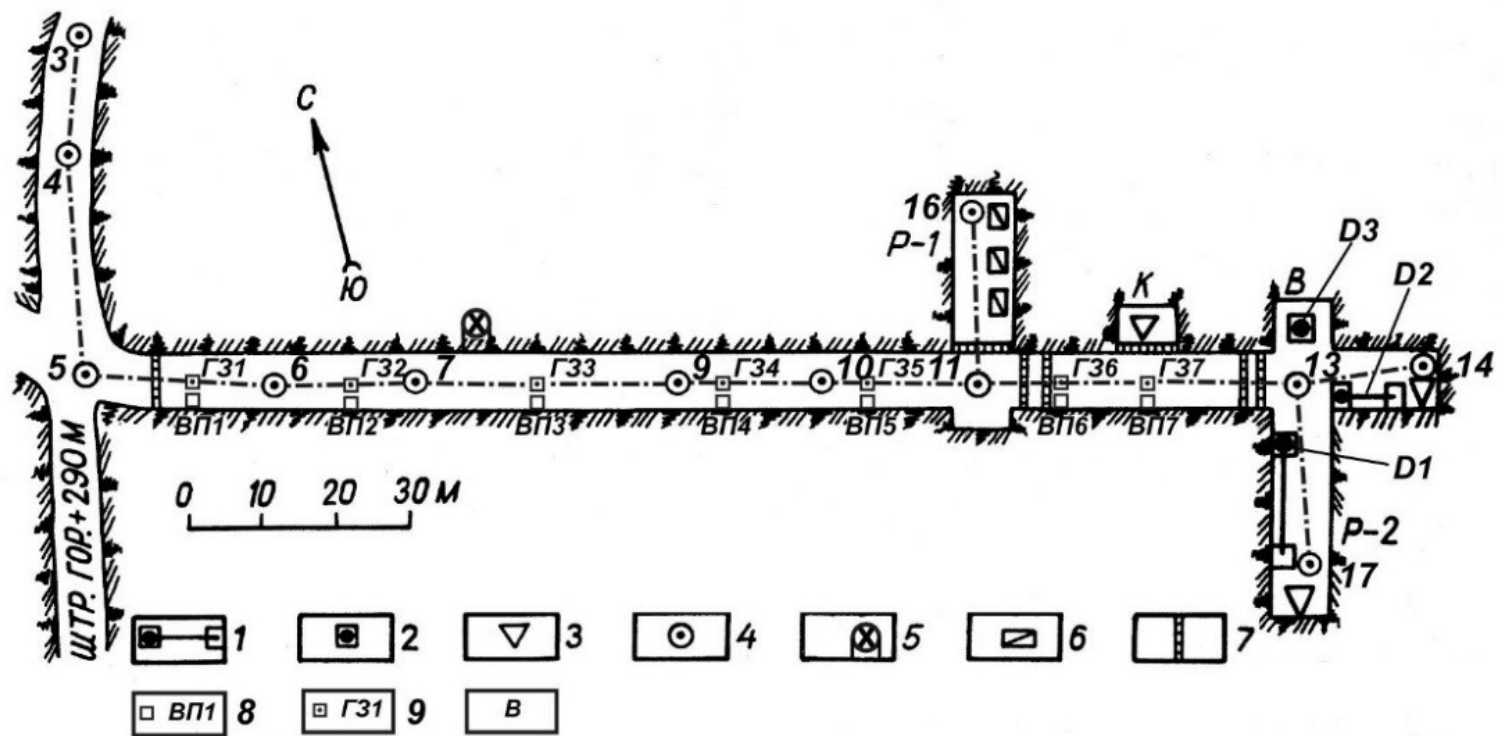


Рис. 6.2. Схема оборудования КНК на гор. + 290 м рудника «Умбозеро». Кварцевые деформографы: 1 (*D1* и *D2*) — горизонтальные, 2 (*D3*) — вертикальный; 3 — наклонометры УН-3М; 4 — реперы нивелирного полигона R_p ; 5 — геофон; 6 — регистрирующая аппаратура; 7 — изолирующие переключики; 8 — планово-высотные высокоточные геодезические пункты (*ВП*); 9 — планово-высотные напольные геодезические знаки (*ГЗ*); *B* — вертикальный восстающий

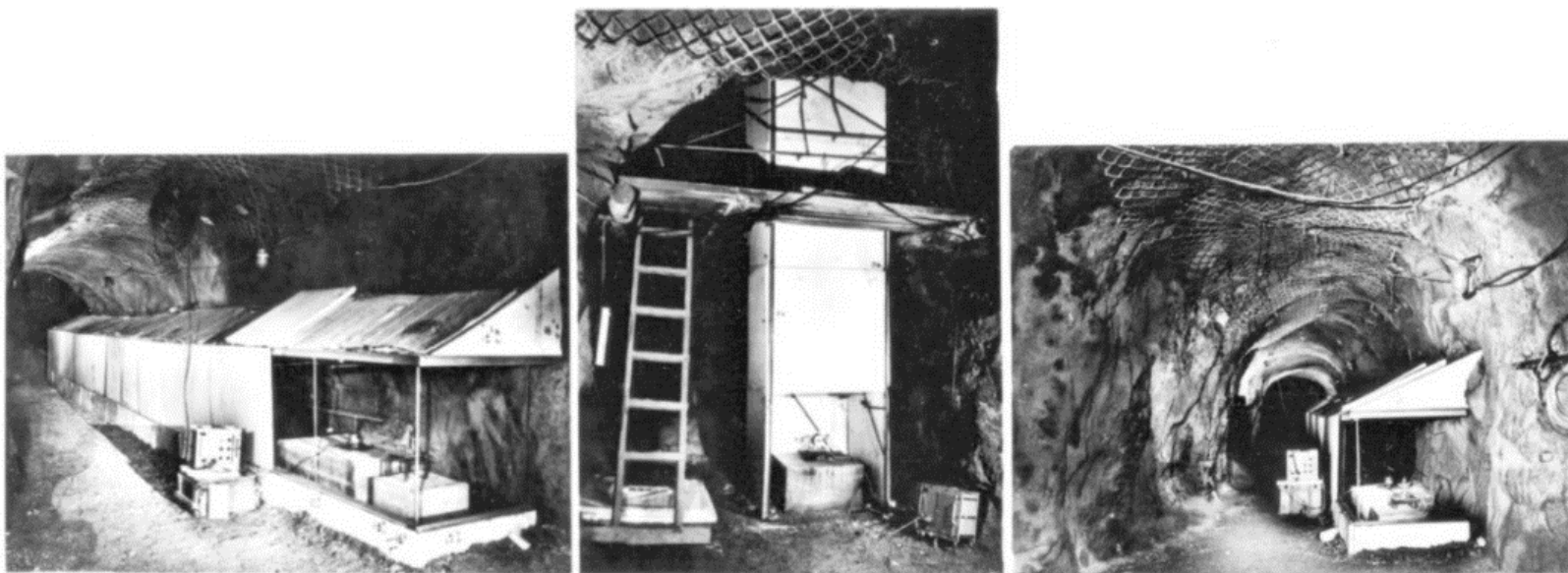


Рис. 6.3. Вид деформометрического комплекса КД–III на руднике «Умбозеро»

Каждый деформометр рассчитан на регистрацию относительного смещения двух точек массива, отстоящих друг от друга на длину базы приборов, с точностью 10^{-8} – 10^{-9} отн. ед. деформаций и обладает наибольшей чувствительностью к смещениям, происходящим вдоль эталона длины. Деформометры в КНК позволяют регистрировать деформации массива в трех взаимно перпендикулярных направлениях — по простиранию, вкрест простирания залежи и в вертикальном направлении. Для оперативности получения информации и контроля работоспособности деформометрического комплекса КД–III регистрирующая аппаратура размещена в специальном помещении на поверхности рудника и соединена с датчиками перемещений посредством кабельной линии протяженностью 1,4 км.

Нивелирный полигон представляет собой ряд реперов специальной конструкции, расположенных через 15–25 м по всей длине КНК. Часть реперов расположена в штреке гор. + 290 м в зоне минимального влияния очистных горных работ. Реперы заложены на глубину не менее 1 м от контура выработки с целью закрепления их вне нарушенного приконтурного слоя пород в подошве выработок. Общая протяженность нивелирного полигона составляет около 250 м. Прецизионное нивелирование по полигону проводилось по методике первого класса с инварными рейками длиной 2 м с использованием высокоточного нивелира Ni–007. Для контроля вертикальных деформаций массива по реперам полигона проводились регулярные нивелирные измерения (чувствительность 0,1 мм) с периодичностью 4–6 раз в год в зависимости от состояния ведущихся рудником горных работ.

До 1987 г. нивелирные наблюдения в квершлагах осуществлялись по реперам R_p , заложенным Горным институтом КНЦ РАН в почву квершлага (см. рис. 6.2). В 1986–1987 гг. были заложены плано-высотные высокоточные геодезические знаки ВП и напольные геодезические знаки ГЗ (см. рис. 6.2). Геодезические наблюдения по всем заложенным в квершлагах пунктам осуществлялись по методике Научно-исследовательского института прикладной геодезии (город Новосибирск) с максимально возможной для таких условий точностью. Схема измерения перемещений по ВП приведена на рис. 6.4.

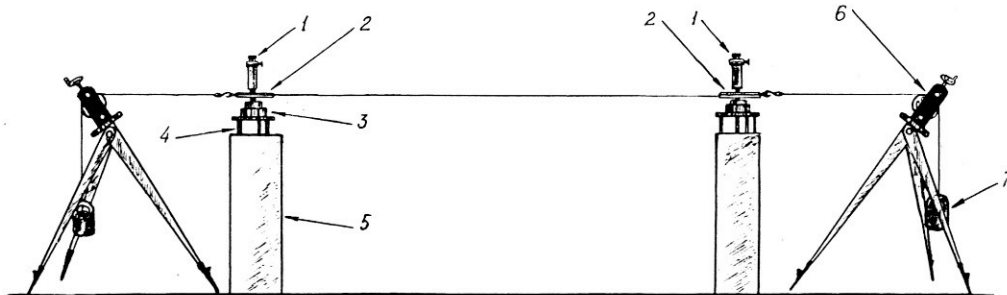


Рис. 6.4. Схема измерения расстояния между знаками ВП в КНК рудника «Умбозеро»: 1 — микроскоп; 2 — стеклянная шкала; 3 — высокоточный плано-высотный знак; 4 — подставка под знак; 5 — тумба; 6 — блочный станок; 7 — груз

Как видно из рис. 6.4, расстояния между пунктами ВП измерялись при помощи инварной проволоки (струны) толщиной 0,2 мм при постоянном ее натяжении с использованием специальных высокоточных плано-высотных знаков, устанавливаемых на бетонных тумбах. При помощи всех этих приспособлений в измерениях смещений как по высоте, так и в горизонтальной плоскости обеспечивалась точность порядка $\pm 0,1$ мм. Кроме того, в стенке

квершлага с 1988 г. в скважине был установлен геофон (см. рис. 6.2), регистрирующий в непрерывном режиме все сейсмические сигналы из массива в пределах частот от 25 до 2000 Гц при усилении 1 : 5000 с постоянной записью на бумажную ленту при помощи самописцев Н-399 и КСПП-4. Регистрация сейсмических событий в массиве геофоном служила своеобразным сейсмическим протоколом динамических событий на руднике. Как показал практический опыт наблюдений, геофоном без привязки по месту фиксировались все сейсмические события в пределах шахтного поля рудника с энергией свыше 10^3 Дж. В 1996 г. геофон был заменен комплектом ПСАК-1СМ (конструкции ИФЗ РАН), представляющий из себя трехкомпонентный сейсмоприемник с блоком фильтров и выводом сигналов в аналоговой форме.

Наблюдения за сейсмичностью массива при отработке Ловозерского месторождения осуществлялись сейсмостанцией «Апатиты» (начало сейсмологических наблюдений станции «Апатиты» 1956 г.) задолго до начала эксплуатации рудника «Умбозеро». Сейсмологические наблюдения вплоть до 1990-х гг. показывали, что район расположения Ловозерского месторождения в сейсмическом отношении является «мертвой зоной», поскольку ни одного сейсмического события за это время там не было зафиксировано [38]. Однако с начала 1990-х гг., когда на руднике «Умбозеро» над выработанным пространством обрабатываемой залежи П-14 стала обрабатываться залежь П-10, на руднике возникла и стала стремительно развиваться сейсмичность массива [38]. Сейсмологические наблюдения в Ловозерском массиве осуществлялись также сейсмостанцией «Ловозеро» ГС РАН совместно с Горным институтом КНЦ РАН и КРСЦ ГС РАН в рамках программ Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (гранты №№ 99-05-05645а, 01-05-79096к, 02-05-64578а, 05-05-65154а, 09-05-00754а, 15-05-04323а, 18-05-00563а). КРСЦ ГС РАН вел наблюдения на сейсмостанции «Апатиты» (город Апатиты, 50 км от рудника «Умбозеро») и сейсмической группе ARRAY, расположенной в 17 км от города Апатиты и в 60 км от рудника [51]. Непосредственно в Ловозерском массиве в 1988 г. по инициативе Горного института КНЦ РАН и ИФЗ РАН введена в действие сейсмостанция «Ловозеро» сейсмологической сети ГС РАН, оснащенная цифровой сейсмостанцией IRIS по программе совместных исследований СССР и США. Сейсмостанция установлена на руднике «Карнасурт», в квершлагах гор. + 430 м, на глубине 200 м от дневной поверхности, внутри выработанного пространства рудной залежи П-4, поддерживаемого опорными целиками руды. Ее технические характеристики приведены в табл. 6.1.

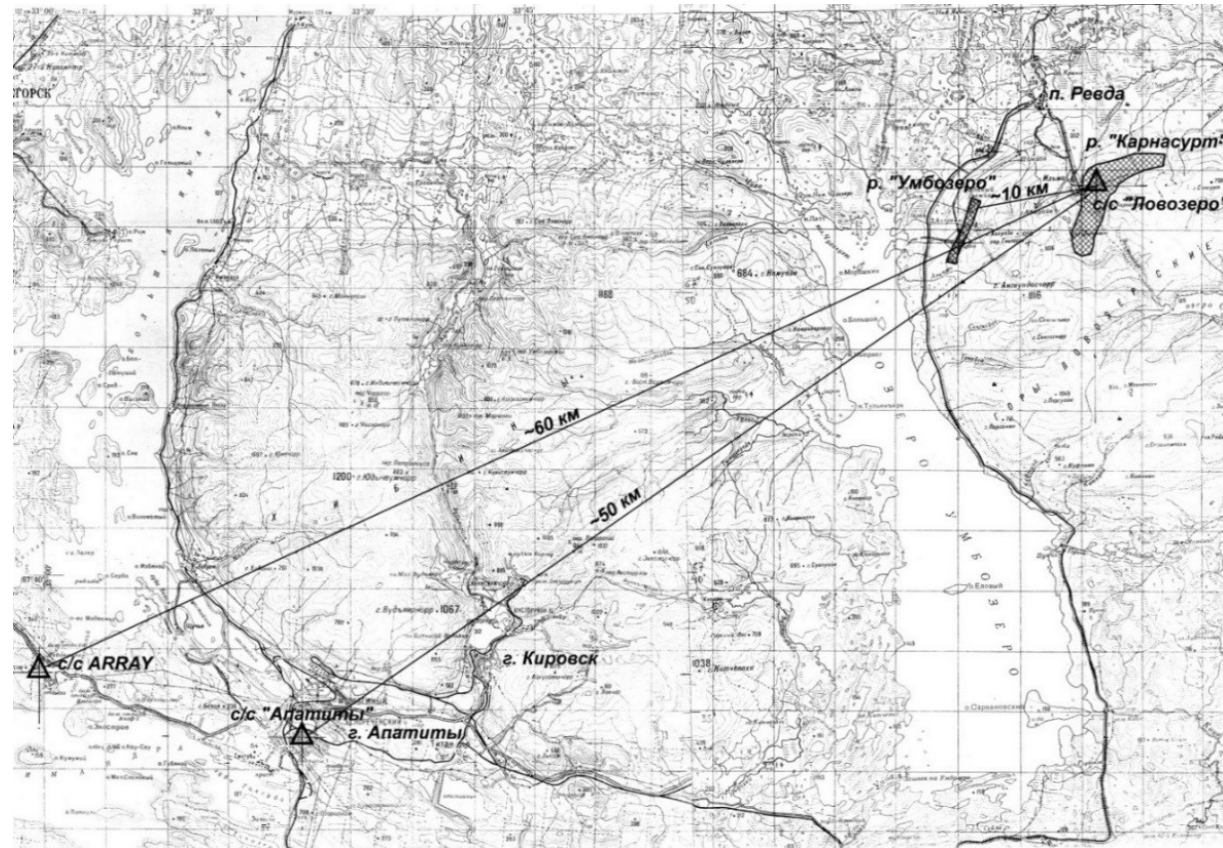
В последние годы (с 2009 г.) по инициативе Горного института КНЦ РАН на руднике «Карнасурт» установлена еще одна сейсмостанция — на расстоянии 2 км от сейсмостанции «Ловозеро», на глубине 210 м от поверхности, в выработанном пространстве залежи П-4, поддерживаемом целиками. Схема расположения станций КРСЦ ГС РАН относительно рудника «Умбозеро» в Ловозерском массиве приведена на рис. 6.5, а, схема расположения станций в Ловозерском массиве приведена на рис. 6.5, б. Все указанные станции регистрируют сейсмические события, происходящие в массиве рудника «Умбозеро». Регистрация сейсмических событий апатитскими и ловозерскими сейсмостанциями ведется одновременно с взаимной проверкой зафиксированных событий в рамках вышеупомянутых программ РФФИ (руководитель проектов РФФИ — доктор технических наук А. В. Ловчиков).

Таблица 6.1

Характеристика сейсмостанции «Ловозеро»

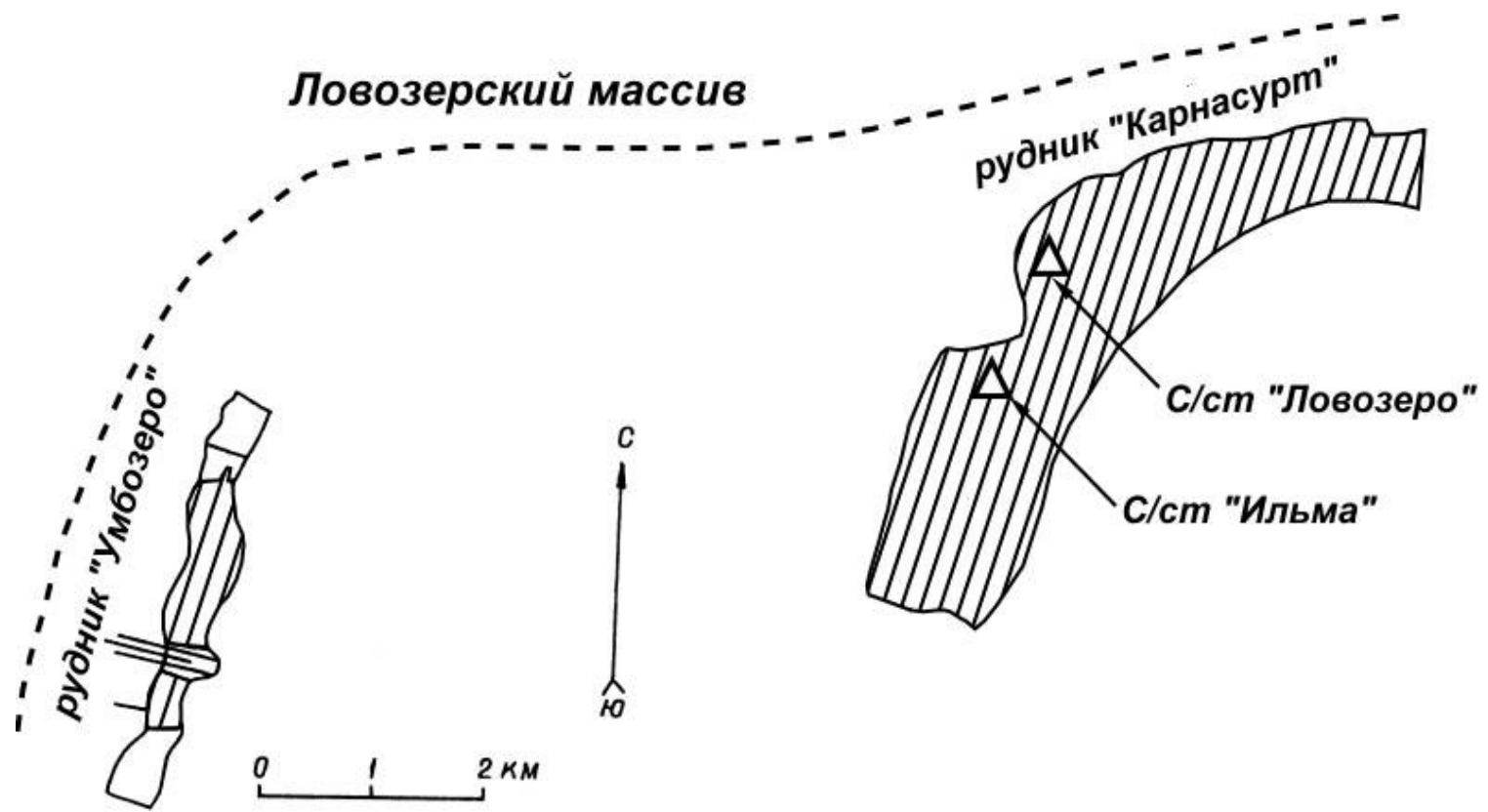
Станция	Ловозеро, Россия	
Директор	Рахимов Равиль Григорьевич	
Головная организация	ГС РАН	
Адрес	Поселок Ревда, Мурманской область, улица Кузина, дом 10, квартира 42 Телефон (81538)3-61-24 (рабочий), 3-59-93 (домашний)	
AUTODRM Интернет-адрес	autodrm@lvz.gsras.ru	
Координаты	Широта 67.8979 N	Долгота 34.6514 E
	Высота 630 м	Глубина 200 м
Геология	Contact metamorphic rocks adjacent to an Upper Paleozoic nepheline-syenite intrusion	
Описание местоположения	Место расположено на действующем руднике для добычи редкоземельных металлов. Постаменты установлены в инструментальной отсеке в конце 100 м квершлага, в стороне от штольни «Главная», на гор.+ 430 м рудника «Карнасурт»	
Время работы	— 2 декабря 1992 г. — настоящее время	
Сейсмометр	Streckeisen Model STS-1/VBB — трехкомпонентная система для широкополосных, длиннопериодных и сильно длиннопериодных каналов и Teledyne Geotech Model GS-13 — сейсмометры для триггерных короткопериодных каналов	
Системы сбора данных	IDA MK6B	
Калибровка	1992 : 336 — наст.	
Станция LVZ версия MK6B	остановлена для установки новой версии оборудования 07.06.2000	
Станция LVZ версия MK7	запущена в эксплуатацию (165) 13.06.2000 в 04:00 GMT	

Гистограмма распределения сильных сейсмических событий ($M_L > 1$) по годам в массиве рудника «Умбозеро» с 1990 г. до последнего времени приведена на рис. 3.8. На рис. 6.6 приведена такая же гистограмма с разделением событий, происшедших в массивах рудников «Умбозеро» и «Карнасурт», поскольку в последнее время (после 2002 г.) после консервации рудника «Умбозеро» сильные сейсмические события ($M > 1$) стали возникать большей частью в пределах массива действующего рудника «Карнасурт». В текущее время сильные сейсмические события ($M > 1$), по наблюдениям сейсмостанции «Ловозеро» и апатитских сейсмостанций в Ловозерском массиве, происходят в основном в массиве действующего рудника «Карнасурт» и эпизодически в массиве затопленного рудника «Умбозеро», о чем более подробно сказано далее.



a

Рис. 6.5. Схема расположения сейсмостанций, контролирующих сейсмичность массива рудника «Умбозеро» (начало):
a — на карте Кольского полуострова;



б

Рис. 6.5. Схема расположения сеймостанций, контролирующих сейсмичность массива рудника «Умбозеро» (окончание):
 б — в Ловозерском массиве

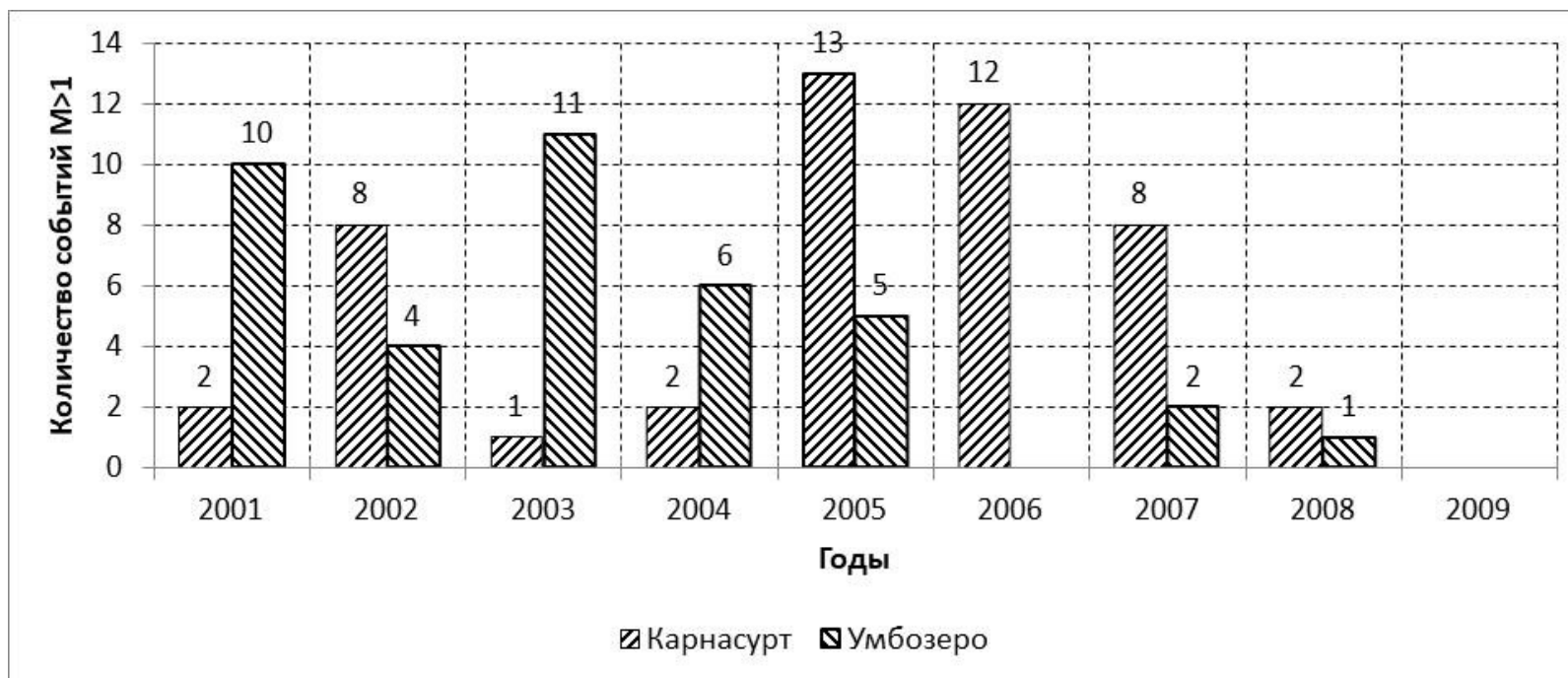


Рис. 6.6. Гистограмма распределения сильных сейсмических событий ($M > 1$) в массивах рудников «Умбозеро» и «Карнасурт» после ГТУ 17.08.1999 г.

Информация об изменении состояния массива рудника «Умбозеро» в период подготовки и непосредственно после ГТУ 17.08.1999 г. получена по результатам сейсмологических, сейсмоакустических и деформационных наблюдений. На рис. 6.7 приведена гистограмма распределения сильных сейсмических событий ($M > 1$) и среднесуточного количества сейсмоакустических импульсов ($\sim 10^3$ Дж) (по показаниям геофона) за период 1989–1999 гг. в массиве рудника «Умбозеро». Закономерности изменения во времени сильных сейсмических событий описаны ранее (см. главу 3). Как видно из рис. 6.7, распределение сильных и слабых сейсмических импульсов в массиве по годам соответствуют друг другу, что и понятно, так как все эти события вызваны одними и теми же процессами, происходящими в массиве. В свою очередь, сейсмические и сейсмоакустические импульсы вызваны процессами перераспределения напряжений в массиве, обусловленными выемкой руды на двух залежах III–14 и III–10 (см. рис. 3.9). Закономерности изменения этих процессов описаны ранее (см. главу 3). Поскольку увеличение количества сейсмоакустических импульсов предшествует ГТУ, этот критерий является определенным прогностическим признаком приближения указанных явлений.

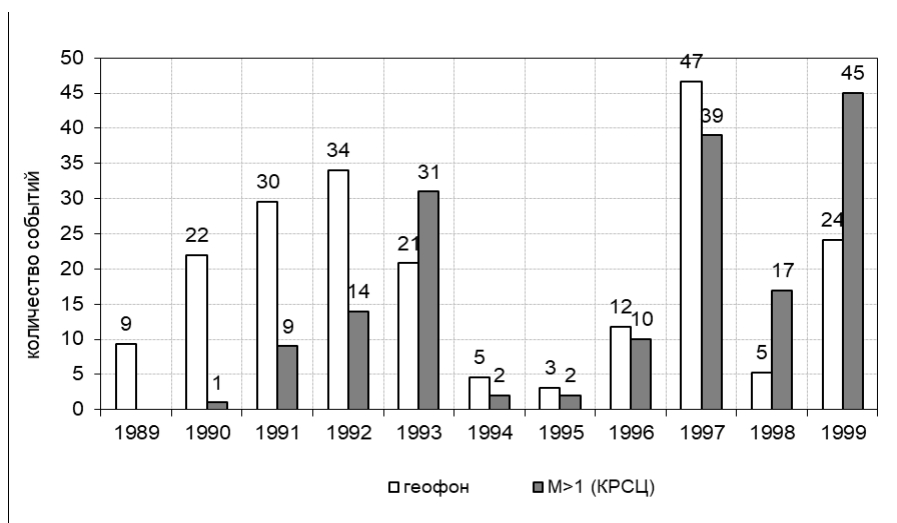


Рис. 6.7. Количество сейсмических событий ($M > 1$) и среднесуточное количество сейсмоакустических импульсов (геофон) по годам

Для мониторинга изменений состояния массива на руднике «Умбозеро» в течение 1999 г. в КНК гор. + 290 м осуществлялись периодические наблюдения вертикальных и горизонтальных смещений пород (периодичность — один раз в квартал).

Схема расположения пунктов наблюдений в квершлагах представлена на рис. 6.2, из которого видно, что применялись три вида пунктов (точек) измерений для контроля вертикальных и горизонтальных смещений почвы квершлага: планово-высотные высокоточные геодезические пункты (ВП), планово-высотные напольные геодезические знаки (ГЗ) и обычные реперы для высокоточного геометрического нивелирования (R_p). По местоположению в пространстве (см. рис. 6.2) пункты не совпадали друг с другом. Расчетная погрешность единичных измерений каждым способом не превышала $\pm 0,2$ мм.

Графики движения различных участков квершлага за 1999 г. представлены на рис. 6.8.

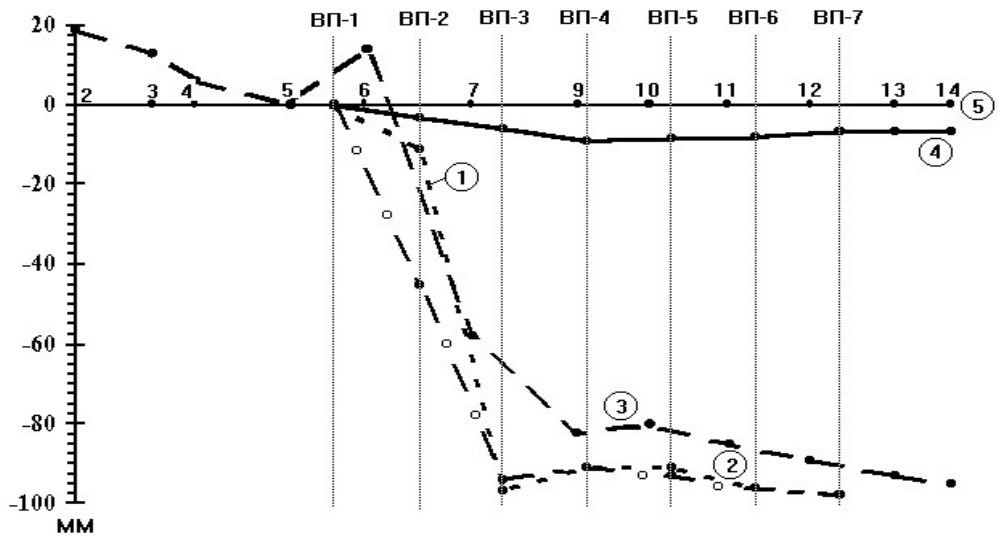


Рис. 6.8. Графики смещения почвы КНК после 17.08.1999 г.:
 1 — по пунктам ВП; 2 — по пунктам ГЗ; 3 — по реперам R_p ; 4 — уровень 1985–1991 гг.;
 5 — уровень 1995 г. — июля 1999 г.

Из графиков рис. 6.8 видно, что всеми тремя видами наблюдений (ВП, ГЗ, R_p) после 17.08.1999 г. зафиксировано опускание конечной части квершлага, сразу за пунктом ВП2 на 80–90 мм. Визуально столь резкое опускание массы горных пород выразилось в появлении зоны раскрытых трещин сдвига мощностью около 15–20 см, пересекающей квершлаг (рис. 6.9) под углом 40° к горизонту. Конечная часть квершлага сместилась по вновь образованному сбросу как единое целое, то есть как единый геолого-структурный блок. При этом блок сместился по сбросу не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном — горизонтальное смещение составило 130 мм (рис. 6.9). О том, что вследствие землетрясения произошло смещение единого блока по вновь образованным трещинам сдвига свидетельствует тот факт, что горизонтальные расстояния между пунктами ВП, установленными изначально в 24,00 м, остались такими же и после землетрясения, за исключением расстояния между пунктами ВП-2 и ВП-3. Расстояние между ВП-2 и ВП-3 сократилось и составило 23,870 м. Вертикальные смещения, как это видно из рис. 6.9, имеют резкий скачок также между указанными пунктами. Сами графики вертикальных смещений носят ступенеобразную форму, свидетельствующую о том, что произошел сдвиг одного геологического блока относительно другого со смещением в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Отметим еще несколько моментов по поводу графиков рис. 6.8. Наблюдения вертикальных смещений в квершлагах проводились с 1985 г., то есть практически с момента начала эксплуатации рудника. До 1987 г. они осуществлялись по реперам, заложенным Горным институтом КНЦ РАН (см. рис. 6.2). В 1986–1987 гг. заложены геодезические пункты ВП и напольные ГЗ. До 1991 г. реперы сколько-либо заметных смещений не испытывали. В первоначальный период эксплуатации рудника отмечались даже поднятия реперов на величину до + 2 мм (см. рис. 6.8). После ГТУ 17.08.1999 г. зарегистрировано опускание почвы квершлага на величину 80–90 мм. По крайней мере из графиков рис. 6.8 видно, что опускание

начиналось именно в том месте, где начинался перегиб графиков нивелировок. В результате землетрясения 17.08.1999 г. образовавшийся сброс окончательно оформился. Для того чтобы проследить распространение образовавшейся трещины в пространстве, были обследованы соседние выработки и выполнены нивелировки в этих выработках по маркшейдерским точкам с точностью ± 1 мм. Расположение обследованных выработок и маркшейдерских точек в них показано на рис. 6.10.

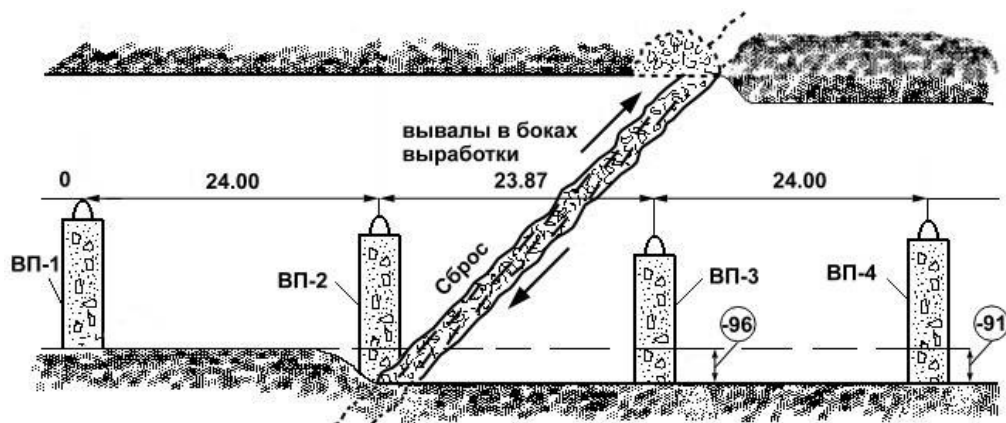


Рис. 6.9. Схема трещин сдвига в КНК

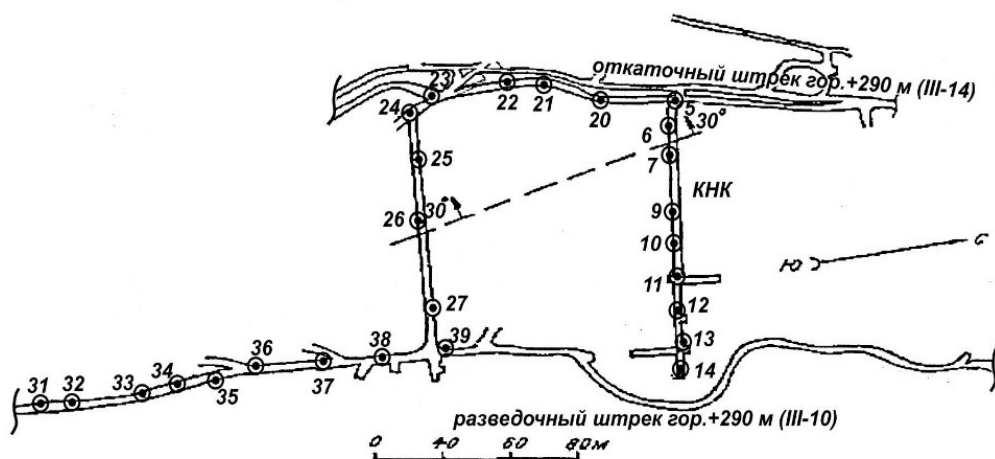


Рис. 6.10. Схема расположения маркшейдерских точек в выработках гор. +290 м на залежах III-10 и III-14

График вертикальных смещений по точкам, отмеченным на плане рис. 6.10, приведен на рис. 6.11. Из графика, имеющего такую же ступенчатую форму, как и графики рис. 6.8, видно, что по вновь образованной трещине в массиве произошло опускание блока на 7–9 см, что выявлено измерениями в КНК.

Таким образом, в результате проведенных режимных деформационных наблюдений предварительно установлено, что при ГТУ 17.08.1999 г. произошел сброс со сдвигом одного геолого-структурного блока относительно другого.

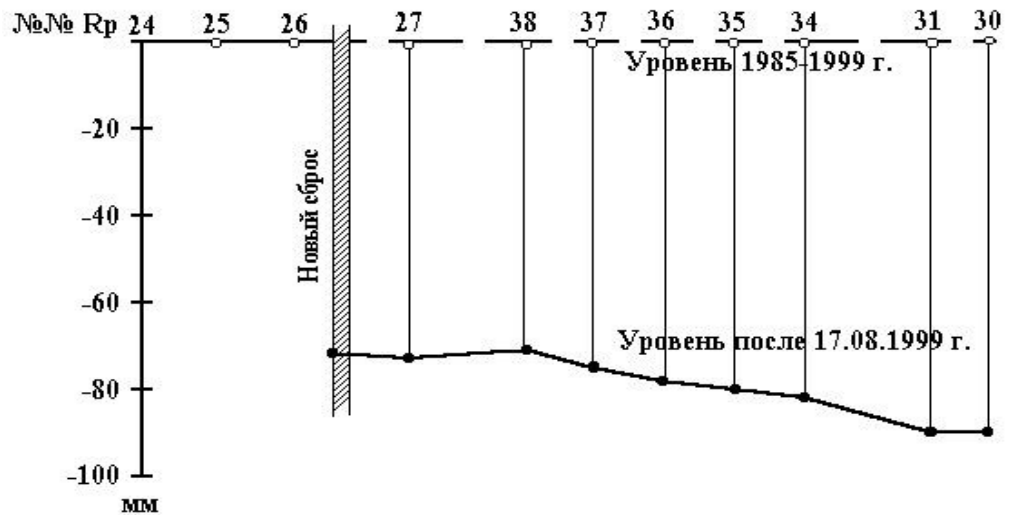
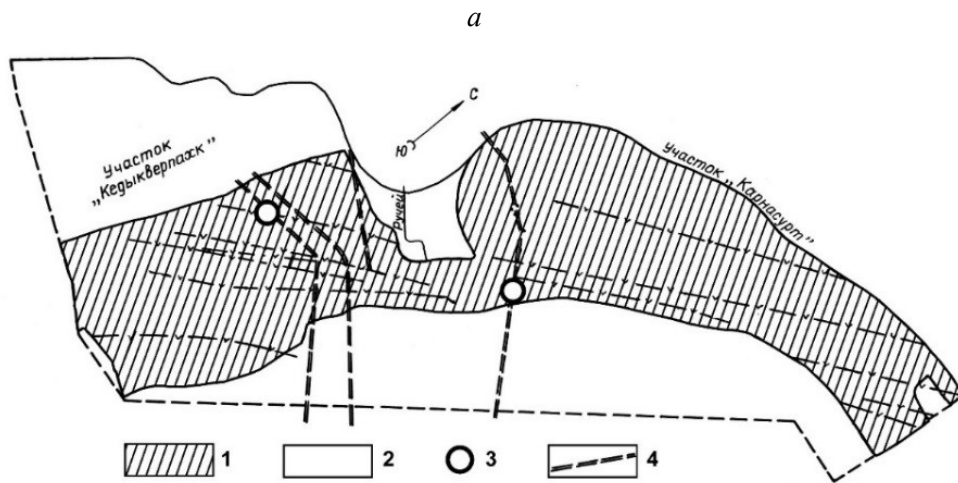
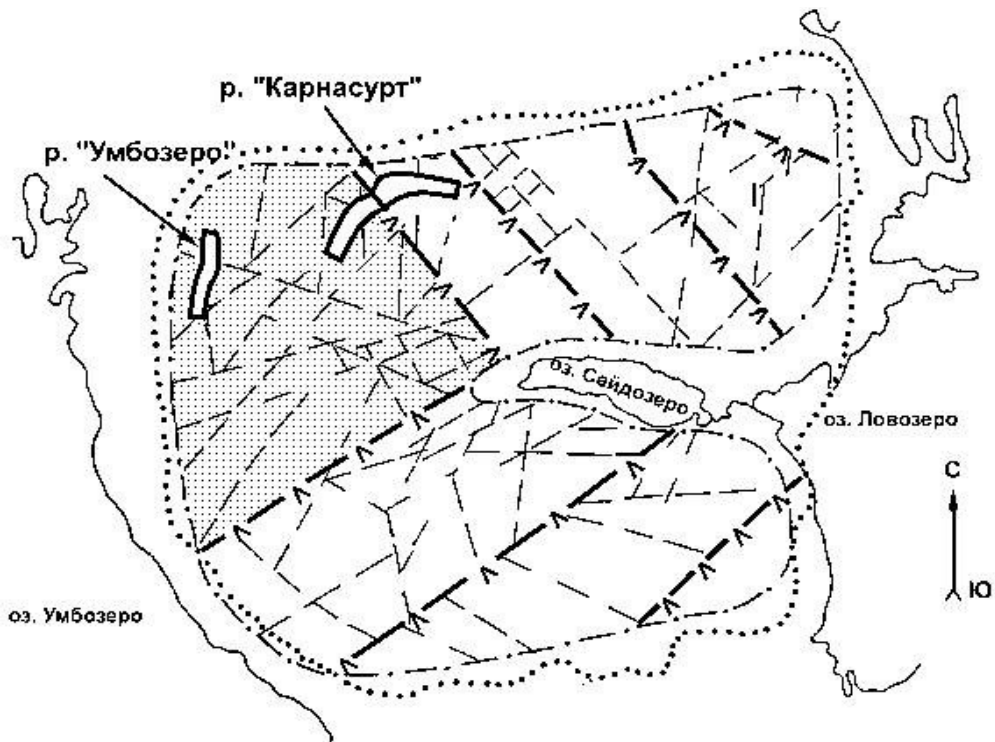


Рис. 6.11. График смещений пород в выработках гор. + 290 м после 17 августа 1999 г.

Безусловно, столь сильные сейсмические события, каким является ГТУ 17.08.1999 г., «встряхнул» всю геологическую структуру Ловозерского щелочного массива, который, как известно, представляет собой округлую в плане горную страну диаметром около 30 км и высотой до 1100 м над окружающими равнинами, расположенную в центре Кольского полуострова. По результатам геодинамического районирования [52] Ловозерский массив разделен на восемь геолого-структурных блоков III ранга (см. табл. 1.4) и около ста более мелких блоков. Рудники «Умбозеро» и «Карнасурт» находятся в пределах одного геолого-структурного блока III ранга (рис. 6.12, а).

Однако шахтное поле рудника «Карнасурт» разделено: западная его часть находится в том же блоке, что и рудник «Умбозеро»; восточная часть — в другом геолого-структурном блоке III ранга. На основных разломах шахтного поля рудника «Карнасурт» были поставлены высокоточные режимные наблюдения смещений берегов разломов относительно друг друга. На рис. 6.12, б приведена схема расположения крупных разрывных нарушений на шахтном поле рудника «Карнасурт» и участков измерения смещений берегов разломов. Повторные измерения смещений в горизонтальной плоскости выполнялись инварными проволоками с точностью 0,1 мм, в вертикальной плоскости — по методике нивелирования первого класса с точностью 0,1 мм. На рис. 6.13 показаны местоположение и схема измерения подвижки берегов разлома на западном фланге шахтного поля рудника «Карнасурт».

На рисунке 6.14 представлены результаты наблюдений на станции в период 1997–2001 гг.; повторные измерения выполнялись с периодичностью приблизительно один раз в квартал. На рис. 6.14, а приведены изменения высотных отметок реперов, на рис. 6.14, б — изменения расстояний между реперами на противоположных сторонах разлома, на рис. 6.14, в показана разница расстояний между реперами на противоположных сторонах разлома как показатель сдвига одной стороны разлома относительно другой.



б

Рис. 6.12. Схема геолого-структурного строения Ловозерского массива (а) и расположения участков измерения смещений на разломах на шахтном поле рудника «Карнасурт» (б):
 1 — выработанное пространство; 2 — массив, целики; 3 — станции наблюдений;
 4 — тектонические нарушения

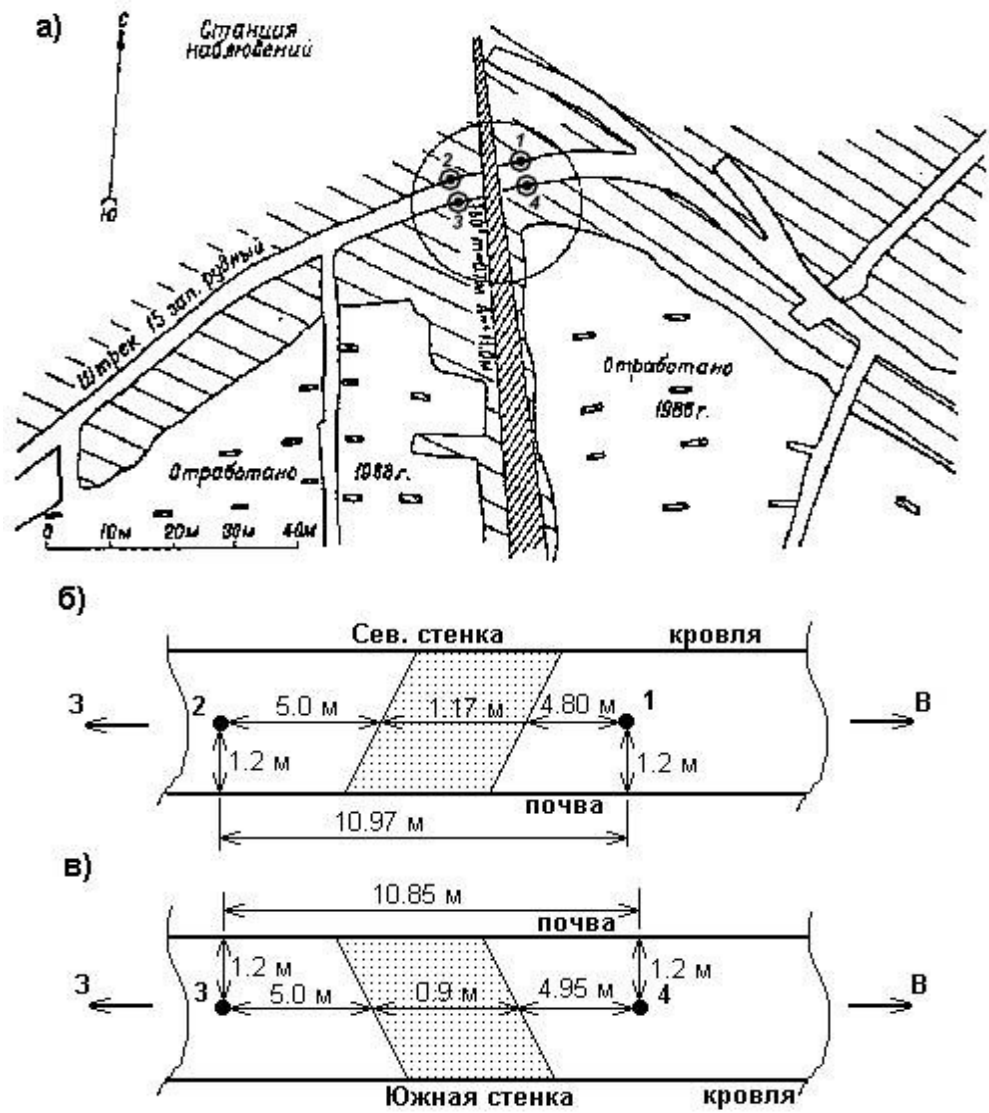


Рис. 6.13. Измерения смещений берегов разлома на западном фланге рудника «Карнасурт»: *а* — фактический план станции; *б* — схема расположения реперов у разлома в северной стенке штрека; *в* — то же в южной стенке штрека

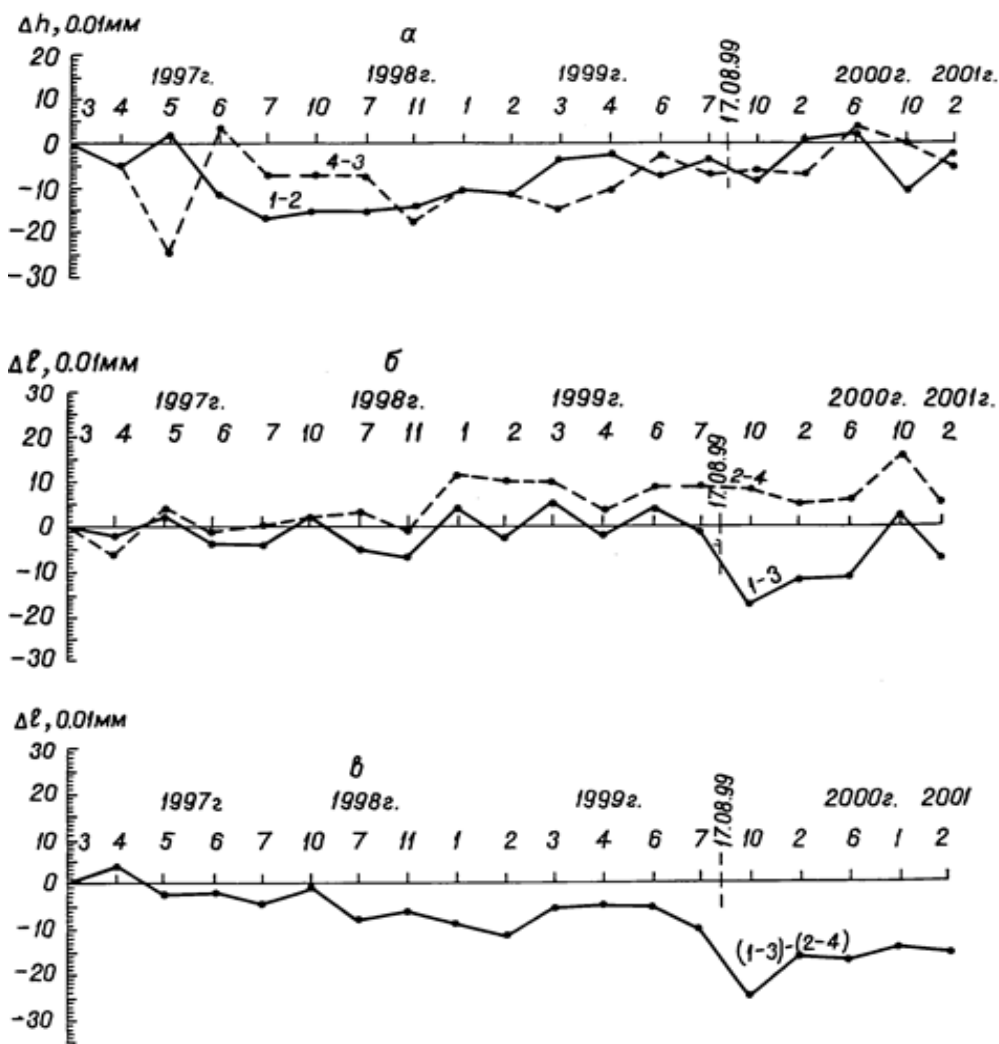


Рис. 6.14. Графики смещения реперов на станции наблюдений во времени:
a — в вертикальной плоскости; *б* — в горизонтальной плоскости; *в* — по плоскости тектонического нарушения

Как видно из рис. 6.14, *a*, колебания отметок реперов, установленных на разных берегах разлома относительно друг друга, в период 1997–2001 гг. не превышали $\pm 0,2$ мм, то есть не выходили за пределы, обусловленные точностью измерений и влиянием периодических природных факторов. Горизонтальные расстояния между реперами на противоположных берегах разлома в период 1997 г. — июль 1999 г. тоже практически не менялись (зафиксированные изменения не выходят за пределы $\pm 0,1$ мм). Изменения в положении реперов, то есть микросмещения по разлому величиной до 0,2 мм, зарегистрированы после землетрясения 17.08.1999 г. Указанная величина значительно превышает ошибки измерений и отражает блоковые движения, происходящие в массиве. В последующий период взаимное положение реперов остается неизменным (рис. 6.14, *б*, *в*), что свидетельствует о стабилизации состояния массива.

На рисунке 6.15. показана схема расположения реперов вблизи разлома «Главный» и график изменения их положения в вертикальной плоскости во времени в период апрель 1999 г. — февраль 2001 г. Как видно из графиков, высотные отметки реперов с течением времени изменялись незначительно, колебания отметок не превышали $\pm 0,2$ мм, то есть погрешностей, обусловленных точностью измерений. Скачок смещений наблюдался во время землетрясения 17.08.1999 г. (рис. 6.15, б), когда величина вертикальных перемещений по разлому достигла 0,5 мм. После землетрясения зафиксированные изменения положения реперов не выходят за пределы ошибок измерений, что свидетельствует о стабилизации положения массива. О стабилизации массива свидетельствует также тот факт, что вернулась тенденция повышения северного берега разлома относительно южного, которая наблюдалась до землетрясения.

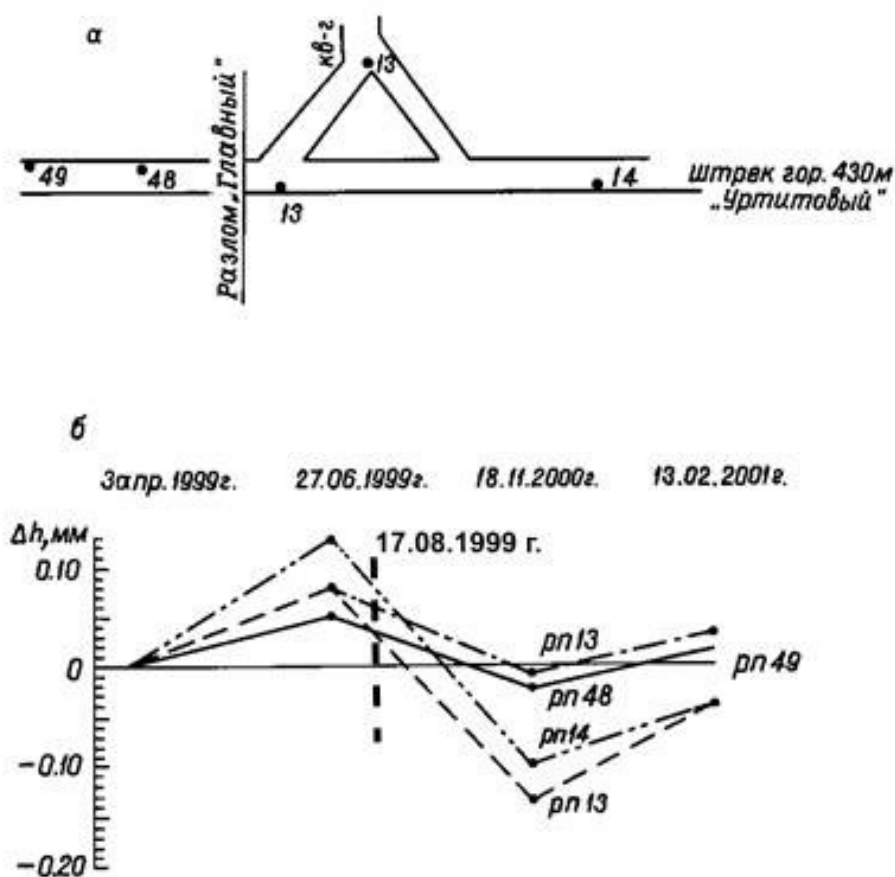


Рис. 6.15. Измерение смещений берегов разлома «Главный»: а — схема расположения реперов нивелирного полигона; б — результаты наблюдений в 1999–2001 гг.

Как показано выше, горизонтальные смещения на разломах больше, чем вертикальные. Поскольку сами по себе величины зафиксированных смещений невелики и исчисляются десятками долями миллиметров, которые трудноуловимы, измерение горизонтальных смещений в условиях рудника

«Карнасурт», которые больше по величине, чем вертикальные, очевидно, более информативно, чем измерение вертикальных. Таким образом, установлено, что подвижки блоковых структур в Ловозерском массиве от ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» распространяются на расстояние до 10 км от очага события. При этом на основании зафиксированных подвижек на разломах в руднике «Карнасурт» можно утверждать, что величина горизонтальных подвижек при этом событии больше, чем подвижек в вертикальном направлении. К сожалению, деформометрический комплекс КД–III, установленный в КНК, в период подготовки и совершения ГТУ 17.08.1999 г. не работал, поскольку во время сильных сейсмических событий 1997 г. (см. рис. 3.8), происходящих в непосредственной близости от кварцшлага, кварцевые стержни комплекса были поломаны вследствие сильных толчков в массиве. В течение двух лет (1998–1999 гг.), несмотря на усилия Горного института КНЦ РАН, целостность стержней не удалось восстановить вследствие инертной позиции администрации рудника. Только в 1999 г., после аварии, произошедшей 17.08.1999 г., под нажимом Госгортехнадзора Российской Федерации деформометрический комплекс КД–III был восстановлен и работал вплоть до закрытия рудника «Умбозеро». Однако, раньше и после сейсмического события 17.08.1999 г. за время работы деформометрического комплекса в КНК рудника «Умбозеро» удалось получить интересные научные результаты.

На рисунке 6.16 показаны графики изменений деформаций массива по показаниям деформометрического комплекса КД–III на руднике «Умбозеро» в период подготовки и прохождения ГТУ 25 октября — 9 ноября 1991 г. с магнитудами $M = 2,2–2,6$ [40] в блоке 1–Ю рудника. Во время ГТУ были разрушены горные выработки и целики на площади 80 тыс. м².

Как видно из рис. 6.16, показания по компоненте СЮ деформометрического комплекса КД–3 начали изменяться за три месяца до ГТУ и к моменту самих ударов выросли в десять раз по сравнению с фоновым уровнем. По другим компонентам ЗВ и Z показания тоже изменились, но на значительно меньшую величину. Компонента СЮ имеет направление на очаг ГТУ, вследствие чего по ней зарегистрированы наибольшие изменения деформаций массива. Удаление очагов ГТУ (блок 1–Ю рудника) от деформометрического комплекса — 600 м. Через месяц после момента последнего ГТУ (9 ноября 1991 г.) показания деформаций по компонентам вернулись к фоновому уровню. Следует заметить, что процесс подготовки и прохождения ГТУ 25 октября — 9 ноября 1991 г. был зафиксирован также сейсмоакустическим методом [40].

Другой пример регистрации процессов подготовки ГТУ на руднике «Умбозеро» тем же самым деформометрическим комплексом КД–III получен в 2004 г. На рис. 6.17 приведены графики записей по компонентам деформометрического комплекса в 2004–2005 гг., уже в период консервации рудника, когда в его блоке 1С произошел сильный ГТУ (4 октября 2004 г., $M_L = 3,2$) [53]. Как видно из рис. 6.17, показания по компоненте N (СЮ) начали резко изменяться за четыре месяца до ГТУ и к моменту удара возросли в 5–7 раз по сравнению с фоновым уровнем. Компонента N направлена в сторону очага ГТУ, расстояние от деформометрического комплекса до очага по горизонтали составило 200–400 м. По компоненте E изменения показаний зарегистрированы непосредственно перед ГТУ и в значительно меньшей степени, чем по компоненте N (приблизительно в два раза по сравнению с фоновым уровнем) (рис. 6.17).

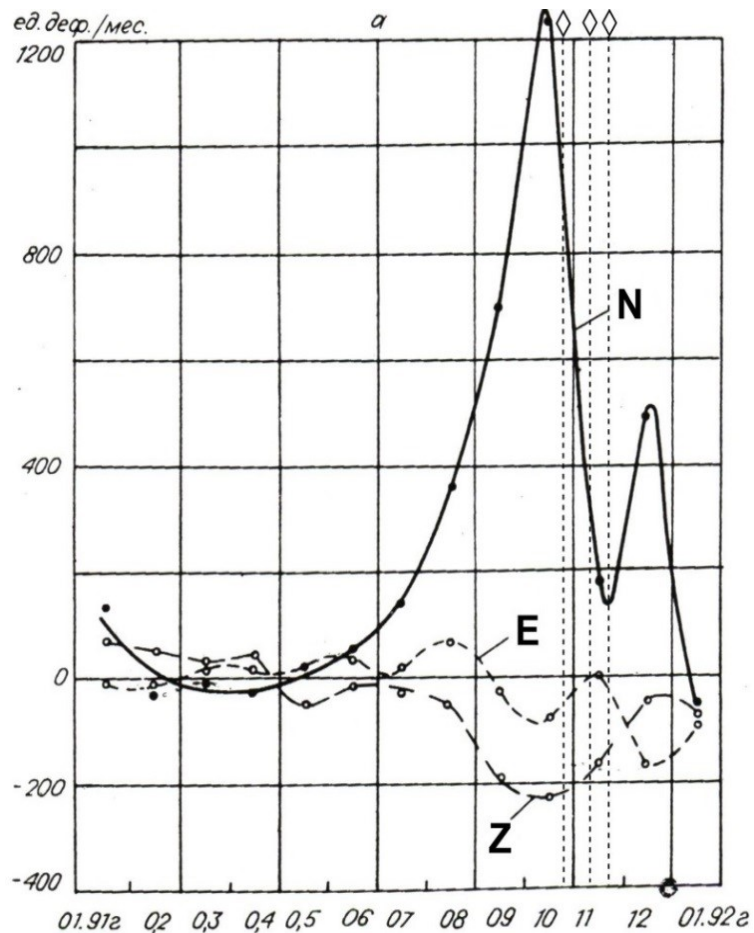


Рис. 6.16. Графики деформаций массива при подготовке и прохождении ГТУ на руднике «Умбозеро» 25 октября — 9 ноября 1991 г. (моменты ударов показаны значком ◇)

Информативными показателями, которые могут рассматриваться как предвестники ГТУ, что видно из приведенных примеров, являются следующие: 1) направление на очаг события (по направлению компоненты, показания по которой изменяются в наибольшей степени); 2) время наступления события. Как видно из рисунков 6.16, 6.17, показатель аномальных деформаций по компонентам деформометрического комплекса отчетливо проявляется за 3–4 месяца до наступления события. Таким образом, высокоточные режимные деформометрические наблюдения позволяют прогнозировать время подготовки ГТУ на рудниках, что является наиболее сложной задачей прогноза таких катастрофических явлений. Как известно, прогноз горных и горно-тектонических ударов должен осуществляться по месту и времени. В настоящее время решение задачи их прогноза по месту с достаточной степенью надежности решается сейсмоакустическим методом, при помощи специальных автоматизированных систем контроля, создаваемых на рудниках. В то же время задача контроля горных и горно-тектонических ударов по времени этими системами не решается [25]. Деформометрические режимные наблюдения, как показано выше, способны решить эту задачу.

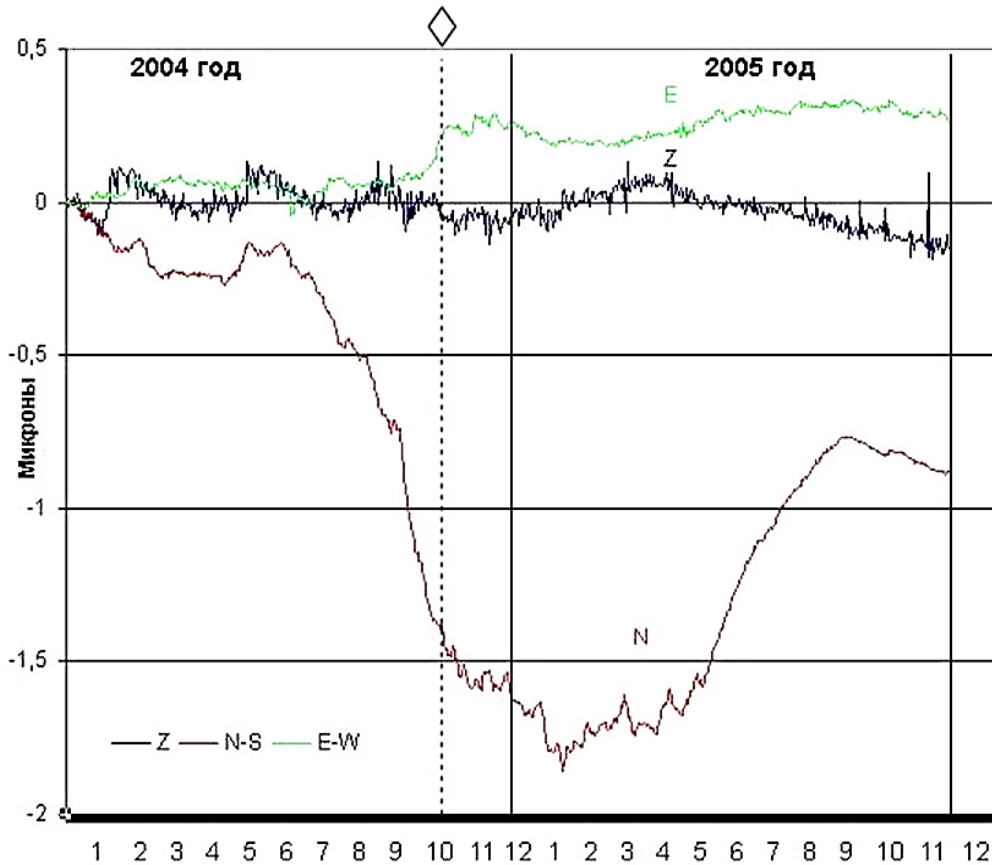


Рис. 6.17. Графики деформаций массива по компонентам комплекса КД-3 в 2004–2005 гг. (значком \diamond показан момент ГТУ с магнитудой $M = 3,2$)

Ряд приведенных примеров показал успешное применение высокоточных режимных деформационных наблюдений для контроля состояния массива на рудниках при подготовке мощных геодинамических событий. Основным достоинством таких наблюдений является возможность прогнозирования подготовки событий во времени, что пока недостижимо другими методами. В комплексировании с другими методами наблюдений, которые позволяют более надежно контролировать подготовку мощных геодинамических событий в массиве по месту, задача прогноза горных и горно-тектонических ударов на рудниках может быть решена.

7. СЕЙСМИЧНОСТЬ МАССИВА РУДНИКА «УМБОЗЕРО» В ПРОЦЕССЕ ЕГО КОНСЕРВАЦИИ И ЗАТОПЛЕНИЯ

Рудник «Умбозеро» недолго функционировал после ГТУ 17.08.1999 г. — до первой половины 2004 г. В 2004 г. горные работы были прекращены, и рудник был переведен в стадию сухой консервации, поскольку водоотлив из него осуществлялся вплоть до 2009 г. В период 1999–2003 гг. очистная выемка руд велась в основном на рудной залежи III–10 (см. рис. 3.9), так как восстанавливать разрушенные ГТУ откаточные и капитальные выработки на залежи III–14 не имело смысла. Сейсмичность массива рудника «Умбозеро», вследствие отсутствия воздействия очистных работ, резко снизилась и приблизилась к нулевым значениям (см. рис. 3.8). Однако уже в период консервации рудника 4 октября 2004 г. в его массиве произошло еще одно сильное сейсмическое событие — ТЗ с магнитудой $M_L = 3,9$ (см. табл. 3.5), анализ которого выполнен в работе [53]. Последствия этого события оказались невелики — в одной из камер на залежи III–10 зафиксирован вывал из кровли объемом 300 м^3 , установлены трещины в окружающих целиках. Наиболее важным последствием события 4 октября 2004 г. явилось расширение плоскости разрыва, образовавшейся 17.08.1999 г., еще на 150 м, вплоть до барьерного целика между наклонными стволами (рис. 7.1). Очевидно, что событие 4 октября 2004 г. было вызвано расширением фронта работ на залежи III–10 (см. рис. 3.9).

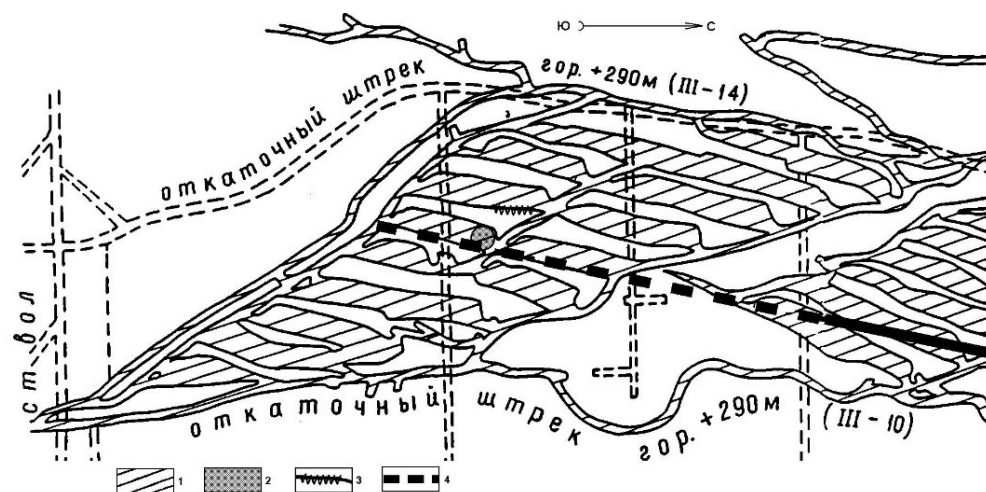


Рис. 7.1. Последствия землетрясения 4 октября 2004 г. в выработках залежи III–10 рудника «Умбозеро»:

1 — очистные и подготовительные выработки; 2 — вывал из кровли; 3 — трещины в целике; 4 — прорастание трещины сдвига

В сентябре 2009 г. произошло затопление рудника «Умбозеро» вскоре после того, как были отключены насосы, откачивающие из него воду. Сам рудник не работал с 2004 г. Факт затопления, возможно, и не имел бы большого значения, если бы не геодинамический режим Ловозерского месторождения и массива самого рудника. Ловозерский массив, в котором рудниками «Умбозеро»

и «Карнасурт» разрабатывается Ловозерское редкометалльное месторождение, за последнее десятилетие XX в., по наблюдениям сейсмологов [51], превратился в самый сейсмически активный район Кольского полуострова. Как установлено исследованиями Горного института КНЦ РАН, возникшая сейсмичность являлась чисто техногенной, обусловленной ведением горных работ на рудниках [38], а на руднике «Умбозеро» техногенная сейсмичность проявлялась наиболее активно. Поэтому любые изменения в напряженном состоянии массива, в том числе и вызванные затоплением, могли привести к изменению геодинамического режима массива, что вызывало наибольшие опасения.

Как показала гистограмма распределения сильных сейсмических событий (с магнитудой $M \geq 1,0$) в массиве рудника «Умбозеро» Ловозерского месторождения за 1990–2004 гг. (см. рис. 3.8), в последние годы XX в. было зарегистрировано не менее десяти сильных сейсмических событий, и происходили они ежегодно. Максимальное количество таких событий (45) наблюдалось в 1999 г. Для самого рудника «Умбозеро» последствия сильнейшего сейсмического события 17.08.1999 г. были катастрофическими. Две трети действующих горных выработок по нижней рудной залежи было разрушено. Приблизительно половина запасов руды на разрушенном участке была безвозвратно потеряна. Во время события 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» сейсмические колебания на промплощадке достигали 6–8 баллов, в ближайшем поселке Ревда (10 км от рудника) — 5–6 баллов [1]. Обычно промышленные здания строятся с учетом опасности сейсмических колебаний до 7 баллов. Таким образом, даже такое сильнейшее сейсмическое событие по энергии колебаний не оказалось критическим для поверхностных зданий и сооружений, но по своему уровню было близким к нему.

Затопление рудника связано с пригрузками на массив от водных масс, смачиванием плоскостей трещин и снижением сцепления по трещинам за счет воды, что вызывало опасение повышения сейсмичности массива рудника и возникновения новых сильных сейсмических событий. Одним из факторов, вызывающих беспокойство, обусловленное изменением геодинамического режима месторождения, послужила возможность отрицательных последствий для другого действующего рудника — «Карнасурт», расположенного на расстоянии 6–10 км от рудника «Умбозеро». Распределение во времени в течение 2008 и 2009 гг. сильных сейсмических событий ($M \geq 1$) в массиве Ловозерского месторождения показано на рис. 7.2. Как видно из рис. 7.2, *а*, интенсивность сильных сейсмических событий, которые, как указывалось, имеют техногенное происхождение, к 2008 г. стала заметно затухать (см. рис. 3.8). Безусловно, это связано с остановкой эксплуатации рудника «Умбозеро» (напомним, что рудник был остановлен в 2004 г.), поскольку начиная с 2005 г. количество сильных сейсмических событий в массиве месторождения непрерывно уменьшалось с 13 в 2002 г. до 3 в 2008 г. При этом в массиве рудника «Умбозеро» в 2008 г. зарегистрировано всего одно такое событие. В первой половине 2009 г. тенденция к затуханию сейсмичности, как это видно из рис. 7.2, *б*, сохранялась, поскольку в течение полугодия зарегистрировано всего одно такое событие — в январе 2009 г. Однако в дальнейшем, начиная с июля 2009 г., эта тенденция резко нарушилась. В июле — сентябре 2009 г. в массиве рудника «Умбозеро» произошло сразу 17 сильных сейсмических событий с магнитудами от $M = 1,0$ до 2,0 (рис. 7.2, *б*). Единственной причиной резко возросшей сейсмичности является его затопление. Как видно из рис. 7.2, *а, б*, сейсмичность рудника по сильным сейсмическим событиям вследствие его затопления возросла по сравнению с предыдущим 2008 г. почти в двадцать раз.

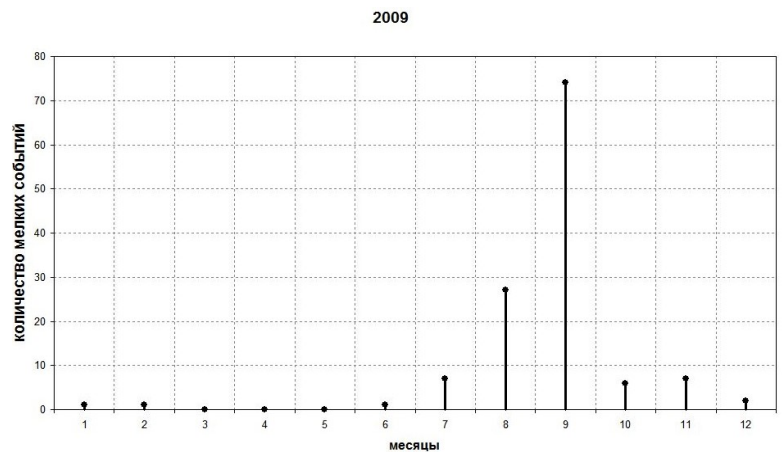
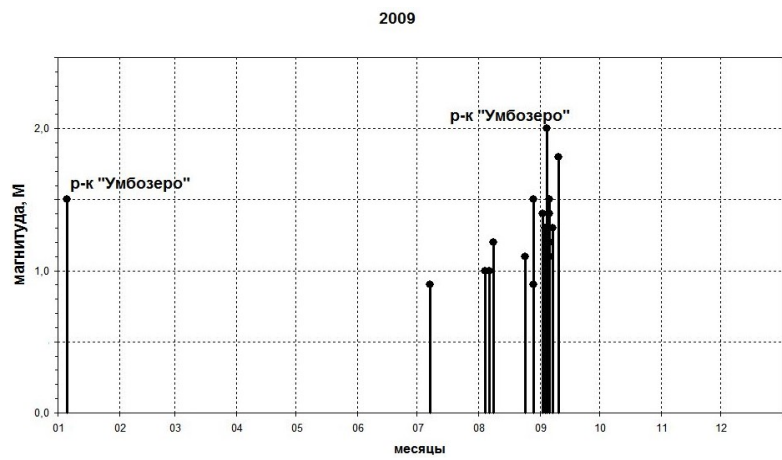
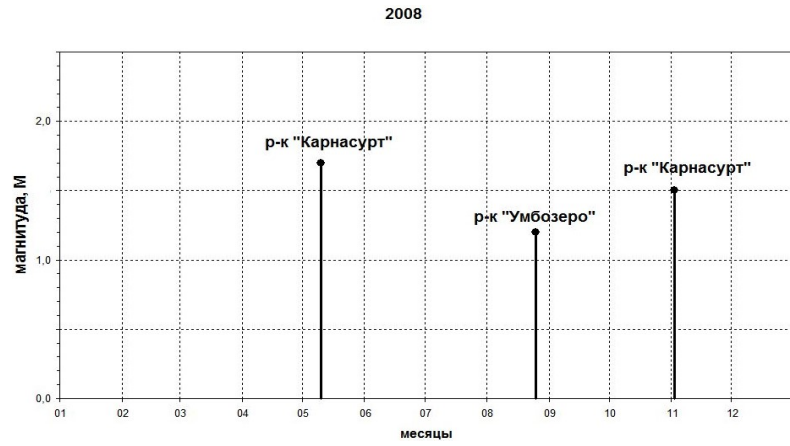


Рис. 7.2. Гистограмма распределения сильных сейсмических событий в массиве Ловозерского месторождения в 2008 (а) и 2009 (б) гг. и слабых событий в массиве рудника «Умбозеро» в 2009 г. (в)

То есть приведенные выше аргументы об изменении геодинамического режима массива рудника вследствие затопления полностью подтвердились. Затопление рудника резко изменило сейсмический режим его массива, повысив более чем на порядок количество сильных сейсмических событий.

Сейсмостанциями «Ловозеро» и «Ильма» помимо сильных сейсмических событий с магнитудой $M \geq 1$ (энергия $> 10^6$ Дж каждое) фиксируются также события с меньшей сейсмической энергией порядка 10^4 – 10^5 Дж («мелкие» события). Таких событий происходит обычно на порядок больше. Однако тенденции их развития следуют тем же закономерностям, что и тенденции развития сильных сейсмических событий, так как они отражают те же происходящие в массиве процессы. Количество мелких сейсмических событий в массиве рудника «Умбозеро» начиная с 2005 г. также непрерывно снижалось со 140 в 2005 г. до 20–40 в 2007–2008 гг. Однако в 2009 г. начиная с июля тенденция изменения состояния массива по мелким событиям тоже резко нарушилась: в сентябре 2009 г. зарегистрировано 75 событий, а в целом за 2009 г. — 125.

По мелким событиям легко проследить, как развивалось затопление рудника «Умбозеро» (рис. 7.2, в). Как следует из данных рис. 7.2, в, затопление рудника начиналось в июне — июле 2009 г. и продолжилось до сентября. Протяженность на северном фланге подготовительных выработок (штреков) по нижней рудной залежи составляет 3 км, а протяженность выработанного пространства на гор. + 170 ... + 290 м — 2 км. Судя по развитию сейсмичности в массиве (рис. 7.2, а–в), постепенное заполнение водой выработок нижних горизонтов (гор. + 170 ... + 250 м) происходило в июле — августе 2009 г. За этот период сейсмичность возрастала, но небольшими темпами — четыре сильных события и около 35 мелких. Однако основное развитие сейсмичности произошло в конце августа — начале сентября 2009 г., когда уровень воды поднялся до отметки + 290 ... + 330 м. Во время ГТУ 17.08.1999 г. в междупластье отработываемых залежей проросла серия трещин (плоскость сдвига), развившаяся до поверхности (см. главу 4). По этой плоскости произошла подвижка массива, надвиг верхней его части относительно нижней на величину до 16 см. Когда вода достигла плоскости сдвига и стала заполнять выработки отработанной верхней залежи, произошли основные сейсмические события, 12 сильных и около 75 мелких. Эти события были вызваны новыми подвижками по образовавшейся плоскости сдвига вследствие смачивания её водой и повышения подвижности сдвинувшихся относительно друг друга частей массива. Измерить новые подвижки массива на руднике не представилось возможным ввиду его затопления. После заполнения выработанного пространства верхней залежи дальнейшее затопление рудника произошло быстро, так как незатопленными оставались только устьевые части трех наклонных шахтных стволов (одного вентиляционного и двух транспортных). Поэтому к 9 сентября 2009 г. затопление рудника закончилось и вода стала изливаться на поверхность из устья наиболее низко расположенного транспортного ствола.

После затопления сейсмичность массива рудника резко спала (см. рис. 7.2) и в последнее время остается практически на нулевом уровне. Как видно из рис. 7.2, б, сейсмичность во время затопления рудника «Умбозеро» проявилась в ряде сейсмических событий с магнитудами не более $M = 1,0$ – $2,0$. Для того чтобы оценить угрозу сейсмического воздействия на окружающий массив, поверхностные сооружения и другие объекты, представим, что все эти события реализовались

в виде одного с энергией, равноценной суммарной энергии всех происшедших 17 событий. Суммарная энергия событий, происшедших в массиве рудника в 2009 г., кроме события 5 января 2009 г., составляет $\sim 2,0 \cdot 10^9$ Дж, что приблизительно эквивалентно событию с магнитудой $M = 3,0$. То есть суммарное событие получилось бы достаточно мощным. Таких событий на российских рудниках до текущего момента произошло всего несколько [19]. Однако, если оценивать угрозу сейсмических колебаний от такого события для рудника «Карнасурт», она была бы недостаточной, чтобы вызвать обрушение выработок, поскольку подобные события на руднике «Умбозеро» уже происходили. В частности, событие 4 октября 2004 г. ($M = 3,2$) такой же мощности или событие 17.08.1999 г. ($M = 5,0$) многократно большей мощности. В обоих случаях эти события на руднике «Карнасурт» ощущались слабо. Таким образом, сейсмические события на руднике «Умбозеро» практически не повлияли на состояние выработок рудника «Карнасурт».

1. Установлено, что в высоко тектонически напряженном массиве затопление рудника изменяет его геодинамический режим, вызывает серию новых сильных сейсмических событий и повышает на порядок и более количество таких событий по сравнению с периодом до затопления [54].

2. Изменения геодинамического режима массива при затоплении рудника обусловлены весом заполняющих выработки вод и смачиванием ими плоскостей трещин в массиве. Такие изменения необходимо контролировать во избежание негативных последствий.

3. Наибольшее количество новых сильных событий происходит на участках разрушений и трещин в массиве, образованных предыдущими сильными сейсмическими событиями. В свою очередь, это вызвано теми обстоятельствами, что во время сейсмического события сбрасывается только небольшая часть энергии, запасенной массивом, а большая часть остается вблизи трещин, образовавшихся в результате проявления таких событий [55].

8. РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ. НОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА РУДНИКАХ

Анализ последствий и обстоятельств ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» перевернул существовавшие ранее представления о механизме и причинах возникновения таких геодинамических явлений в массивах горных пород. В российской горнотехнической литературе и нормативных документах до сих пор существует некоторый консерватизм в оценке опасности горных ударов на рудных месторождениях, связанный с историей развития этого вопроса. Первые горные удары в России произошли в 1940-х гг. на угольных шахтах. Благодаря, главным образом, ученым ВНИМИ (С. Г. Авершину, И. М. Петухову и др.) эта проблема в свое время была решена, так как были разработаны правила безопасного ведения горных работ в условиях опасности по горным ударам на угольных месторождениях, вследствие чего их опасность в угольных шахтах была снижена. Удароопасность пород на рудных месторождениях России возникла позднее — с 1960-х гг. Теоретические основы прогноза и предупреждения горных ударов, разработанные ранее для угольных месторождений, были затем механически перенесены на рудные месторождения, что неправомерно, так как горно-геологические условия рудных и угольных месторождений существенно различаются. Некоторые из этих неправомерных правил до сих пор используются в нормативных документах Ростехнадзора Российской Федерации для рудных месторождений [44], о чем сказано ниже.

Руды и породы месторождений, размещенные в массивах магматического или метаморфического происхождения, обладают более высокими показателями деформационно-прочностных свойств. Угольные месторождения, размещенные в массивах осадочного происхождения, обладают показателями деформационно-прочностных свойств пород существенно более низкими. Показатели прочностных свойств пород некоторых наиболее удароопасных рудных и угольных месторождений России приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Прочность пород на удароопасных рудных и угольных месторождениях России

Рудные месторождения			
1	2	3	4
Месторождение	Порода	Плотность, т / м ³	Прочность при сжатии, МПа
Ловозерское редкометалльное	Фойяит	2,65	160–243
	Уртит	2,75	247
	Луяврит	2,6–2,96	187–332
Хибинское апатитовое	Апатитонефелиновые руды	2,8–3,1	60–150
	Ийолит-уртиты, рихсчорриты	2,8–2,9	100–250

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4
Таштагольское железорудное	Магнетит (руда)	3,3–4,9	120–140
	Сиениты, скарны, порфириды	2,6–3,2	50–180
Северо-Уральское бокситовое	Бокситы (руда)	2,7–3,2	32–220
	Известняки (вмещающие породы)	2,6–2,7	45–155
Угольные месторождения [56]			
Порода		Плотность, т / м ³	Прочность при сжатии, МПа
Аргиллиты Алевриты (из многих месторождений)		2,50–2,90	20–70
Крепчайший уголь (Кизеловский бассейн)		~ 1,3	30–50

Прочность пород на рудных месторождениях намного, практически на порядок, выше, чем на угольных (см. табл. 8.1). В работе [31] показано, что к наиболее прочным породным разновидностям приурочены наиболее высокие тектонические напряжения в земной коре, то есть массивы наиболее прочных пород более энергонасыщены. Из этого следует, что энергия сильнейших проявлений сейсмичности на рудниках должна быть более высокой, чем в угольных шахтах, что подтверждается практикой. В табл. 8.2 приведены сведения о некоторых самых сильных ГТУ на рудниках и в шахтах России [19, 57, 58].

Как видно из табл. 8.2, действительно, мощность (энергия), выраженная в магнитуах события, сильнейших ГТУ на рудных месторождениях на один-два порядка (в десятки-сотни раз) выше, чем на угольных, что подтверждает приведенный выше тезис о более высоком уровне энергонасыщенности массивов рудных месторождений.

Таблица 8.2

Некоторые сильнейшие ГТУ на рудниках и в шахтах России

Рудные месторождения [19]			Угольные месторождения [57, 58]		
№ п. п.	Время и место	Магнитуда M_L	№ п. п.	Время и место	Магнитуда M_L
1	17.08.1999 г. рудник «Умбозеро», Ловозерское редкометальное месторождение, Кольский полуостров	5,1	1	28.08.1973 г. шахта имени Ленина, Кизеловский бассейн, Урал	$2,8 \pm 0,5$
2	16.04.1989 г. Кировский рудник, Хибинское апатитовое месторождение, Кольский полуостров	4,3	2	16.07.2011 г. Печорский* угольный бассейн	3,4

* Как показано в работе [59], данные о сейсмическом событии 16.07.2011 г. в Печерском угольном бассейне не вполне достоверны.

Однако наиболее существенным отличием горно-геологических условий угольных и рудных месторождений является различие в естественном напряженном состоянии их массивов. Для угольных месторождений, представленных массивами пород осадочного происхождения, характерен гравитационный тип естественного напряженного состояния, в котором максимальные по абсолютной величине напряжения являются вертикальными и создаются за счет веса толщи покрывающих пород. Для рудных месторождений, сложенных массивами пород магматического либо метаморфического происхождения, характерен гравитационно-тектонический тип естественного напряженного состояния, при котором максимальные по абсолютной величине напряжения создаются горизонтальными тектоническими силами, обусловленными современными горообразовательными процессами в литосфере. Действие напряжений вокруг некой горной выработки, расположенной на глубине H от поверхности, при гравитационном и гравитационно-тектоническом естественном напряженном состоянии массива поясняется схемой рис. 8.1, а, б.

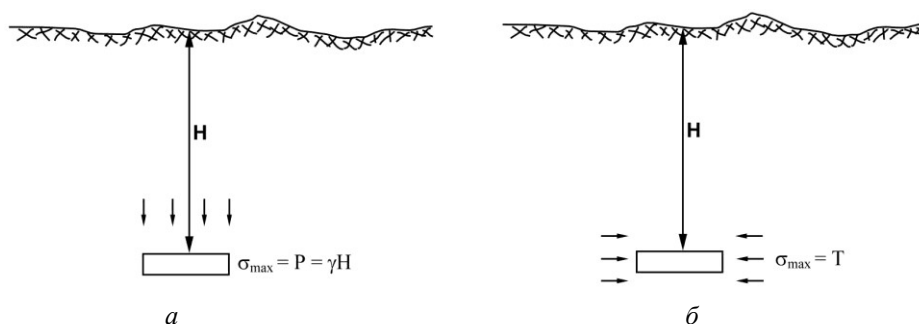


Рис. 8.1. Схема действия сил в массиве при естественном гравитационном (а) и гравитационно-тектоническом (б) состоянии

Максимальные по абсолютной величине напряжения на уровне кровли выработки при гравитационном напряженном состоянии массива (рис. 8.1, а) определяются весом толщи налегающих пород:

$$P = \gamma H, \quad (8.1)$$

где γ — плотность налегающих пород, т / м³; H — глубина кровли выработки до поверхности, м.

При гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массива максимальные по абсолютной величине напряжения сжатия создаются за счет тектонической составляющей напряжений T (рис. 8.1, б), имеющей горизонтальное направление в пространстве и, как показывает практика, значительно превосходящей величину P на соответствующей глубине от поверхности. Величину тектонических напряжений T можно определить только посредством экспериментальных измерений в массивах горных пород. Как правило, максимальная горизонтальная составляющая напряжений в массивах пород при гравитационно-тектоническом состоянии в 5–10 и более раз больше вертикальной составляющей, обусловленной весом толщи налегающих пород. Вследствие этого, именно тектоническими напряжениями обусловлена в большинстве случаев удароопасность пород на рудных месторождениях. В частности, в массивах наиболее удароопасных рудных месторождений России установлено гравитационно-тектоническое естественное напряженное состояние массивов со следующими параметрами составляющих напряжений [60] (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Характеристика естественного напряженного состояния массивов наиболее удароопасных рудных месторождений России [60]

Месторождение (рудник)	Максимальные горизонтальные напряжения сжатия в массиве, МПа	Отношение вертикальной и максимальной горизонтальной компонент напряжений в массиве
Хибинское (Кировский)	20 ÷ 80	1 : 3 ÷ 20
Ловозерское («Карнасурт» и «Умбозеро»)	40 ÷ 70	1 : 5 ÷ 10
Северо-Уральские бокситовые рудники	25 ÷ 50	1 : 2 ÷ 2.5
Таштагольское	60 ÷ 90	1 : 2 ÷ 5

Как видно из данных табл. 8.3, в массивах наиболее удароопасных рудных месторождений России действуют резко неравномерные по направлениям в пространстве гравитационно-тектонические поля напряжений, в которых вертикальная компонента главных напряжений является наименьшей по абсолютной величине. Если принять во внимание, что на перечисленных в табл. 8.3 месторождениях прочность пород на сжатие обычно имеет значение $\sigma_c = (50 \div 200)$ МПа, а во многих случаях близка к 100 МПа, а также минимальное значение коэффициента концентрации тектонических напряжений в кровле и почве горных выработок $k = 2 \div 3$, то очевидно, что вблизи контура выработок этих месторождений выполняется условие реализации динамических проявлений горного давления в форме горного удара [61]:

$$\sigma_d \geq 0,8\sigma_c, \quad (8.2)$$

где σ_d — максимальные действующие напряжения вблизи контура выработок; σ_c — прочность пород при сжатии.

Примем минимальное значение прочности пород при сжатии $\sigma_c = 100$ МПа = 10000 т / м². Коэффициент концентрации напряжений в боках выработок от вертикальных гравитационных напряжений, как известно, составляет $k \cong 2$. Примем значение удельного веса пород для рудных месторождений $\gamma = 3,0$ т / м³ (на большинстве месторождений значение удельного веса пород близко к этому показателю). Предельные действующие напряжения на контуре выработки для достижения опасности горных ударов при гравитационном состоянии массива могут быть определены по следующей формуле:

$$\sigma_d = 0,8k\gamma H, \quad (8.3)$$

где H — глубина расположения выработки, м; остальные обозначения даны выше.

Соотношение максимальных действующих напряжений сжатия на контуре выработки и прочности пород в зависимости от глубины расположения даны в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Зависимость максимальных напряжений сжатия на контуре выработки от глубины ее расположения

Глубина H , м	500	1000	1500	2000	2500
σ_d , т / м ²	2400	4800	7200	9600	12000
$\frac{\sigma_d}{\sigma_c}$	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20

Как видно из табл. 8.4, максимальные гравитационные напряжения сжатия от веса толщи покрывающих пород на рудных месторождениях достигают уровня, способного вызывать горные удары, только на глубине 2000–2500 м от поверхности. Указание критической глубины по проявлениям горных ударов 150–1000 м от поверхности, приведенное в работе [44], является неправомерным, так как на таких глубинах в рудниках гравитационные силы не способны вызывать горные удары.

То, что удароопасность пород в горных выработках рудных месторождений создается за счет больших горизонтальных тектонических напряжений сжатия в массиве, легко проверяется на практике. Схема разрушения контура выработок в поле действия больших гравитационных и тектонических напряжений в массиве показана на рис. 8.2. При гравитационном напряженном состоянии массива (максимальные напряжения P действуют вертикально) разрушаются бока выработки, а при гравитационно-тектоническом состоянии (горизонтальные тектонические напряжения T в разы превосходят вертикальные гравитационные) разрушаются кровля и почва выработок (см. рис. 8.2). Практика показывает, что на всех удароопасных российских месторождениях в первую очередь разрушается кровля выработок с образованием шатрового поперечного сечения, что свидетельствует о превалирующем действии в массивах тектонических сил [61].

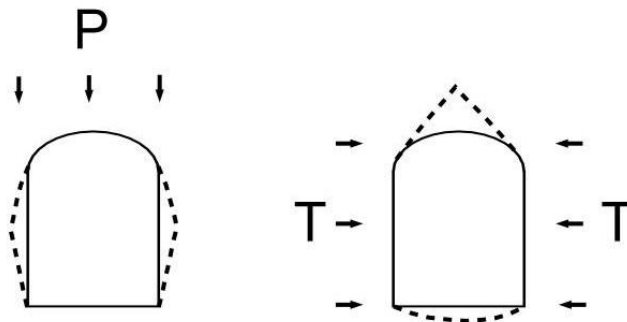


Рис. 8.2. Схема разрушения контура горной выработки под действием гравитационных (P) и тектонических (T) напряжений

Главными факторами, влияющими на опасность горных ударов, вследствие действия тектонических напряжений в массиве, являются [61]: 1) горизонтальная ориентировка тектонических напряжений в строго определенном в горизонтальной плоскости направлении; 2) резкая разница

в условиях проявления опасности горных ударов в зависимости от направления оси выработок в горизонтальной плоскости; 3) многократное превосходство тектонических сил сжатия над гравитационными силами на глубинах расположения горных выработок; 4) приуроченность тектонических напряжений к наиболее прочным породным разновидностям; 5) зависимость проявлений удароопасности от геолого-структурного строения массивов.

Основными причинами возникновения опасности горных ударов на рудных месторождениях, сложенных крепкими скальными породами, являются текущие горизонтальные тектонические напряжения в земной коре, обусловленные современными горообразовательными процессами в литосфере. Поскольку тектонические напряжения имеют горизонтальную ориентировку в пространстве, оказываются неправомерными такие ключевые понятия в официальных документах по предупреждению опасности горных ударов на рудниках [44], предполагающие вертикальную ориентировку максимальных напряжений в массиве, как: зона опорного давления; зона повышенного горного давления (зона ПГД); зона разгрузки; защитное рудное тело или его часть (слой); защитная зона; критическая глубина по проявлениям горных ударов и ряд связанных с ними пунктов.

В действующей инструкции Ростехнадзора Российской Федерации по предотвращению опасности горных ударов на рудниках [44] приведено описание различных форм геодинамических явлений в горных выработках — горно-тектонических и горных ударов, толчков и других, но без количественной характеристики этих явлений, что затрудняет возможность отличать их друг от друга. Между тем, как в российской [62–64], так и в мировой [65] горнотехнической литературе предложено несколько классификаций геодинамических явлений на рудниках и в шахтах по энергетическому принципу, то есть по количеству энергии, выделяющейся при этом явлении. Общим основанием этих классификаций является тот факт, что они рассчитаны на гравитационные силы, поскольку единственной причиной, вызывающей динамические проявления на рудниках и в шахтах, считается вес толщ покрывающих пород над горными выработками. То есть природа возникновения опасности горных ударов как в шахтах, так и на рудниках считается одинаковой. На этой основе разработаны правила предотвращения опасности горных ударов в шахтах и на рудниках [66, в частности инструкция Ростехнадзора Российской Федерации [44].

Однако причины, вызывающие горные удары и другие динамические проявления горного давления на рудниках и в шахтах, существенно различаются [67]. В угольных шахтах и на солерудниках, которые располагаются в породных массивах осадочного происхождения, в силу длительных процессов осадконакопления и относительно слабых деформационно-прочностных свойств пород преобладает гравитационный тип естественного напряженного состояния массивов, в котором преобладающими являются вертикальные напряжения, обусловленные весом толщи покрывающих пород. На рудных месторождениях, располагающихся в породных массивах магматического или метаморфического происхождения, породы скальные, кристаллические, их прочностные и деформационные свойства на порядок выше, чем свойства пород осадочных месторождений, в них преобладает естественное гравитационно-тектоническое напряженное состояние массивов, в котором преобладающее значение имеет

горизонтальная тектоническая составляющая напряжений [61]. Крепкие скальные породы массивов рудных месторождений в большей степени отражают напряженное состояние земной коры, чем массивы осадочных породных бассейнов. Земная кора, как известно, состоит из ряда тектонических плит, как бы плавающих на расплавленных породах астеносферы. Землетрясения, 70 % которых происходит в земной коре, как известно, вызываются горизонтальными движениями и столкновениями тектонических плит. Поэтому преобладающими в земной коре являются горизонтальные тектонические напряжения, которые зарегистрированы различными методами в подавляющей части ее площади [45]. В настоящее время установлено, что в массивах рудных месторождений России, которых насчитывается более сорока, действуют горизонтальные тектонические напряжения, превосходящие по величине на соответствующих глубинах вертикальные напряжения, обусловленные весом толщи налегающих пород. Особенно контрастно горизонтальные тектонические напряжения проявляются в массивах апатитовых месторождений Хибинского массива и Ловозерского редкометалльного месторождения на Кольском полуострове, где горизонтальные напряжения в породах рудников превосходят вертикальные до 10–20 раз. Именно на рудниках этих месторождений произошли самые мощные в России ГТУ [19].

Любые динамические проявления горного давления — это резкие подвижки геологической среды в новое положение геодинамического равновесия под влиянием горных выработок и существующих в этой среде напряжений. Величина подвижки зависит от размеров горных выработок в массиве, напряженного состояния пород, размеров геолого-структурной (блоковой) неоднородности массивов и других факторов. Однако все подвижки сопровождаются сейсмическими импульсами с различной энергией. Геологическая среда самопроизвольно выбирает уровень энергии сейсмического импульса, который адекватен воздействию на нее со стороны горных выработок.

Для характеристики энергии сейсмического импульса при землетрясениях, как указывалось, в сейсмологии используется понятие сейсмического момента в очаге [9]:

$$M_0 = GS\delta. \quad (8.4)$$

При сильных землетрясениях с магнитудой $M > 7$ длина трещин разрыва достигает десятков-сотен километров, а величина подвижки по трещинам исчисляется метрами [68]. О возможности применения формулы сейсмического момента к событиям шахтной сейсмичности сообщалось уже давно [69], и констатировалось, что никакой разницы между шахтной сейсмичностью и сейсмичностью при землетрясениях не существует. В российской горнотехнической литературе мало обращали внимания на аналогию горных ударов и сейсмических явлений в земной коре, поскольку практически до конца XX в. геодинамические события на российских рудниках и в шахтах имели относительно невысокий энергетический уровень. И только тогда, когда в конце XX в. и далее на рудниках и в шахтах многих стран, в том числе и в России, стали происходить мощные ГТУ, сопоставимые с землетрясениями, стали указывать на аналогию этих событий с землетрясениями.

Мы нашли в российской горнотехнической литературе только два случая сейсмических проявлений (ГТУ) на рудниках, энергетические характеристики которых можно было бы проверить по формулам сейсмического момента в очаге (табл. 8.5).

Таблица 8.5

Параметры некоторых сильнейших ГТУ на рудниках

Рудник, месторождение	Дата ГТУ	Параметры события		Очаговые параметры	
		магнитуда M_L	энергетический класс k	площадь подвижки S , м ²	величина подвижки, см
Кировский (Хибинское апатитовое)	16.04.1989	4,3	10,5	220000	2–9
«Умбозеро» (Ловозерское редкометалльное)	17.08.1999	5,0	11,8	~ 500 × 600 м = 300000	16

Схемы механизма событий, приведенных в табл. 8.5, показаны на рис. 8.3. Других примеров в отечественной горнотехнической литературе не найдено, поскольку при обследовании последствий подобных событий на рудниках эти параметры не измерялись.

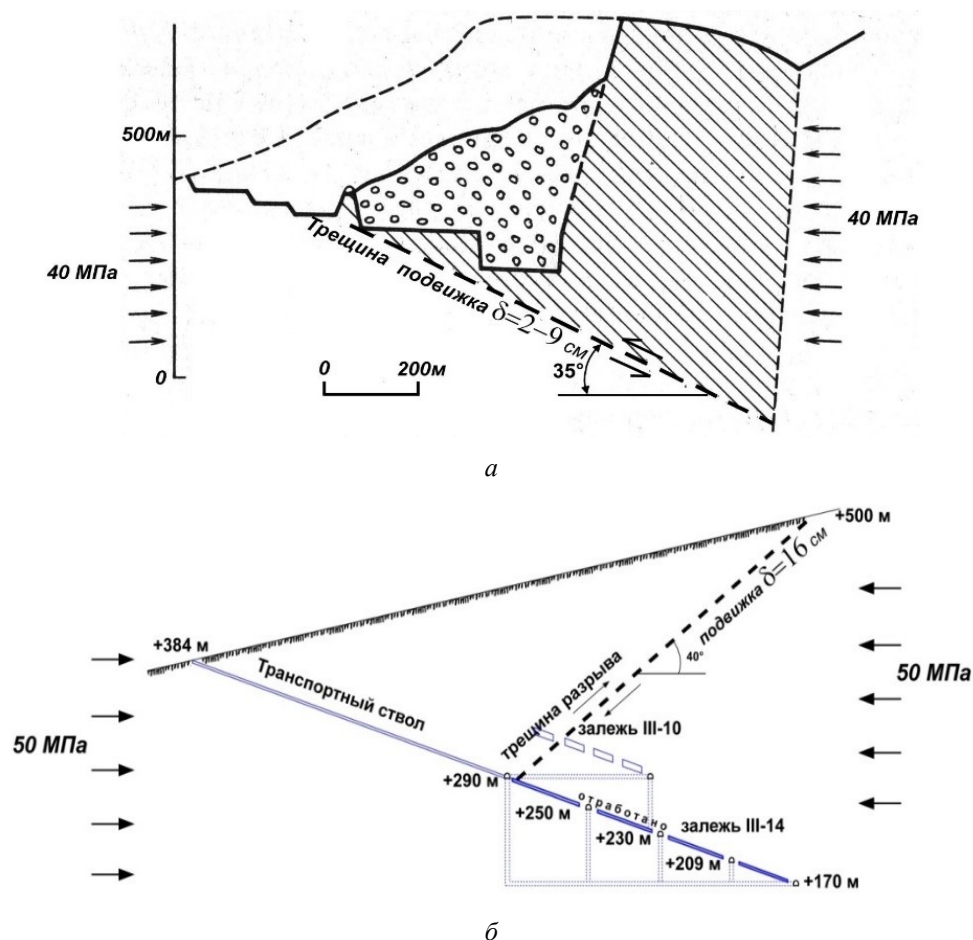


Рис. 8.3. Схема механизма сейсмических событий на Кировском руднике (а) и руднике «Умбозеро» (б)

Модуль сдвига пород, необходимый для вычислений по формуле (8.4), определяется из соотношения:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (8.5)$$

Подсчитаем, в частности, модуль сдвига для пород Ловозерского редкометалльного месторождения (породы — нефелиновые сиениты: луавриты, ургиты, фойяиты): $E = 6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,25$. Модуль сдвига, вычисленный по формуле (8.5), составит, т / м²:

$$G = \frac{60000 \text{ МПа}}{2,5} = \frac{6000000 \text{ т/м}^2}{2,5} = 2,4 \cdot 10^6.$$

Для пород Хибинского месторождения, представленных нефелиновыми сиенитами, модуль сдвига в первом приближении можно принять таким же, как и для пород Ловозерского месторождения. Результаты расчетов энергии для событий, представленных в табл. 8.3, приведены в табл. 8.5.

Как видно из данных табл. 8.5, энергия событий, рассчитанная по формуле сейсмического момента в очаге, и энергия, зарегистрированная инструментально сейсмостанциями с учетом точности определений параметров в формуле (8.4) и измеренных геометрических параметров событий, совпадают. Таким образом, расчеты показывают, что оценка энергии ГТУ на рудниках по формуле сейсмического момента в очаге события вполне возможна.

Однако основное отличие ГТУ и других геодинамических явлений на рудниках от землетрясений состоит в различии очагов этих событий на рудниках и при естественных землетрясениях. В сейсмологии очагом землетрясения в недрах земли считается область, внутри которой произошли необратимые деформации (трещины, разрывы сплошности пород). Аналогично, как указывалось, очагом ТЗ (горного, горно-тектонического удара) на руднике следует считать область проявления неупругих деформаций, то есть трещин, вывалов, обрушений, появившихся в результате геодинамического события. Размеры таких областей на рудниках выявляются обследованием по следам происшедших событий. На удароопасных месторождениях эти сведения приводятся в карточке горного (горно-тектонического) удара, которую должны составлять службы рудников в соответствии с действующими инструкциями.

В работе [14] нами введено понятие очага ГТУ, под которым подразумевалась область проявления неупругих деформаций пород в горных выработках, проявившаяся в результате события. Для удобства сравнения различных геодинамических событий в горных выработках предложен показатель поперечного размера очага события [15]:

$$L = \sqrt{S}, \quad (8.6)$$

где L — условный поперечный размер очага геодинамического события, км; S — площадь очага, то есть площадь проявления неупругих деформаций в горных выработках вследствие события, м².

В работах [14, 15] установлена зависимость между энергией ГТУ и поперечными размерами их очагов:

$$k = \ell g E = 3,26L + 8,3. \quad (8.7)$$

Как видно из формулы (8.7), наблюдается прямо пропорциональная зависимость между размерами очага ГТУ, выраженная условным поперечным

размером его очага, и энергией события. В определенной степени формула (8.7) выражает закон самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях, установленный академиком М. А. Садовским с соавторами [12]. Очевидно, в соответствии с этим законом, показатель L (условный поперечный размер очага события) может характеризовать и другие формы динамических проявлений горного давления — горные удары, шелушения, стреляния и др. Следует заметить, что формула, подобная зависимости (8.7), получена А. А. Маловичко с соавторами [70] для солевых рудников:

$$\log S_d = 0,8M - 3,90, \quad (8.8)$$

где S_d — площадь обрушения, км²; M — магнитуда события (M_L или m_b).

Однако в работе А. А. Маловичко [70] не учтен такой важный параметр, как глубина разработки, который в условиях солевых месторождений играет весьма важную роль.

Нами на основании мировых данных об обрушениях на солевых месторождениях получена следующая зависимость энергии сейсмических событий от глубины разработки [19]:

$$M_L = 0,0026H + 3,35, \quad (8.9)$$

где M_L — энергия сейсмического события при обрушении в солерудниках, выраженная магнитудой M_L ; H — глубина обрушения, м.

Для рудных месторождений с гравитационно-тектоническим типом естественного напряженного состояния массивов зависимость энергии геодинамических событий от глубины разработки не установлена [19].

Горно-тектонические удары и сходные с ними по выделенной энергии ТЗ при горных работах — самые мощные геодинамические явления на рудниках. Энергетический уровень ГТУ и ТЗ не бывает выше $E = 10^{12}$ Дж [19], то есть по магнитудному уровню не бывает более $M = 5,0-5,5$, что обусловлено тем обстоятельством, что шахтные (рудничные) поля имеют ограниченные размеры. Протяженность шахтных полей обычно не превышает 10 км, а по объему не более 5 км³. Поэтому в рудниках не может накопиться больше потенциальной энергии для того, чтобы произошло сейсмическое событие с энергией $E > 10^{12}$ Дж.

Приведем определения динамических проявлений горного давления на рудниках [19, 44].

Горно-тектонический удар — мгновенное разрушение массива большой мощности по тектоническому нарушению или по вновь образовавшейся трещине под влиянием горных работ, вызывающее разрушение целиков и выработок, как правило, на больших площадях. ГТУ сопровождается сильным сотрясением массива, резким звуком, образованием пыли и воздушной волной в горных выработках.

Техногенное землетрясение — это динамическая подвижка пород большой мощности по тектоническому нарушению, происходящая в глубине массива, спровоцированная проведением горных выработок, вызывающая сильное сотрясение массива и поверхности, способная вызвать в горных выработках в ограниченных масштабах разрушение пород и крепи.

При ТЗ очаг события располагается за пределами горных выработок в массиве или только частично в пределах выработок. При ГТУ очаг события располагается непосредственно в пределах горных выработок. В этом состоит коренное отличие рассматриваемых явлений. Поскольку ГТУ происходят

непосредственно в горных выработках, их последствия обычно более тяжелы, чем последствия ТЗ на рудниках. ГТУ имеют обычно большую мощность (выделенную сейсмическую энергию), чем ТЗ. В то же время ТЗ происходят гораздо чаще: ГТУ составляют не более 5 % от числа сильных сейсмических событий, происходящих на рудных месторождениях [19]. Нет никакого различия в регистрации сейсмических событий в горных выработках для ТЗ или ГТУ сейсмическими методами, они регистрируются как сейсмические сигналы, той или иной магнитуды (энергии). Разница между этими понятиями заключается только в их последствиях для горных выработок, масштабам и значительности разрушений: при ГТУ обрушения пород в выработки, разрушения целиков и горных конструкций и т. п. велики, при ТЗ — незначительны или вообще отсутствуют. Таким образом, различие между ГТУ и ТЗ только в терминологии.

Горный удар — мгновенное хрупкое разрушение целика или краевой части массива, проявляющееся в виде выброса руды (породы) в подземные выработки с нарушением крепи, смещением машин, механизмов, оборудования и вызывающее нарушение технологического процесса. Удар сопровождается резким звуком, сильным сотрясением горного массива, образованием пыли и воздушной волной.

Микроудар — мгновенное разрушение целика или приконтурной части выработки, проявляющееся в виде выброса руды (породы) в подземные выработки, не вызывающее нарушение технологического процесса. Микроудар сопровождается сотрясением массива и образованием пыли.

Толчок — разрушение руды (породы) в глубине массива без выброса в горную выработку, сопровождающееся звуком, сотрясением массива, образованием пыли. Возможно падение заколов, особенно в зоне нарушенных пород, а также обрушение отдельных участков выработок.

Стреляние — отскакивание с резким звуком от массива линзовидных или с острыми краями пластин различных размеров.

Интенсивное заколообразование — возникновение заколов вслед за их оборкой, происходит по ненарушенному массиву, не связано с его видимой трещиноватостью (слоистостью, сланцеватостью) и сопровождается звуком. При этом образуются и отделяются от обнажения плиты, по форме повторяющие контур выработки.

Шелушение — разрушение породы по контуру выработки на отдельные пластины, имеющие чаще всего чечевицеобразную форму с заостренными краями. Место шелушения в выработке выглядит «свежим» из-за постоянного осыпания пластин.

Приведенные формы геодинамических проявлений горного давления в горных выработках рудников построены по порядку убывания их энергетических характеристик и размеров проявлений в выработках. Такой порядок соответствует закону самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях [12], формуле сейсмического момента в очаге (8.4) и формуле зависимости энергии события от размеров его очага (8.7). Как следует из формулы сейсмического момента в очаге события (8.4), его энергия прямо пропорционально зависит от величины подвижки δ и ее площади S . Для наиболее мощных событий (ГТУ на рудниках) установлены характерные величины подвижки в очаге (таблицы 8.5, 8.6). На основании закона самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях можно оценить величину подвижки при всех формах динамических явлений (табл. 8.7).

Таблица 8.6

Энергетические параметры ГТУ

Рудник	Дата события	Очаговые параметры		Модуль сдвига, т / м ²	Энергетические параметры		
		площадь подвиги, м ²	величина подвиги, м		энергетический класс, k	сейсмический момент, т · м	энергия, Дж
Кировский	16.04.1989	220000	0,06	$2,4 \cdot 10^6$	10,5	$3,9 \cdot 10^{12}$	$\sim 10^{11}$
«Умбозеро»	17.08.1999	300000	0,16	$2,4 \cdot 10^6$	11,8	$11,5 \cdot 10^{12}$	$\sim 10^{12}$

Таблица 8.7

Величина подвижек пород при различных динамических проявлениях
горного давления в горных выработках, см

ГТУ, ТЗ	Горный удар	Микроудар, толчок	Стреляние, динамическое заколообразование	Шелушение пород
~ 10	1–2	0,5–1,0	0,1–0,5	0,05–0,1

Сейсмические (динамические) события в горных выработках более мелкого энергетического класса (микроудары, толчки, стреляние пород) могут происходить без образования трещин разрыва, в отличие от ГТУ и ТЗ, но с проявлениями разрушения пород вблизи контура выработок. Как известно, проявления разрушений хрупких горных пород происходит при уровне относительных деформаций $1 \cdot 10^{-4}$. При поперечных размерах горных выработок 2–4 м абсолютная деформация пород составляет 0,2–0,4 мм. Столь малые величины деформаций, даже при разрушении пород на контуре выработок, обычно остаются незаметными, если не применять специальные высокоточные измерения. Поэтому вместо величины подвижек по трещине целесообразно определять энергетический уровень проявлений горного давления в выработках по суммарной площади этих проявлений. Тогда в соответствии с законом самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях официальные проявления сейсмичности на рудниках [44] могут быть квалифицированы следующим образом (табл. 8.8).

Таблица 8.8

Параметры динамических проявлений горного давления на рудниках

Вид проявлений	Энергетические параметры			Характерная площадь подвижки в очаге или проявлений в выработках, м ²
	магнитуда M_L	энергетичес- кий класс, k	энергия, Дж	
ГТУ, ТЗ	3–5	9–12	10^9 – 10^{12}	Более 100000
Горный удар	1–3	6–9	10^6 – 10^9	~ 100
Микроудар, толчок	0–1	4–6	10^4 – 10^6	10–50
Стреляние, заколообразование	-1–2	2–4	10^2 – 10^4	2–10
Шелушение	-2–3	0–2	1–10	1–2

Примечание. Энергия проявлений горного давления в выработках может уточняться по результатам фактических измерений.

Приведенная классификация позволяет количественно отличать динамические проявления горного давления на рудниках, поскольку в официальном документе [44] таких различий не дано.

Принципиальное отличие классификации геодинамических явлений на рудниках (см. табл. 8.8) от классификаций, предложенных ранее [62–64], состоит в том, что они рассчитаны на разные виды действующих в массиве напряжений.

Ранние классификации [62–64] рассчитаны на разрушающее действие вертикальных напряжений, обусловленных весом толщ покрывающих пород и учитывают только количество энергии, выделившейся при том или ином событии, без привязки к конкретным горно-геологическим условиям рудников [71]. В условиях угольных и солевых месторождений они, вероятно, могут быть использованы. Однако в условиях рудных месторождений, где превалирующую роль играют горизонтальные тектонические напряжения, эти классификации не могут быть применены. Поэтому в работе [71] не приведено конкретных примеров привязки указанных классификаций для объяснения примеров проявлений горного давления.

Классификация в табл. 8.8 основана на превалирующем действии в массивах рудников горизонтальных тектонических сил с учетом конкретных примеров проявления ГТУ в условиях действующих рудников и потому удовлетворяет современным условиям удароопасных рудных месторождений. Она в той или иной мере должна быть введена в действующие инструктивные документы для эксплуатации таких месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий возникновения и последствий ГТУ 17.08.1999 г. на руднике «Умбозеро» позволил установить новые закономерности проявления опасности горных ударов на рудных месторождениях. Он показал, что, наряду с такими факторами, как физико-механические свойства пород, геологическое строение массивов и их геолого-структурная нарушенность, фактор тектонической напряженности массивов является одним из важнейших при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений и рудников, его учет может привести к негативным последствиям более крупного масштаба, чем в тех случаях, когда тектонические напряжения в массиве отсутствуют. Свидетельством этого является ГТУ 17.08.2999 г. на руднике «Умбозеро» в высоко тектонически напряженном массиве, сильнейшее событие по энергии и негативным последствиям за всю историю эксплуатации шахт и рудников России. Между тем, в современных инструктивных документах Ростехнадзора Российской Федерации по предупреждению опасности горных ударов на рудниках этот фактор не только не учитывается, но даже не упоминается, что является одним из их недостатков и требует корректировки.

На основе исследования обстоятельств подготовки и происхождения ГТУ на руднике «Умбозеро» выдвинута новая концепция механизма геодинамических проявлений горного давления на рудниках — горно-тектонических, горных ударов и других геодинамических явлений. Они подчиняются сейсмологическому закону самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях, который одинаков как для сейсмологии, так и для шахтной сейсмичности, а их энергию можно рассчитывать по формулам сейсмического момента в очаге события. Расчетами по параметрам площади и величине подвижек ГТУ на руднике «Умбозеро» и Кировском руднике Хибинского апатитового месторождения показано, что энергетические характеристики этих событий подчиняются законам сейсмического момента в их очагах. Таким образом подтверждено, что процессы в очагах землетрясений и в очагах ГТУ на рудниках происходят по одним и тем же закономерностям.

Установлено, что площади (объемы) подвижек при геодинамических событиях соответствуют площади (объему) их проявлений в горных выработках. В свою очередь, показано, что область видимых проявлений геодинамического события в горных выработках является очагом этого события. На основании данных о параметрах очага геодинамического события и величине подвижек пород при нем разработана новая классификация геодинамических явлений на рудниках, критериями разграничения событий в которой являются энергия событий и площадь (объем) их проявлений в горных выработках, которая позволяет количественно отличать различные виды динамических проявлений горного давления в горных выработках друг от друга, что не учтено в нынешних инструктивных документах Ростехнадзора Российской Федерации по предупреждению опасности горных ударов на рудниках.

Анализ обстоятельств происхождения ГТУ 17.08.1999 г. позволил выявить другие недостатки в существующей инструкции Ростехнадзора Российской Федерации. Ошибочным является принцип отнесения

месторождений к опасным по горным ударам по глубине их расположения до поверхности в тектонически напряженных массивах. В настоящей работе показано, что согласно этому принципу при гравитационном напряженном состоянии массивов удароопасные ситуации на рудниках должны возникать начиная с глубин 2000–2500 м от дневной поверхности. На руднике «Умбозеро» в тектонически напряженном массиве такая ситуация возникла с глубин 200–400 м от дневной поверхности и привела к тяжелейшему ГТУ в горных выработках. На ряде других месторождений опасность по горным ударам возникает с глубин 150–200 м от поверхности, что также доказывает ошибочность данного принципа для тектонически напряженных массивов и требует его пересмотра. Практика эксплуатации рудника «Умбозеро» и других рудников показала, что степень удароопасности участков шахтных полей должна определяться не глубиной их до поверхности, а величиной и направлением действия тектонических сил в массиве и регулироваться конструкцией и направлением осей горных выработок.

Горно-тектонический удар на руднике «Умбозеро» показал ошибочность положения инструкции Ростехнадзора Российской Федерации о защитных рудных залежах и защитных зонах при отработке сближенных рудных залежей. Анализ условий проявления ГТУ позволил установить, что отработка сближенных залежей в тектонически напряженных массивах не только не снижает опасность горных ударов на соседней сближенной залежи, но даже увеличивает эту опасность, приводит к формированию очага наиболее тяжелого подземного геодинамического явления (ГТУ), которое формируется в междупластье залежей.

Режимные деформационные наблюдения на руднике «Умбозеро» показали, что наиболее надежными предвестниками ГТУ во времени являются изменения линейных микродеформаций пород в массиве совместно с режимными наблюдениями интенсивности сейсмоакустических импульсов. Микродеформации пород изменяются по величине на порядок в направлении очага ГТУ за несколько месяцев до момента самого удара. Несколько случаев таких предвестников инструментально зарегистрировано в контрольно-наблюдательном приборном комплексе на руднике «Умбозеро». Практика деформационных наблюдений на руднике «Умбозеро» доказывает, что метод режимных высокоточных деформометрических наблюдений позволяет прогнозировать моменты ГТУ во времени, что другими методами невозможно. По эксплуатации Ловозерского редкометалльного месторождения видно, что при наличии в массиве больших тектонических напряжений асейсмичный участок земной коры при ведении подземных горных работ в нем за счет техногенной сейсмичности может превратиться в сейсмически активную зону, как это произошло с Ловозерским массивом на Кольском полуострове. По окончании горных работ, как показывает практика эксплуатации рудника «Умбозеро», техногенная сейсмичность массива постепенно затухает. Релаксация напряжений вокруг подземных выработок при этом может происходить в виде отдельных сильных сейсмических событий с магнитудой до $M = 3$. Геодинамический режим массива оживляется при затоплении водой подземных выработок рудника за счет смачивания поверхностей трещин, образовавшихся при предыдущих сейсмических событиях. Оживление сейсмической активности происходит непосредственно в период затопления выработок. В дальнейшем геодинамический режим с затопленными выработками снова приходит в спокойное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев А. А., Ловчиков А. В., Кузьмин И. А. Сильнейшее техногенное землетрясение на российских рудниках, 17 августа 1999 г., рудник «Умбозеро» (Кольский полуостров) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 6. С. 169–173.
2. Козырев А. А., Ловчиков А. В., Пернацкий С. И., Шершеневич В. А. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты // Горный журнал. 2002. № 1. С. 43–49.
3. Словарь русского языка. В 4 т. М.: Государственное издательство иностранных и национальных словарей, 1957. Т. 1. 964 с.
4. Горная энциклопедия М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. С. 361–371.
5. Большая российская энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия, 2008. Т. 10. С. 387.
6. Адушкин В. В. О классификации техногенной сейсмичности // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: сб. докл. междунар. совещ. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2004. Ч. 1. С. 10–19.
7. Старовойт О. Е. Сейсмический мониторинг России // Наука и технология в России. 2006. № 3–4 (80–81). С. 20–25.
8. Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М.: Мир, 1988. 320 с.
9. Задание сейсмических воздействий. М.: Наука, 1993, 156 с. (Вопросы инж. сейсмологии, Вып. 34).
10. Рихтер К. Ф. Инструментальная шкала для магнитуд землетрясений // Слабые землетрясения. М.: ИЛ, 1961. С. 13–44.
11. Геологический словарь. М.: Недра, 1978. Т. 2. С. 43.
12. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
13. Никонов А. А. Землетрясения... : Прошлое, современность, прогноз. М.: Знание, 1984. 192 с.
14. Ловчиков А. В. Параметры очагов сильнейших горно-тектонических ударов на рудниках России // Горный журнал. 2000. № 2. С. 9–11.
15. Ловчиков А. В. Оценка геодинамической опасности месторождений по энергии сейсмических проявлений в рудниках // Горный журнал. 2004. № 10. С. 43–47.
16. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976.
17. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 301 с.
18. Ловчиков А. В. Рациональная классификация структурно-блоковой неоднородности массивов для рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 6. С. 226–230.
19. Ловчиков А. В. Сильнейшие землетрясения и горно-тектонические удары в рудниках России: монография. Саарбрюкен: Palmarium Academic Publishing, 2016. 141 с.

20. Щуплецов Ю. П., Дорошенко В. И., Аксенов А. А. и др. Обоснование классификации динамических явлений при подземной разработке полезных ископаемых // Горный журнал. 2005. № 6. С. 18–22.
21. Горное дело: терминологический словарь / Г. Д. Лидин, Л. Д. Воронина, Д. Р. Каплунов и др. 4-е изд. М.: Недра, 1990. 694 с.
22. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.
23. Терминологический словарь по маркшейдерскому делу / под ред. А. Н. Омельченко. М.: Недра, 1987. 190 с.
24. Козырев А. А., Иванов В. И., Панин В. И. и др. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. Ч. 2. 162 с.
25. Сейсмичность при горных работах / коллектив авторов. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. 325 с.
26. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 68–73.
27. Габсатарова И. П. Определение магнитуды M_{LV} по поверхностным волнам региональных событий Кольского полуострова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат-лы 6-й Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 107–113.
28. Коломиец А. С., Баранов С. В. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Обнинск: ФЦП, 2005. С. 195–199.
29. Савченко С. Н., Ловчиков А. В., Козырев А. А. Ретроспективный анализ очага техногенного землетрясения на руднике «Умбозеро» 17.08.1999 г. // Техногенная сейсмичность при горных работах. Модели очагов, прогноз, профилактика: сб. докл. междунар. совещ. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2004. Ч. 1. С. 170–179.
30. Козырев А. А., Иванов В. И., Ерухимов А. Х., Кузьмин И. А. Прогноз и профилактика удароопасности месторождений на основе учета тектонических сил и автоматизированного контроля напряженного состояния и сейсмической активности массива пород // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты: КФ АН СССР, 1987. С. 22–34.
31. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 212 с.
32. Ловчиков А. В., Козырев А. А. Напряженное состояние Ловозерского массива на нижних горизонтах отрабатываемых рудных залежей // Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1989. С. 19–25.
33. Дианов В. М., Катков Ю. Р. Поддержание горных выработок в скальных породах на больших глубинах / под ред. Ю. В. Демидова. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1990. 112 с.
34. Марков Г. А., Ловчиков А. В., Еремин В. И. Повышение устойчивости выработок в условиях влияния тектонических сил // Цветная металлургия. 1980. № 16. С. 5–8.

35. Марков Г. А., Савченко С. Н. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. Л.: Наука, 1984. 140 с.
36. Бессонов И. И., Боборыкин В. Н., Калашник А. И. и др. Совершенствование технологии подземной разработки маломощных рудных месторождений Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КНЦ АН СССР, 1989. 156 с.
37. Кременецкая Е. О., Кузьмин И. А., Асминг В. Э. и др. Создание базы данных о сейсмичности Баренц-региона // Теоретические и прикладные модели информатизации региона. Апатиты, 2000. С. 44–49.
38. Ловчиков А. В., Асминг В. Э. Изменение геодинамического режима Ловозерского массива (Кольский полуостров) под влиянием горных работ // Труды 8-го Международного симпозиума «Горное дело в Арктике» (Апатиты, 20–23 июня 2005 г.). СПб.: Типография «Иван Федоров», 2005. С. 53–60.
39. Ловчиков А. В., Гуменников В. П., Ивахно В. Я. Анализ явлений, предшествовавших горно-тектоническим ударам в Ловозерском массиве // ФТПРПИ. 1993. № 1. С. 13–22.
40. Козырев А. А., Иванов В. И., Панин В. И. и др. Причины и следствия горно-тектонических ударов на руднике «Умбозеро» и Ловозерском массиве // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты, 1993. С. 58–67.
41. Тряпицын В. М., Сырников Н. М. Особенности проявления горного давления при отработке месторождений в высоконапряженных тектонически нарушенных массивах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1991. № 5. С. 101–107.
42. Петухов И. М., Линьков А. М., Фельдман И. А. и др. Защитные пласты. М.: Недра, 1972. 424 с.
43. Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С., Фельдман И. А. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 224 с.
44. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомной надзору от 2 декабря 2013 г., № 576.
45. Zoback Mary Lou, Zoback Mark D., Amadei J. et al. Global Patterns of Tectonic Stress // Nature. 1989. V. 341, No. 6240. P. 291–298.
46. Ловчиков А. В., Жданов Р. И., Сырников Н. М., Васильева Т. В. Оценка напряженного состояния и устойчивости камерно-целиковой системы разработки в условиях рудника «Умбозеро» // Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КФАН СССР, 1988. С. 68–74.
47. Ловчиков А. В., Савченко С. Н. Защитные залежи в поле тектонических сил // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2015. № 2. С. 128–132.
48. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Ловчиков А. В. Напряженное состояние пород в Ловозерском массиве // Разработка рудных месторождений Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КФАН СССР, 1973. С. 3–11.

49. Захаров В. В., Осика В. И., Баглаев В. И. Специализированный геомеханический полигон в контрольно-наблюдательном квершлага рудника «Умбозеро», его оборудование и функциональные возможности // Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова. Апатиты: Изд. КФАН СССР, 1988. С. 80–85.
50. Захаров В. В., Калашник А. И., Ловчиков А. В., Осика В. И., Попов Е. А. Система деформационных наблюдений на руднике «Карнасурт» // Техника натурального геомеханического эксперимента. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. С. 45–51.
51. Асминг В. Э., Виноградов Ю. А., Воронин А. И. и др. Система сбора и обработки данных Кольского филиала ГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат-лы 6-й Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 31–34.
52. Ловчиков А. В., Гуменников В. П. Геодинамическое районирование Ловозерского редкометалльного месторождения (Кольский полуостров) // Материалы международной конференции «Экология северных территорий России. Проблема, прогноз ситуации, пути развития, решения» (17–22 июня 2002 г.). Архангельск: Ин-т экономических проблем Севера, 2002. С. 43–48.
53. Ловчиков А. В. Анализ механизма очага сильного сейсмического события, происшедшего в период консервации рудника // Доклады международной конференции «Геомеханика в горном деле — 2005» (Екатеринбург, 5–7 июля 2005 г.). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2005. С. 277–285.
54. Ловчиков А. В. Исследование сейсмичности, вызванной санкционированным затоплением подземного рудника // Горный журнал. 2010. № 9. С. 47–50.
55. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
56. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. М.: Недра, 1975. 279 с.
57. Ломакин В. С., Халевин Н. И. Горно-тектонические удары в реальной сейсмичности Урала // Геодинамическая безопасность при освоении недр и земной поверхности. Апатиты: Изд. КНФ РАН, 2002. С. 79–89.
58. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.
59. Ловчиков А. В. Различие в опасности горных ударов на рудниках и угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. № 4. С. 105–111.
60. Ловчиков А. В. Горно-тектонические удары на российских рудниках: статистика и некоторые закономерности // ФТПРПИ. 1997. № 2. С. 22–32.
61. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
62. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И. К вопросу о классификации горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1986. № 5. С. 2–11.
63. Смирнов В. А., Иванов-Ростовцев А. Т., Колотило Л. Г. Межблоковая саморегуляция в иерархии структур земной коры // Доклады РАН. 1992. Т. 323, № 4. С. 664–666.

64. Турчанинов И. А., Иофис А. М., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1977. 503 с.
65. Беньяски З. Управление горным давлением: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 254 с.
66. Справочное пособие для служб прогноза и предотвращения горных ударов на шахтах и рудниках / П. В. Егоров, В. В. Иванов, В. В. Дырдин и др.; под ред. П. В. Егорова. М.: Недра, 1995. 240 с.
67. Ловчиков А. В. Различие в опасности горных ударов на рудниках и угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. № 4. С. 105–111.
68. Никонов А. А. Землетрясения (прошлое, современность, прогноз). М.: Знание, 1984 (Наука и прогресс). 192 с.
69. Gibovicz S. J. Keynote lecture: The mechanism of Seismic events induced by mining. A review // Rockburst and seismicity in mines. Rotterdam: Balkema, 1990. P. 3–27.
70. Malovichko A. A., Malovichko D. A., Dyagilev R. A., Shulakov D. J. Keynote Lecture: Multi Scale Seismicity at Potash Mines, Fifteen Years of the Seismic Monitoring at Verkhnekamskoje Deposit // Proceeding of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSim8). Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Mining Institute of Ural Ranch of Russian Academy of Sciences, Obninsk ; Perm, 2013. P. 463–473.
71. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / под ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина, К. Н. Трубецкого. М.: Изд. АГН, 1997. 376 с.

ISBN 978-5-91137-456-3

