# А. Д. Сашурин

# СДВИЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД НА РУДНИКАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Сашурин А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. 268 с.

ISBN 5-7691-0897-5

В книге приведен исторический очерк развития науки о сдвижении горных пород, обобщены особенности проявления процесса сдвижения горных пород при разработке рудных месторождений подземным способом. Изложено обоснование геомеханической модели процесса сдвижения, основанной на взаимосвязи сдвижения горных пород с закономерностями формирования вторичного поля напряжений в области влияния подземной разработки. Приведены результаты экспериментальной проверки теоретических разработок в промышленных условиях, описаны примеры решения практических задач охраны сооружений на уральских рудниках.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованием сдвижения горных пород и защитой сооружений от вредного влияния горных разработок.

Ил. 96, табл. 38, список лит. 154 назв.

Ответственный редактор доктор технических наук **А. В. Зубков** Рецензенты: д. т. н. **Н. П. Влох,** 

к. т. н. В. П. Самария

ISBN 5-7691-0897-5

С <u>ПРП-1999—165(98)</u> 8Пб(03)1998 ПВ-1999

© Сашурин А. Д., 1999.

Основную часть потребности в сырье современное человеческое общество удовлетворяет за счет добычи полезных ископаемых открытым и подземным способами. Причем масштабы добычи нарастают стремительными темпами, и вследствие истощения запасов месторождений с неглубоким залеганием подземные горные разработки уходят на большие глубины.

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с безусловным нарушением равновесия в массиве горных пород, которое в зависимости от параметров и технологии разработки может либо локализоваться внутри массива горных пород, либо проявиться на земной поверхности в виде провалов, террас, трещин и зон плавных деформаций. Весь комплекс явлений, связанных с деформированием массива горных пород и нарушением земной поверхности в области влияния горных разработок, в горном деле объединяется общим понятием — процесс сдвижения горных пород.

Актуальность проблем сдвижения горных пород сохраняется на протяжении всей истории развития горного дела и обусловлена опасностью разрушения от воздействия процесса сдвижения как сооружений горных предприятий, так и окружающих промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, а также природных объектов, попадающих в зону влияния подземных разработок. Наряду с разрушениями подрабатываемых объектов, процесс сдвижения нередко создает опасность и для самих горных работ, в частности, образование зон обрушения и водопроводящих трещин при выемке полезного ископаемого под реками, озерами и водоемами или при наличии карстов, обводненных пород, плывунов и т. п. может привести к прорыву вод и затоплению горных выработок.

Просчеты и необоснованность решений проблем, вызванных влиянием подземных разработок, оборачивается, как правило, экономическим ущербом, а нередко и человеческими жертвами. Из крупных катастрофических проявлений процесса сдвижения на горнодобывающих предприятиях конца XIX и начала XX столетий в литературе описаны случаи затопления через зону обрушения поверхностными водами от сильных снегопадов и оттепели угольной шахты в штате Иллионойс (США) с гибелью 61 человека; затопления по образовавшимся водопроводящим трещинам соляных рудников Стассфурта, Леопольцсгалле, Мекленбурга; массового обрушения подработанной поверхности в г. Брюке (Богемия), разрушившего более 60 домов и оставившего без крова около 2000 человек; затопления двух японских шахт, разрабатывавших угольные пласты под океаном, с гибелью 237 человек [1, 2].

Недостаточная изученность негативных последствий процесса сдвижения нередка и на современных горнодобывающих предприятиях. В 1947 г. канадская шахта "Жозефин" была полностью затоплена илом из подработанного ложа осушенного озера [3]. Прорывы обводненных глин через зоны обрушения неоднократно имели место на угольных шахтах Кузбасса, на Шерегешском и Гороблагодатском железорудных месторождениях [4, 5]. Глинистая пульпа на Шерегешском руднике прорвалась в отрабатываемый блок и заполнила около 800 м горных выработок. Большой урон отечественным горнодобывающим предприятиям был нанесен в послевоенное время в связи с интенсивным углублением горных работ на рудных предприятиях Урала, Криворожского бассейна, Горной Шории и других районов страны [4]. Многие основные сооружения рудников, включая главные подъемные и вентиляционные стволы, компрессорные, вентиляторы и другие объекты, находившиеся в лежачем боку залежей и считавшиеся в безопасности, оказались в зоне опасных сдвижений. Серьезные просчеты в расположении промплощадки были допущены при проектировании крупнейшей на Урале железорудной шахты Северопесчанской, на которой через пять лет после начала разработки углы сдвижения пород лежачего бока выположились против проектных на 15-17°. В предохранительных целиках, оставленных для сохранения промышленного комплекса центральных стволов шахты, оказалось 24 млн т руды, или почти 12 % запасов месторождения.

Наряду с неудачными случаями решения вопросов сдвижения горных пород, в горной практике имеется много примеров успешной выемки полезного ископаемого под разнообразными сооружениями. Как правило, в этих случаях горные работы проводились по специальным проектам, учитывающим вредные последствия горных разработок и предусматривающим мероприятия по снижению величин деформаций и конструктивные усиления подрабатываемых сооружений.

Отрицательно сказывается на эффективности использования недр консервация и дополнительные потери полезного ископаемого в предохранительных целиках, оставляемых под охраняемыми объектами для предотвращения опасного влияния процесса сдвижения. На железорудных, хромитовых, марганцевых месторождениях Урала и Казахстана, разрабатываемых подземным способом, законсервировано около 180 млн т руды, что затрудняет поддержание производственных мощностей шахт.

При углублении горных работ геомеханические проблемы, связанные со сдвижением горных пород, приобретают, особую актуальность в связи с увеличением масштабов происходящих процессов. На Урале и в Казахстане, где подземная добыча руд черных металлов в настоящее время производится 14 шахтами общей мощностью около 20 млн т сырой руды в год, в ряде случаев глубина разработки превысила 500 м и в перспективе составит 1000 м и более.

Таким образом, проблемы в области сдвижения горных пород, остро стоявшие на протяжении всей истории подземной разработки полезных ископаемых и приобретавшие все большее значение в современной горной промышленности в связи с расширением масштабов добычи и освоением глубокозалегающих месторождений со сложными горнотехническими условиями, относятся к разряду важнейших. От решения их в значительной мере зависит выполнение основной цели горной науки"... создать наиболее совершенные технические средства и технологические способы и приемы для достижения наиболее безопасной и экономичной разработки полезных ископаемых при всемерном облегчении труда шахтеров" [6].

Точная характеристика роли и места сдвижения горных пород в развитии подземной разработки полезных ископаемых дана И. М. Бахуриным: "Сдвижение пород в руднике является одним из основных затруднений при добыче полезного ископаемого. Оно же является одной из основных угроз безопасному ведению горных разработок: оно ломает крепление, уменьшает полезное сечение выработок, а иногда и совершено заваливает их. Мы не ошибемся, если скажем, что вся история горного дела, вся история изыскания наилучших систем разработок есть история борьбы со сдвижением горных пород" [1].

Среди многочисленных проблем, порождаемых проявлениями процесса сдвижения, расчет его параметров для проектирования мер охраны подрабатываемых объектов играет первостепенную роль в обеспечении безопасности и эффективности подземной разработки месторождений. Особая острота проблемы прогнозных расчетов сдвижений горных пород на современных рудных предприятиях обусловлена быстрым ростом их мощности, вовлечением в разработку глубоких горизонтов и освоением месторождений в застроенных районах.

Процесс сдвижения горных пород на рудных месторождениях, обладая определенной общностью с аналогичными явлениями на месторождениях других видов минерального сырья, обладает рядом особенностей, обусловленных, главным образом, параметрами рудных тел, свойствами и состоянием вмещающих пород, технологией разработки. Для большинства железорудных, хромитовых, марганцевых и других месторождений, разрабатываемых подземным способом, характерны большие размеры рудных тел, сопоставимые с глубиной их залегания, скальные вмещающие породы с тектоническими полями напряжений, нередко анизотропными, и системы разработки с обрушением вмещающих пород. В этих условиях подземная разработка, как правило, сопровождается образованием зоны обрушения. Зоны трещин и плавных деформаций, в силу жесткости вмещающих пород, проявляясь слабо на начальной стадии разработки месторождения, развиваются лишь при достижении определенных глубин разработки, что предопределяет специфику методик исследования, рабочих гипотез и теоретических положений.

В практике решения проблем охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок рудных месторождений для определения параметров процесса сдвижения используется метод аналогий, основывающийся на классификации месторождений по горногеологическим условиям разработки. Но большое число факторов, влияющих на параметры процесса сдвижения, и недостаточная изученность взаимосвязей, часто имеющих лишь качественный характер, не обеспечивают надежного прогнозирования параметров процесса сдвижения. Однако длительное применение метода аналогии обеспечило накопление большого объема результатов инструментальных наблюдений за процессом сдвижения в разнообразных условиях разработки, в том числе при различных параметрах первоначального напряженного состояния. Накопление информации подготовило очередной шаг в повышении достоверности прогнозирования параметров процесса сдвижения за счет применения геомеханических представлений об изменении напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зоне влияния подземных выработок и позволило перевести прогнозирование из области аналогий на качественно новую ступень аналитических расчетов.

В представленной работе рассматриваются проблемы, связанные с проявлениями процесса сдвижения скальных массивов горных пород при подземной разработке мощных рудных месторождений системами с обрушением вмещающих пород. Указанные условия присущи широкому кругу разрабатываемых рудных месторождений черной и цветной металлургии. Так, например, в регионе Урала и Казахстана, где выполнялись экспериментальные исследования, из четырнадцати разрабатываемых месторождений руд черных металлов к рассматриваемому виду относятся двенадцать. Лишь Соколовский подземный рудник ССГПО и шахта Центральная Джездинского РУ ведут разработку с поддержанием налегающей толщи, соответственно, твердеющей закладной и целиками.

Промышленные исследования, описанные в работе, проводились на уральских рудниках, где автор встречал поддержку и заинтересованность в реализации рекомендаций и предложений по охране объектов от вредного влияния подземных разработок, в проведении инструментальных наблюдений. Автор искренне признателен работникам Богословского и Гороблагодатского рудоуправлений, Высокогорского ГОКа, Управления Уральского округа Госгортехнадзора России, института Уралгипроруда и коллегам по работе в ИГД УрО РАН: В. Е. Боликову, В. А. Беркутову, Н. П. Влоху, А. В. Зубкову, В. П. Драскову, В. П. Леликову, Я. И. Липину и др. Особую признательность автор питает к маркшейдерам-практикам: П. Н. Бессольникову, И. Ф. Дедюхиной, В. Ф. Мединникову, а также технологам Н. Д. Дацковскому, Ю. А. Дергачеву, В. Г. Орлову, Г. П. Скакуну, В. А. Фоминых.

Важную роль в подтверждении достоверности основных научных положений работы сыграли инструментальные наблюдения, выполненные на железорудных месторождениях Урала в 1957— 1971 гг. сотрудниками Уральского филиала ВНИМИ, позволившие совместно с последующими наблюдениями Института горного дела Минчермета СССР проследить развитие процесса сдвижения больше чем за четверть века.

С особой теплотой автор отмечает роль своих первых научных наставников М. Л. Рудакова и А. А. Иливицкого, привлекших в свое время внимание к основным идеям работы.

## ПРОБЛЕМЫ СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

# 1.1. Проявления сдвижения горных пород от подземных разработок рудных месторождений

Смещения земной поверхности и горных пород под воздействием естественных и антропогенных факторов встречаются во многих областях практической деятельности. Тектонические процессы в земной коре, искусственное изменение уровня подземных вод, добыча нефти и газа, разработка месторождений твердых полезных ископаемых — все это вызывает значительные вертикальные и горизонтальные сдвижения горных пород. Так, вертикальные оседания в результате интенсивных откачек подземных вод, добычи нефти и газа достигают 0,5 м в год, а в районах городов Токио, Лондон, Мехико суммарные оседания от использования подземных вод для водоснабжения в настоящее время достигли 7—11 м [7]. При тектонических процессах, кроме катастрофических форм их проявления, сдвижения имеют меньшие величины, составляя от нескольких миллиметров до десятков сантиметров в год [8—11].

Вертикальные и горизонтальные перемещения, вызванные тектоническими процессами, площадными нарушениями гидрогеологического режима и разработкой месторождений полезных ископаемых геотехнологическими способами имеют, как правило, невысокий градиент, не представляющий опасности для большинства объектов, попадающих в зону их влияния, поэтому внимание к ним было привлечено сравнительно недавно в связи с изучением сейсмических явлений, вызванных техногенной деятельностью [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Подземная разработка месторождений твердых полезных ископаемых вызывает более интенсивные деформации и сдвижения, влияющие непосредственно на безопасность окружающих объектов и самих горных работ, поэтому проблемы по обеспечению безопасности подземных разработок и снижению их вредного влияния на окружающую среду возникли гораздо раньше и на протяжении более пятисот лет не теряют своей актуальности. П. М. Леонтовский [2] и С. Г. Авершин [13] отмечали, что некоторые законодательные положения в области охраны поверхности от вредного влияния подземных разработок были приняты еще в XV веке. Так, например, известны бельгийские законы, разрешавшие производить горные работы под Льежем на глубинах не менее 100 м и грозившие смертной казнью за приближение разработок к водоносным слоям, питавшим город водою.

Проведение выработок и образование пустот в разрабатываемых залежах и вмещающих породах нарушает существовавшее в них равновесие, вызывая развитие сдвижений и деформаций. В зависимости от размеров выработанного пространства процесс сдвижения может достигнуть земной поверхности. Из практики известно, что изменения напряженного состояния и сдвижения массива горных пород и земной поверхности проявляются на значительных расстояниях, превышающих, иногда, в несколько раз размеры разрабатываемых участков.

Таким образом, в современной научно-технической литературе под сдвижением горных пород и земной поверхности в широком смысле понимают перемещения и деформации, вызванные нарушением равновесия в массиве горных пород под влиянием антропогенной деятельности по добыче различного вида полезных ископаемых или развитием природных процессов и явлений [4, 14, 15]. В данной работе сдвижения горных пород и земной поверхности рассматриваются применительно к более узкому кругу вопросов, связанных с подземной разработкой месторождений руд черных металлов системами с обрушением вмещающих пород. Особенности развития процесса сдвижения на этих месторождениях, основной из которых является обязательное образование зоны обрушения, обусловлены параметрами рудных тел, применяемой технологией разработки и свойствами вмещающих пород. Аналогичным образом развивается процесс сдвижения и при разработке системами с обрушением других видов рудного сырья со сходными горно-геологическими условиями.

Основные современные представления о процессе сдвижения горных пород на рудных месторождениях изложены в обобщающей коллективной работе [4], действующих правилах охраны сооружений для горнодобывающих регионов страны [16—20], в инструкции по наблюдению за сдвижениями на рудных месторождениях [21] и в общирной производственной и научной литературе.



Рис. 1.1. Основные зоны сдвижения в массиве горных пород: 1 — провал; 2 — зона обрушения; 3 — зона разгрузки; 4 — зона трещин; 5 — зона плавных сдвижений; 6 — зона опорного давления; 7 — выработанное пространство

В соответствии с отмеченной выше особенностью развития процесса сдвижения, предполагается в общем случае, что при разработке рудных месторождений в массиве горных пород и на земной поверхности образуются зоны и области, представленные на рис. 1.1 [4].

В области влияния подземных разработок в массиве горных пород возникают основные виды деформаций — изгиб, сдвиг, растяжение и сжатие, которые в зависимости от интенсивности проявляются в виде плавных сдвижений без нарушения сплошности, с образованием трещин и в форме обрушения. Часть земной поверхности, подвергшаяся воздействию указанных форм проявления процесса сдвижения, называют мульдой сдвижения. Сохраняя общие черты геомеханической модели месторождения, характер процесса сдвижения и его параметры зависят в первую очередь от строения вмещающих пород. В скальном массиве различают слоистые и неслоистые породы. При разработке месторождения в слоистой толще вмещающих пород в почве и кровле выработанного пространства породы частично освобождаются от напряжений и оказываются в зоне разгрузки (см. рис. 1.1). Вес пород, зависших над выработанным пространством, воспринимается массивом горных пород по контуру выработок, где образуются зоны опорного давления. В зоне разгрузки возникают напряжения и деформации растяжения, а в зонах опорного давления — деформация сжатия по нормали к напластованию.

После достижения выработкой предельного пролета прогибающиеся слои кровли обрушаются последовательно снизу вверх и при достаточных размерах выработанного пространства обрушение выходит на земную поверхность. Контур зоны обрушения на земной поверхности в большинстве случаев не выходит далеко за пределы проекции горных работ на горизонтальную плоскость. Если размеры выработанного пространства остаются небольшими по сравнению с глубиной разработки, то процесс обрушения может не достигнуть земной поверхности. Над пологопадающими залежами малой и средней мощности зона обрушения обычно распространяется не более чем на их 3–4-кратную мощность, причем признаком обрушения считается нарушение первичной структуры пород, разделение их на не связанные друг с другом элементы — куски, блоки.

Зону обрушения, как правило, окаймляет зона трещин, возникающих под действием растягивающих напряжений в изгибающихся слоях. Трещины разрыва направлены по нормали к пластованию и имеют прерывистый характер, обусловленный чередованием зон растяжения и сжатия в изогнутых слоях. Кроме трещин разрыва в слоистых породах наблюдаются трещины расслоения и послойные сдвиги. Сдвиг по поверхности напластования может происходить в породах лежачего бока при разработке мощных крутопадающих залежей. Сдвиг и сползание массива горных пород в сторону выработанного пространства может происходить также по поверхностям геологических нарушений и по поверхностям ослабления массива, образуемым крупной и мелкой трещиноватостью с выдержанными элементами залегания после нарушения равновесия по поверхностям ослабления.

Краевая часть мульды сдвижения представляет собой зону плавных сдвижений, механизм образования которой связывается с отмеченным выше сжатием пород над целиками по нормали к напластованию Часть веса слоев, зависших над выработкой, передается породам над целиками, создавая зоны опорного давления с повышенными сжимающими напряжениями. Оседания земной поверхности являются суммой сжимающих деформаций по нормали к напластованию и увеличиваются от границы мульды сдвижения к зоне трещин, поэтому земная поверхность и горные породы сдвигаются в форме изгиба.

При выемке залежи в неслоистых вмещающих породах над выработкой так же, как и при обрушении слоистого массива, по достижении предельного пролета образуется свод. Однако потеря равновесия и обрушение неслоистых пород кровли происходят в результате их отрыва и сдвига под воздействием силы тяжести по поверхностям ослабления массива, образуемым крупной и мелкой трещиноватостью и геологическими нарушениями.

Если зона обрушения не распространяется до земной поверхности, то интенсивность подвижек структурных блоков, образуемых трещиноватостью, постепенно уменьшается, и зона обрушения переходит в зону трещин. Такой же переход происходит и в горизонтальной плоскости в случае выхода обрушения на земную поверхность.

Неслоистые вмещающие породы, как правило, отличаются большой крепостью и незначительной деформируемостью. Этим объясняется незначительное развитие зоны плавных сдвижений при малой и средней глубине разработки.

Таким образом, основное различие между развитием процесса сдвижения в слоистой и неслоистой толще состоит в механизме разрушения и в характере их деформирования. В общем случае при достаточных размерах рудного тела внутри массива вмещающих пород и на земной поверхности образуются зона обрушения, зона трещин и зона плавных деформаций.

В теории и практике охраны сооружений для характеристики различных сторон процесса сдвижения применяют свыше полутора десятков параметров, которые условно можно разбить на следующие группы: 1) угловые параметры (граничные углы, углы сдвижения, углы разрывов, углы обрушения, углы воронкообразования); 2) деформации и сдвижения пород и земной поверхности (оседания, наклон, кривизна, горизонтальные сдвижения, растяжение или сжатис); 3) временные параметры (продолжительность процесса сдвижения, скорость деформаций и сдвижений, период опасных деформаций).

Угловые параметры характеризуют взаимное расположение границ подземной разработки с границами характерных зон мульды сдвижения на земной поверхности. Обычно это внешние относительно выработанного пространства углы, образованные на вертикальных разрезах горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границы выработанного пространства с границами соответствующих характерных зон на контакте коренных пород с наносами. В соответствии с зонами, выделяемыми в мульде сдвижения, среди угловых параметров различают углы воронкообразования и обрушения, углы разрывов, углы сдвижения и граничные углы. Все угловые параметры являются условными показателями, применяемыми только для построения границ предохранительных целиков и соответствующих зон на поверхности, а построенные с их помощью накловные линии и плоскости не отражают действительных границ в массиве горных пород.

Параметры смещений и деформаций характеризуют вертикальные и горизонтальные сдвижения и деформации земной поверхности и вмещающих пород. В практике из известных в механике сплошной среды компонентов смещений и деформаций широкое применение получили вертикальные и горизонтальные сдвижения, деформации растяжения или сжатия, наклон и кривизна. В отличие от предыдущей группы, указанные параметры характеризуют действительные механические явления, протекающие в массиве горных пород в результате нарушения равновесия при ведении подземной разработки месторождения.

Третья группа параметров характеризует развитие процесса сдвижения во времени и, кроме скоростей сдвижений и деформаций, включает такие важные показатели, как общая продолжительность процесса сдвижения и период опасных деформаций.

При решении вопросов сдвижения горных пород и охраны сооружений перечисленные параметры используются в различной мере в зависимости от конкретных условий разработки и степени изученности, отражаемых в нормативных документах. Данные о характере сдвижения горных пород и величинах параметров сдвижения рудных месторождений получают, главным образом, с помощью инструментальных наблюдений. Сопоставимость результатов наблюдения, проводимых в разнообразных горно-геологических условиях различными организациями, обеспечивается специальной инструкцией, обязательной для всех организаций, проводящих наблюдения [23]. Инструкция регламентирует все основные вопросы по проведению наблюдений от составления проекта наблюдательной станции, до обработки результатов и получения искомых параметров. Внедрение ее сыграло важную роль в упорядочении инструментальных наблюдений, в обеспечении единого подхода к изучению процесса сдвижения.

# 1.2. Развитие научных исследований сдвижения горных пород

Начало научных исследований и дискуссий в области сдвижения горных пород П. М. Леонтовский, И. М. Бахурин и С. Г. Авершин относят к периоду 1838—1858 гг., когда были высказаны основные положения первой дошедшей до нас теории, известной под названием "правила нормалей" [1, 2, 15, 22]. Это правило было высказано Туайе в 1838 г. и получило развитие у Гоно в 1868 г. в связи с попыткой объяснить повреждение жилых домов в городе Льеже на набережной реки Маас. Сущность теории нормалей, рассматривающей слоистую толщу пород угольных месторождений, демонстрируется на рис. 1.2. Вес пласта кровли P разлагается на продольную  $P_2$  и нормальную к напластованию  $P_1$  составляющие. Продольная составляющая веса уравновешивается реакцией пород, находящихся ниже контура выработанного пространства, поэтому движение кровли может происходить только под влиянием нормальной составляющей. Практическим подтверждением теоретических положений служило повреждение жилых кварталов в городе Льеже. Гоно допускал возможность отклонения от этого правила за счет неоднородности механических свойств пород, их структуры, наличия трещин и крупных нарушений.

Теория нормалей с совершенствованиями и различными уточнениями встречалась в литературе до второго десятилетия нашего века. В 1867 г. Шпарре пришел к выводу, что обрушение должно распространяться по промежуточной линии между вертикалью и нормалью к напластованию. В 1871 г. Г. Дюмон ограничил предельный угол пластов, для которых пригодно правило нормалей, значением 68°, снимая одно из серьезных возражений критиков теории нормалей — абсурдность при вертикальном падении пласта. В 1885 г. Ичинский уточняет выводы Шпарре предполагая, что зона сдвижения распространяется по биссектрисе угла, образованного нормалью к пласту и вертикалью.

Теория Гауссе, выдвинутая в конце девятнадцатого и усовершенствованная в начале двадцатого века, ограничивалась горизонтальными угольными месторождениями и в дополнение теории нормалей, кроме главного обрушения, выделяла в периферийных зонах последующее обрушение (рис. 1.3). Выделение зоны последующего обрушения, в которой преобладал прогиб, основывалось на результатах инструментальных наблюдений. Воззрений Гауссе придерживался П. М. Леонтовский, использовавший при составлении правил НТС горной промышленности 1923 г. основные понятия его теории. Вслед за Гауссе дальнейшее развитие теории нормалей получило в работах Тириара и Гольдрейха в 1912—1913 гг. Совершенствования в основном касались уточнения границ распространения обрушений, определения углов отклонения их от нормалей.

Параллельно с развитием теории нормалей возникали и другие теоретические представления. В 1882 г. с критикой теории нормалей выступил Ржиха, предлагая свою теорию естественного откоса, согласно которой область обрушения над выработанным участком принимает форму параболоида, последовательно захватывая зоны I, II, III и т. д. (рис. 1.4) [1, 2, 22]. Предельные поверхности разрушения ограничиваются углами естественного откоса. Положения тео-



Рис. 1.2. Схема развития обрушения пород по теории нормалей: *l* — обрушение на поверхности; 2 — линин обрушения (нормали); 3 — выработанное пространство

Рис. 1.3. Схема развития главного и последующего обрушений по Гауссе: *J* — мульда оседания; *2* — главное обрушения; *3* — последуюпис обрушения; *4* — выработанное пространство





Рис. 1.4. Схема развития сдвижения пород по теории Ржиха: *I* — обрушение на поверхности; 2 — плоскости сстественного откоса; 3 — выработанное пространство

рии предполагались приемлемыми в равной мере для слоистых и массивных пород. Углы обрушения ставились в зависимость только от углов естественного откоса, присущим породам налегающей толщи. Ржиха считал, что сдвижение пород происходит только в виде обрушения и отрицал изгиб.

В 1885 г. на основе наблюдений за сдвижением земной поверхности и моделирования Файоль пришел к выводу, что область, затрагиваемая сдвижением, имеет форму купола, который может не распространяться до поверхности за счет увеличения обрушившихся пород в объеме. Глубина, необходимая для сохранения поверхности, должна составлять, по его мнению, не менее двухсот мощностей отрабатываемого пласта [1, 2, 22].

В сущности рассмотренных выше теорий сдвижения горных пород, выдвинутых в ранний период развития науки о сдвижении горных пород, проявляется стремление создать общую, объемлющую весь процесс, теорию, пригодную для решения частных задач, причем, основное внимание в теориях уделялось форме сдвижения пород в их толще. Недостатки теорий этого периода обусловлены их созерцательным характером. Они строились на наблюдаемых внешних проявлениях процесса сдвижения. Отсутствие инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности и окружающих пород оставило без внимания зоны плавных деформаций, безосновательно сводя сложный геомеханический процесс изменения напряженно-деформированного состояния в области влияния подземных разработок к процессу разрушения одного из участков. Скрытая часть сдвижений, проявляющаяся лишь при проведении точных инструментальных измерений, оставалась вне поля зрения этих теорий. Из всего комплекса сил, действующих в массиве горных пород, во внимание принимался только собственный вес пород. Тем не менее, ранние теории сдвижения горных пород, несмотря на несовершенство и существенные недостатки, сыграли значительную роль в развитии научных исследований, побуждая проведение экспериментальных работ для подтверждения или опровержения основных их положений. Некоторые результаты этих исследований не утратили своего значения и в настояще время.

Инструментальные наблюдения начали развиваться с середины прошлого столетия параллельно с теоретическими работами. Необходимость в постановке инструментальных измерений была обусловлена требованиями горной промышленности, которой нужны были численные значения углов сдвижения для построения целиков под охраняемыми объектами. Многочисленные теории, основывавшиеся на фактах, наблюдавшихся в различных районах, не согласовывались друг с другом, а нередко и противоречили. Это со всей очевидностью демонстрировало сложность вопроса и невозможность исчерпывающего теоретического решения его на достигнутом уровне знаний. Поэтому с середины прошлого столетия стало утверждаться мнение, что необходимые параметры сдвижения могут быть получены единственным путем — проведением систематических инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности.

Одним из первых организаторов инструментальных наблюдений за проявлением процесса сдвижения считается английский исследователь Гудвин [1, 2, 13, 23]. Его наблюдения были опубликованы в 1864 г. Методика не предусматривала нивелировки и измерения деформаций земной поверхности, а ограничивалась съемкой положения и параметров трещин, образуемых на поверхности, и сопоставлением с нахождением очистных горных работ. Гудвин не предложил общей теории сдвижения горных пород, но на основе инструментальных наблюдений им были установлены некоторые зависимости, имеющие практическое значение. В частности, он правильно оценивал влияния систем разработки на характер проявления процесса сдвижения, влияние размеров предохранительного целика на сохранность объектов, установил значения углов обрушения для некоторых разновидностей пород.

Серьезные инструментальные наблюдения, включающие систематические нивелировки, были поставлены в конце XIX века Дортмундским горным управлением [1, 2, 13]. Основной задачей наблюдений было определение численных значений углов сдвижения. Результаты наблюдений были воплощены в "Дортмундских правилах". Кроме численных значений углов сдвижения, исследования дали результаты по ряду других вопросов, представляющих важное значение для охраны подрабатываемых сооружений. Например, было установлено отсутствие так называемой "мертвой глубины" и проявление сдвижения на поверхности при любой известной глубине разработки; выявлено проявление сдвижения при любой тщательной сухой закладке; установлена зависимость образования трещин на поверхности от глубины и строения налегающей толщи пород. Результаты инструментальных наблюдений Дортмундского горного управления применялись во многих странах, не проводивших своих наблюдений, в том числе в Донбассе они использовались в качестве основы для Временных правил 1923 г. и 1927 г. [1].

В нашем столетии теоретические разработки в области сдвижения горных пород шли параллельно с развитием инструментальных наблюдений, причем со временем инструментальным наблюдениям придавалось все большее значение.

В 1924 г. и в 1929 г. были опубликованы результаты более чем 30-летних наблюдений О'Донэгю за разработкой пологих пластов

небольшой мощности с диапазоном глубин от 170 м до 1000 м. Его представления о процессе сдвижения были подобны приведенной выше схеме Гольдрейха. Не выдвигая новых теоретических положений, О'Донэгю предложил эмпирические формулы для определения углов обрушения [1, 13].

В дореволюционной России в горной промышленности систематические инструментальные наблюдения практически не проводились. Попытку обосновать выбор углов сдвижения для угольных шахт Донбасса и рудников Кривого Рога предпринимал проф. П. М. Леонтовский. В подтверждение выдвинутых им теоретических положений необходимо было проведение исследовательских работ и инструментальных наблюдений. В разработанном им проекте предполагалось оборудовать на пяти типичных угольных шахтах около 25 км профильных линий и такой же протяженности профильные линии на нескольких рудниках. Ежегодная стоимость работ составляла около 8000 тыс. руб. [24]. Проект не был осуществлен по организационным причинам, из-за отсутствия финансирования и полнейшей пассивности рудничного руководства.

Завершающим этапом раннего периода развития исследований процесса сдвижения и одновременно началом нового периода послужила теория Бригса, опубликованная в 1927 г. [1, 13, 25]. В отличие от предшествующих теорий, основывавшихся на элементарных геометрических построениях и не учитывающих никаких сил, кроме собственного веса, в теории Бригса впервые массив горных пород рассматривается как среда, находящаяся в объемном напряженном состоянии. Примечательно, что он усматривает аналогию между процессом сдвижения горных пород над выработанным пространством и механизмом возникновения тектонических нарушений. Бригс основывался на теории прочности Мора, согласно которой разрушение тела под влиянием напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  определяется не абсолютными их значениями, а разностью между наибольшими  $\sigma_3$  (по абсолютному значению) и наименьшими  $\sigma_1$  напряжениями (рис. 1.5).

Угол *i*, который трещина разрушения составит с направлением наибольшего напряжения, может быть найден из выражения

$$tgi = \pm \sqrt{\frac{\left[\sigma_{p}\right]}{\left[\sigma_{c*}\right]}}, \qquad (1.1)$$

где  $[\sigma_p]$  — временное сопротивление пород растяжению;

[ $\sigma_{c*}$ ] — временное сопротивление пород сжатию.

Таким образом, tgi для данного вида пород по теории Бригса получается одинаковым и определяется их прочностными характери-



Рис. 1.5. Схема образования плоскостей разрушения по Бригсу: *I* -- на образцах; 2 — образование сброса; 3 — образование сдвига

стиками. Рассматривая тектонические нарушения, Бригс допускает, что максимальные напряжения могут быть и вертикальными, и горизонтальными. Отсюда он делает вывод, что все сбросы, обусловленные вертикальными силами, — крутопадающие, а сдвиги, связанные с горизонтальными максимальными напряжениями, — пологопадающие. Но переходя к рассмотрению обрушений под влиянием горных разработок, Бригс упускает, что в массиве горных пород могут существовать максимальные горизонтальные напряжения, рассматривая возникновение разрушений при сдвижении только под влиянием силы тяжести.

Если же привнести в теорию Бригса современные представления о напряженном состоянии нетронутого массива горных пород, допускающие с равной вероятностью как вертикальные, так и горизонтальные максимальные напряжения, то, соответственно, с той же вероятностью могут встречаться плоскости разрушения, тяготеющие к вертикальному и горизонтальному направлениям под углами *i*. Это объясняет некоторые аномалии в развитии процесса сдвижения, когда трещины неожиданно образовывались глубоко в мас-

19

сиве под углами, меньшими, чем углы естественного откоса для самых слабых рыхлых пород.

Теория Бригса была огромным шагом вперед в развитии понятия о процессе сдвижения. В отличие от Ржиха, рассматривающего плоскости обрушения как плоскости, соответствующие углам естественного откоса массива пород независимо от напряженного состояния, Бригс впервые выдвигает в качестве движущего, основного фактора процесса сдвижения, напряженное состояние массива горных пород. Однако он не сумел выйти из-под представления о весе пород как бесспорно преобладающем факторе. Этому способствовало полное отсутствие данных о напряженном состоянии. И. М. Бахурин, рассматривая теорию Бригса, следующим образом оценивал ее значение: "Путь, намеченный Бригсом, совершенно верен. Подчиняя явления сдвижения горных пород теории сопротивления материалов, теория Бригса представляет собой попытку действительно *рационального* объяснения сдвижения горных пород" [1] (курсив И. М. Бахурина).

Теория Бригса далека от совершенства и рассматривает лишь одну область — обрушение, не уделяя внимания областям плавных деформаций. По существу, она завершает период создания теорий, пытающихся свести процесс сдвижения к обрушению. Далее основное место в исследованиях прочно заняли инструментальные наблюдения. Пройдя период развития в конце прошлого и начале нашего столетия, инструментальные наблюдения к тридцатым годам проводились практически во всех крупных горнодобывающих бассейнах развитых стран.

В нашей стране исследования сдвижений горных пород получили развитие лишь после Октябрьской революции. Изменение социального строя в корне изменило отношение к богатствам недр, к безопасности шахтеров и окружающего населения, устранило противоречия между интересами общества и горной промышленности. На повестку дня была поставлена оптимизация решений по охране сооружений от подработки, обеспечивающая экономическую и безопасную эксплуатацию месторождений.

Основные вехи развития науки и практики сдвижения горных пород в нашей стране исчерпывающе освещены в работах основоположников советской школы — И. М. Бахурина, С. Г. Авершина, Д. А. Казаковского [1, 13, 26]. В 1923 г. ВСНХ СССР утверждены первые в советской стране "Временные правила" для Донбасса, разработанные на основе Дортмундских правил при участии П. М. Леонтовского. В 1927 г. эти "Правила" были переработаны И. М. Бахуриным и применялись до 1939 г. Понимая несовершенство и необоснованность действующих правил, И. М. Бахурин организовывает первые отечественные инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород. К 1929 г. на шахтах Донбасса они приобрели характер систематических.

В 1932 г. в Ленинграде был создан ЦНИБМ, реорганизованный в 1945 г. во ВНИМИ, который возглавляет в стране исследования сдвижения горных пород. За прошедшее время ВНИМИ, его филиалами, маркшейдерскими кафедрами вузов и научно-исследовательскими организациями ведомств разработано более 30 "Правил" и "Указаний" по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на угольных, рудных и нерудных предприятиях страны. В 1981 г. выпущены "Единые правила" для угольных бассейнов [27].

Масштабы исследований, разнообразие горнотехнических условий, проведение инструментальных измерений, наряду с практическими результатами, позволили получить и некоторые данные, проливающие свет на физическую природу явления сдвижения горных пород. В 1935—1936 гг. были начаты работы С. Г. Авершина по созданию методов предрасчета сдвижений, в которых впоследствии приняли участие В. В. Соколовский, М. А. Кузнецов, С. П. Колбенков, Е. В. Куняев, П. Ф. Гертнер, А. Н. Медянцев, И. А. Петухов, А. Г. Акимов и др. Подводя некоторые итоги этой работы Д. А. Казаковский в 1953 г. отмечал: "Мы все еще не располагаем окончательно разработанной теорией сдвижения горных пород и вытекающим из нее универсальным и надежным методом расчета" [26]. Прошло еще более 40 лет и сегодня с сожалением приходится снова констатировать, что мы по-прежнему "не располагаем окончательно разработанной теорией сдвижения горных пород".

Современные методы прогнозирования процесса сдвижения на угольных месторождениях или месторождениях других полезных ископаемых с близкими горно-геологическими условиями, следуя Г. Кратчу [14], по основным предпосылкам, используемым для расчетов, можно подразделить на эмпирические, базирующиеся на функциях распределения, и основанные на теоретических моделях.

Эмпирические методы расчета сдвижений и деформаций земной поверхности основываются на представлениях, полученных из результатов непосредственных натурных наблюдений за развитием процесса сдвижения в различных условиях разработки месторождений полезных ископаемых. Исходными данными для расчетов выступают расположение центра мульды сдвижения и ее границ, максимальные значения оседаний, положение характерных точек профиля оседаний и некоторые другие параметры, определяемые эмпирически. Эти методы, вошедшие одними из первых в практику охраны сооружений, широко применяются и в настоящее время в

отечественной практике [21, 29], в Германии [24], Англии [30], в Польше и Венгрии [31], в Канаде [32].

Методы расчета сдвижений на основе функций распределения занимают промежуточное положение между эмпирическими и теоретическими методами прогнозирования. В них используются так называемые функции распределения или функции влияния, характеризующие влияние единичных участков выработанного пространства на земную поверхность. Наиболее распространены функции распределения в практике расчетов сдвижений в Германии, где для этих целей впервые были разработаны интегральные сетки Кейнгорста, Бальса и др. [14]. Большое место функции распределения занимали в работах польских ученых Кноте, Кохманьского, Будрыка и др., использовавших функции распределения экспоненциального вида [31].

В расчетах, основанных на теоретических моделях в качестве модели массива принимается несвязная, стохастическая, упругая или пластическая, но, как правило, однородная среда. В этой группе методов ведущими являются разработки С. Г. Авершина, использующие положения теории предельного равновесия [13, 33, 34, 35]. В послевоенные годы и в настоящее время эти методы применяются в отечественной практике [36, 37], в Польше [31], в Венгрии [38] и других странах.

# 1.3. Современные методы прогнозирования сдвижений горных пород на рудных месторождениях

Процесс сдвижения массива горных пород при разработке угольных и рудных месторождений развивается в соответствии с общими законами геомеханики. Однако различие свойств вмещающих пород, морфология рудных тел, применяемая технология разработки и другие особенности придают процессу сдвижения на рудных месторождениях определенную специфику, препятствующую использованию в полной мере опыта прогнозирования его параметров. Некоторое отставание исследований на рудных месторождениях обусловлено тем, что острота проблемы охраны сооружений от подработки на рудных месторождениях проявилась несколько позднее, чем в угольных бассейнах. Меньшие масштабы добычи рудного сырья в относительно малозаселенных районах, концентрация запасов на сравнительно небольших территориях — все это позволяло длительное время обходиться элементарными познаниями в этой области. Лишь к середине двадцатого столетия возникла настоятельная потребность в исследовании сдвижения горных пород на рудных месторождениях, которая в основных угольных бассейнах ощущалась уже в конце девятнадцатого столетия. Кроме того, сложная морфология рудных тел во многих случаях исключает из процесса сдвижения однотипные или установившиеся периоды его развития. Параметры сдвижения изменяются в течение всего промежутка времени разработки месторождения, что затрудняет их прогнозирование по результатам инструментальных наблюдений.

В отечественной практике начало работ по изучению сдвижения горных пород на рудных месторождениях относится к 1929— 1930 гг. [4]. Первые правила, выпущенные на основе наблюдений, относятся к 1939 г. С начала Великой Отечественной войны и до 1947 г. исследования в этой области практически не выполнялись. В послевоенные годы, в связи с бурным ростом добычи руд черных и цветных металлов и реконструкцией предприятий, исследования в области сдвижения горных пород достигли большого размаха, хотя и уступали подобным исследованиям в угольной промышленности. В короткое время было разработано более десяти "Временных правил", "Правил", "Указаний" для отдельных месторождений.

Создание нормативных документов, несмотря на множество присущих им недостатков, сыграло исключительно важную роль в нормализации решений по сдвижению горных пород, по внедрению одинакового подхода к вопросам охраны сооружений от подработки. В основу большинства нормативных документов были положены результаты инструментальных наблюдений. Надо отметить, что натурные наблюдения проводились на рудниках черной и цветной металлургии с исключительно разнообразными горно-геологическими условиями разработки, что положительно сказывается на познании сущности явления сдвижения горных пород. Однако, к сожалению, наблюдения проводились эпизодически, обычно в период подготовки к выпуску новых правил или пересмотра действующих. Кроме того, до 1972 г. на рудниках черной металлургии исследования сдвижения горных пород выполнялись ВНИМИ, а затем эта тематика была передана институтам Минчермета СССР — ВИОГЕМ (Кривой Рог, Центр), Институту горного дела МЧМ СССР (Урало-Казахстанский регион) и ВостНИГРИ (Горная Шория, Сибирь). В переходный период объемы исследований были заметно снижены. Однако в настоящее время все основные регионы добычи руд черных металлов подземным способом охвачены инструментальными наблюдениями за сдвижением горных пород.

В последние 10—15 лет исследования процесса сдвижения на предприятиях Минчермета СССР, как и ранее, сосредоточсны на проведении наблюдений, выявлении корреляционных взаимосвязей между параметрами процесса сдвижения и условиями разработки месторождений. К традиционным методам измерения сдвижений и деформаций добавились методы аэрофотосъемки, фотограмметрии, измерения с помощью высокоточных светодальномеров.

Систематические исследования сдвижения горных пород на железорудных месторождениях Урала были начаты Уральским филиалом ВНИМИ в 1957 г. [4]. В 1962 г. на основе инструментальных наблюдений были выпущены "Временные правила", которые в 1974 г. были переработаны в "Правила", действовавшие до 1990 г. [39, 40]. За истекшие 16 лет заметно увеличилась глубина разработки на действующих рудниках, введены в эксплуатацию новые предприятия, поэтому инструментальными наблюдениями нередко фиксировали фактические параметры сдвижения, значительно отличающиеся от нормативных, что снижало эффективность проектируемых мер охраны объектов в зоне влияния горных разработок. В это время на десяти из четырнадцати шахт черной металлургии, расположенных в Урало-Казахстанском регионе, велись инструментальные наблюдения, на основе которых были разработаны действующие сегодня "Правила" [16].

Современные мстоды прогнозирования деформаций и сдвижений для проектирования мер охраны сооружений и природных объектов от влияния подземных разработок на рудных месторождениях по аналогии с угольными по основным предпосылкам, используемым для прогноза, можно также подразделить на эмпирические, базирующиеся на функциях распределения, и основанные на теоретических моделях. Наиболее распространены в современной практике разработки рудных месторождений эмпирические методы прогнозирования процесса сдвижения, основанные на результатах инструментальных наблюдений. Они приняты во всех "Правилах" и "Указаниях", действующих на предприятиях черной металлургии, расположенных в Криворожском железорудном бассейне, на Урале, в Горной Шории и Сибири [16, 42, 43].

Наряду с бассейновыми или региональными правилами, на вновь проектируемых месторождениях руд черных и цветных металлов широко применяются временные правила охраны объектов на месторождениях с неизученным процессом сдвижения [44].

На разрабатываемых месторождениях с изученным процессом сдвижения нормативные параметры для составления правил или проектирования мер охраны объектов в практической деятельности прогнозируются с помощью экстраполяции результатов инструментальных наблюдений на последующие периоды разработки. На вновь осваиваемых месторождениях или на новых участках разрабатываемых месторождений, отличающихся по горно-геологическим условиям, прогнозирование процесса сдвижения производится по аналогии с изученными месторождениями, имеющими примерно одинаковые условия разработки. Такой подход получил название метода аналогии и применительно к угольным месторождениям впервые был разработан Д. А. Казаковским [26]. Для рудных месторождений метод аналогии был обоснован при разработке временных правил для месторождений с неизучснным процессом сдвижения [45] и в дальнейшем развит М. А. Кузнецовым [4, 46]. Эффективность применения метода аналогий зависит от правильного выбора месторождений-аналогов, который основывается на классификационных признаках месторождений.

В общих положениях "Правил" и "Указаний" и в научно-технической литературе рассматривается различное число факторов, оказывающих влияние на характер и парамстры сдвижения горных пород. Так, С. Г. Авершин оперируст четырьмя факторами [13], И. М. Бахурин рассматривает двенадцать и отмечает, что П. М. Леонтовский принимал во внимание восемнадцать факторов [1]. Но такое обилие факторов имеет место только при общем рассмотрении процесса сдвижения. Большинство из них изучены очень слабо, и количественно определить их влияние на параметры сдвижения не представляется возможным. Тем более трудно установить влияние комплекса факторов. Правила количественно учитывают только те факторы, которые изменяются в значительных пределах и вызывают существенные изменения параметров сдвижения горных пород.

Классификация месторождений в правилах охраны сооружений отражается в таблицах рекомендуемых углов сдвижения горных пород. Обычно эти таблицы строятся с учетом двух-трех факторов. Так, во "Временных правилах" [44] таблица для слоистого строения пород, кроме слоистости, учитывает крепость и угол падения. Для неслоистых пород учитывается только угол падения залежи. Остальные факторы могут быть учтены в форме поправок к табличным углам сдвижения. В "Правилах для железорудных месторождений Урала" [40] таблица параметров сдвижения горных пород для неизученных месторождений строится с учетом угла падения залежи, крепости, формы и размера рудного тела и строения вмещаюцих пород. В других правилах число учитываемых факторов сохраняется в таких же пределах.

Наиболее полная и общая классификация рудных месторождений, использованная при составлении "Временных правил" [44], дана в работе [4] (рис. 1.6). Все рудные месторождения по строению вмещающих пород делятся на два типа: І — слоистые породы; II иеслоистые породы. Деление каждого типа на группы производится исходя из крепости пород. Месторождения первого типа делятся на две группы: с коэффициентом крепости пород меньше 5 и боль-



Рис. 1.6. Схема классификации рудных месторождений по характеру сдвижения горных пород

ше 5. Месторождения второго типа объединяются в одну группу с коэффициентом крепости пород больше 5. Группы делятся на подгруппы по углу падения. Каждая группа месторождений со слоистыми вмещающими породами делится на пять подгрупп с углами падения 0°—30°, 31°—45°, 46°—60°, 61°—80° и 81°—90°. Для месторождений с неслоистыми породами выделяют четыре подгруппы с углами падения 0°—30°, 31°—50°, 51°—80° и 81°—90°.

Таким образом, в основу классификации месторождений и назначения углов сдвижения положены строение пород, их крепость и угол падения рудных тел.

Обращает на себя внимание отсутствие среди рассматриваемых факторов напряженного состояния массива горных пород. Не нашло отражения напряженное состояние и в "Методике комплексного исследования процесса сдвижения породных толщ и земной поверхности под влиянием горных работ" [47]. В научно-технической литературе напряженное состояние, и именно его тектоническая составляющая как один из основных факторов, впервые отмечено И. М. Бахуриным. "Остатки тектонических напряжений в земной коре теоретически должны оказывать большое влияние на процесс сдвижения горных пород, возникающий под влиянием горных разработок. Однако практически влияние этого фактора до сих пор не учитывалось" [1]. Располагая факторы в порядке значимости, И. М. Бахурин ставит "остатки тектонических напряжений" на одиннадцатое место из двенадцати.

Кроме общих положений по определению параметров процесса сдвижения горных пород в условиях полной подработки современная наука о сдвижении горных пород располагает обширным арсеналом эмпирических методик, основанных на большом объеме промышленных наблюдений, решающих ряд частных вопросов охраны сооружений. К их числу относятся методика по оценке устойчивости земной поверхности при разработке залежей ограниченных размеров, методика по определению возможности выхода обрушения на земную поверхность, методика оценки поведения пород над разрабатываемыми слепыми залежами [4, 48, 49].

Широкое применение на практике получили методики учета неполной подработки при назначении нормативных углов сдвижения на залежах сложного очертания [4, 44]. В отдельных случаях применяются методики определения углов разрыва с учетом систем трещиноватости и определения углов сдвижения при известных углах разрывов [4, 50—53].

Функции распределения в виде весов "зон влияния" отработанных рудных тел использовались на предприятиях Горной Шории для прогнозирования углов сдвижения по комплексному показателю степени подработанности [54, 55, 56]. Функциональные зависимости углов сдвижения от параметров разрабатываемых рудных тел и других горно-геологических факторов получены из корреляционного анализа результатов натурных наблюдений.

Весь имеющийся арсенал методик в совокупности с большим объемом фактических данных о сдвижении горных пород, полученных за многовековую историю подземной разработки месторождений полезных ископаемых, позволяют в абсолютном большинстве случаев надежно и безопасно решать вопросы сдвижения горных пород и охраны сооружений, попадающих в зону влияния разработки. Однако практика знает немало примеров аномального развития процесса сдвижения горных пород, когда его параметры и характер развития не укладывались в привычные современные понятия. Примерами подобных аномалий от установившихся понятий могут служить чрезмерно низкие углы разрывов на ртутном руднике Рио-Тинто (Испания)  $\beta'' = 21^{\circ}$  [57]. Неестественно пологие углы разрывов имели место

рождении ( $\beta_1'' = 43^\circ$ ) [58, 59]. Несколько ниже обычных были углы сдвижения на некоторых участках Таштагольского месторождения ( $\delta = 48^\circ$ ) [4]. Примеры эти не получают достаточно полного объяснения с позиций учитываемых факторов и свидетельствуют о проявлении некоторых особенностей, вызванных иными факторами, связанными с особенностями напряженного состояния массива горных пород.

В эмпирических методах прогнозирования сдвижений и в методах, использующих функции распределения, относительно влияния напряженного состояния массива горных пород на параметры сдвижения сложился двойственный взгляд. В общей схеме и качественной картине проявления процесса сдвижения исходные предпосылки включают первоначальное напряженное состояние, перераспределение напряжений при выемке месторождения, существование взаимосвязей сдвижсний и деформаций с напряженным состоянием. Однако практические вопросы решаются бсз учета напряженного состояния массива горных пород, как фактора, определяющего в значительной мере развитие процесса сдвижения. Подобная двойственность обусловлена, по-видимому, слабой изученностью как первоначального напряженного состояния, так и закономерностей его изменения при разработке месторож-

Накопленный эмпирический материал по сдвижению горных пород и современный уровень знаний о напряженном состоянии массива горных пород дают возможность сделать очередной шаг в развитии теоретических представлений о процессе сдвижения рассматривать сдвижения и деформации как составную часть единого процесса изменения напряженно-деформированного состояния под влиянием подземной разработки. Развитие этих представлений позволяет повысить достоверность прогнозирования процесса сдвижения за счет осуществления его с помощью физичсеких закономерностей, раскрывающих причинно-следственные взаимосвязи.

На этих предпосылках основываются методы третьей группы, использующие теоретические модели. Методы прогнозирования сдвижений и деформаций с использованием зависимостей их параметров от первоначального напряженного состояния в последние годы разрабатываются Инсгитутом горного дела Уральского отделения РАН применительно к месторождениям руд черных металлов Урала и Казахстана [60—65]. Наличие этих зависимостей подтверждено также на рудниках Горной Шории [66].

Наличие функциональных зависимостей между сдвижениями и первоначальным полем напряжений открывает возможность про-

гнозирования сдвижений на основе законов геомеханики с учетом конкретных условий месторождений. Использованию их препятствуют многие смежные проблемы и вопросы, в том числе определение необходимых свойств массива горных пород, параметров напряженного состояния, дискретный характер проявления сдвижений и деформаций и др. Но над этими проблемами активно работают во многих областях геомеханики, что дает основание надеяться на скорое их решение [67—69].

## 1.4. Основные проблемы в области расчета и прогнозирования сдвижений горных пород и задачи исследований

Современные проблемы в области расчета и прогнозирования параметров процесса сдвижения горных пород при подземной разработке мощных рудных месторождений обусловлены необходимостью принятия генеральных решений по охране сооружений от подработки задолго до начала разработки месторождения, на стадии проектирования. В этот период намечаются места под промплошадку шахты, закладываются основные капитальные сооружения, в том числе и стволы, оценивается безопасность существующих объектов, попадающих в зону влияния горных работ, проектируются меры по их охране. В сложных горно-геологических условиях или при наличии водных объектов оценивается безопасность ведения горных работ различными системами разработки. Но именно на этой стадии знания о характере и основных параметрах сдвижения горных пород исдостаточны и просчеты на этой почве могут впоследствии обернуться катастрофическими проявлениями процесса сдвижения, консервацией рудных запасов в предохранительных целиках или, при чрезмерном удалении подъемных стволов и сооружений промплощадки, увеличением капитальных и эксплуатационных расходов.

На крупных горнодобывающих предприятиях вероятность принятия ошибочных решений повышается за счет больших размеров участков массива горных пород, вовлекаемых в процесс сдвижения. Во многих случаях размеры области влияния горных работ составляют от сотен метров, до нескольких километров. В этих условиях в закономерностях развития процесса сдвижения в полной мере проявляются структурные неоднородности всех порядков, что вызывает серьезные трудности в определении свойств массива горных пород, необходимых для прогнозирования его поведения. Поскольку от надежности результатов прогнозирования зависит безопасность охраняемых объектов, то применяемые методы, наряду с общими законами распределения сдвижений и деформаций, должны дать их численные значения и представление об уровне дискретных проявлений, обусловленных структурными неоднородностями.

Метод прогнозирования сдвижений и деформаций с использованием геомеханических моделей и расчетных методов, которым посвящена работа, на современном этапе рассматривает зоны плавных сдвижений, в которых возможно обеспечение безопасности охраняемых объектов. С углублением горных работ удельный вес зоны плавных сдвижений в общей площади мульды сдвижения постоянно расширяется. Так, если на железорудных месторождениях Урала на глубинах разработки до 100 м зона плавных сдвижений практически отсутствовала и углы сдвижения совпадали с углами разрывов, то на глубинах разработки 300—500 м ее размеры стали сопоставимыми с глубиной разработки. При существующих тенденциях с дальнейшим увеличением глубины разработки зоны плавных сдвижений будут занимать большую часть мульды сдвижения. Следовательно, разработка геомеханических моделей и методов расчета параметров сдвижений горных пород при подземной разработке мощных рудных месторождений в скальных массивах системами с обрушением является научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение вследствие обеспечения рационального размещения и безопасной эксплуатации сооружений и природных объектов в области влияния горных работ. Для ее решения в работе выполнены исследования и решены следующие задачи:

1. На основе обобщения результатов натурных наблюдений выявлена геомеханическая сущность процесса сдвижения скальных массивов горных пород и функциональная зависимость между основными горнотехническими факторами и параметрами сдвижений и деформаций.

2. Разработана геомеханическая модель месторождения, отражающая основные факторы, влияющие на процесс сдвижения: свойства реальной среды; начальное напряженно-деформированное состояние; геометрические параметры выработанного пространства и зон обрушения.

3. На основе теории упругости создан математический аппарат, позволяющий производить инженерные расчеты деформаций и сдвижений горных пород.

4. Исследованы на компьютерных геомеханических моделях взаимосвязи между первоначальным напряженным состоянием и параметрами процесса сдвижения, установлены закономерности формирования мульды сдвижения при различных параметрах первоначального напряженного состояния.

5. Изучена дискретность проявления процесса деформирования блочных скальных массивов горных пород и ее влияние на охраняемые объекты.

6. Специальными экспериментами в промышленных условиях проверены разработанные методики и научные положения работы.

7. Осуществлено внедрение результатов исследований при решении практических вопросов охраны сооружений на рудных месторождениях Урала.

Поставленные задачи решались комплексно с использованием теоретических, лабораторных и промышленных исследований.

### Выводы

1. Проблемы сдвижения горных пород, связанные с охраной сооружений и природных объектов от разрушения под воздействием горных работ, а также с обеспечением безопасности самих горных работ, не теряют актуальности на протяжении всей истории горного дела. Недостаточное внимание их решению сопряжено с катастрофическими последствиями, завершающимися, как правило, материальным ущербом, а иногда и гибелью людей.

2. Процессу сдвижения горных пород при разработке мощных рудных месторождений, залегающих в скальных массивах, присуща своя специфика, обосновывающая выделение исследований закономерностей процесса сдвижения и разработку методов расчетного прогнозирования его параметров для размещения охраняемых объектов в самостоятельную научную проблему, актуальную для современной горной науки и горной промышленности.

3. На всем протяжении истории развития науки о сдвижении горных пород наблюдается стремление создать теорию процесса сдвижения, позволяющую описать происходящие явления, спрогнозировать их параметры на любой этап разработки. Однако сложность и многофакторность исследуемого процесса пока препятствуют достижению этой цели, вынуждая к созданию частных решений для однотипных условий. Особую сложность представляют проблемы сдвижения при разработке мощных рудных месторождений, залегающих в скальных массивах горных пород.

4. Длительный опыт применения метода аналогий на рудных месторождениях, сопровождаемый постановкой инструментальных наблюдений в натуре, обеспечил накопление огромного экспериментального материала, позволяющего выявить сущность механизма процесса сдвижения и сделать очередной шаг к созданию теоре-

тических методов, основанных на общих принципах механики горных пород. Одним из основоположников геомеханического подхода к процессу сдвижения является Бригс, "подчинивший явления сдвижения горных пород (по оценке И. М. Бахурина [1]) теории сопротивления материалов".

5. Анализ проблем в области сдвижения горных пород и современных методов их решения при подземной разработке мощных рудных месторождений, залегающих в скальных массивах горных пород, свидетельствует, что разработка геомеханических моделей и методов расчета параметров сдвижения горных пород для этих условий является научной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение вследствие обеспечения рационального размещения и безопасной эксплуатации сооружений и природных объектов в области влияния подземных горных работ.

## – МАРКШЕЙДЕРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СДВИЖЕНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ УРАЛА И КАЗАХСТАНА

### 2.1. Характеристика маркшейдерских наблюдений

Исследования сдвижения горных пород на железорудных месторождениях Урала и Казахстана, включающие систематические инструментальные наблюдения, выполнялись, как отмечалось выше, в два этапа. На первом этапе, в 1958—1971 гг., исследования проводились Уральским филиалом ВНИМИ на Покровском, Масловском, Воронцовском, Ауэрбаховском и Северопесчанском месторождениях Северного Урала, на Алапаевском, Горноблагодатском, Высокогорском и Лебяжинском месторождениях Среднего Урала и на Бакальском месторождении Южного Урала (рис. 2.1) [40, 70]. На втором этапе, с 1972 г. до настоящего времени, исследования проводятся Институтом горного дела на Северном Урале на Северопесчанском месторождении, на Среднем Урале на Сарановском, Гороблагодатском, Валуевском, Естюнинском, Высокогорском и Лебяжинском месторождениях, на Южном Урале на Северошиханском месторождении и в Казахстане на Соколовском, Молодежном и Западнокаражальском месторождениях [71-75]. Этапы исследований отличались не только ведомственной принадлежностью, но и существенным изменением некоторых условий разработки и состояния развития процесса сдвижения горных пород: освоены новые месторождения со специфическими горно-геологическими условиями, значительно увеличились глубины разработок на эксплуатирусмых месторождениях, полного развития достигли зоны обрушения и мульды сдвижения.

Оборудование поверхностных, подземных и специальных наблюдательных станций и проведение по ним инструментальных измерений осуществлялось в соответствии с инструкцией [21]. Реперы наблюдательных станций забивного типа и бетонированные

Таблица 2.1



 Рис. 2.1. Железорудные и хромитовые месторождения Урала:
 I — Покровскос; 2 — Масловскос; 3 — Воронцовскос:
 4 — Ауэрбаховскос; 5 — Северопесчанскос; 6 — Аланасвскос; 7 — Сарановскос; 8 — Гороблагодатскос; 9 — Валусискос; 10 — Естюнинскос; 11 — Высокогорскос:

12 — Лебяжинское; 13 — Бакальское; 14 — Северопинханское; 15 — Соколовское (оси эллипсов — горизонтальные напряжения)

в скважинах располагались по прямым профильным линиям, ориентированным, преимущественно, вкрест простирания и по простиранию рудных тел. Реперы закладывались за глубину промерзания грунтов не менее чем на 0,5 м. Наблюдательные станции включали рабочие, опорныс и исходные реперы. Размеры интервалов профильных линий колебались от 15 до 30 м.

Подземные наблюдательные станции оборудовались в существующих и специально пройденных горных выработках реперами, устанавливаемыми в почве, стенках и кровле

выработок. Комплекс работ на наблюдательной станции обычно включал:

— инструментальные наблюдения величин сдвижений реперов в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

 фиксацию трещин и определение их параметров на земной поверхности и в подземных горных выработках;

— съемку зоны обрушения и провалов, сбор и анализ других данных, характеризующих процесс сдвижения и его взаимосвязь с горными работами.

По результатам инструментальных наблюдений определялись угловые параметры процесса сдвижения, разрабатывались правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на железорудных месторождениях Урала.

Основные количественные характеристики маркшейдерских наблюдений за процессом сдвижения, выполненные на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана, приведены в табл. 2.1. Анализом особенностей процесса сдвижения горных пород было охвачено 14 месторождений, более 100 профильных лиХарактеристика маркшейдерских наблюдений за процессом сдвижения на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана

				and a second sec
Месторождение	Период наблюдений, годы	Количество профильных линий	Количество реперов	Примечание
Покровское	19641970	6	74	[70]
Ворониовское	1961-1970	4	42	[70]
Масповское	1960-1963	3	29	[70]
Северопесчанское	1968-1971	2	50	[70]
Cenebonde milence	1974-1998	12	300	
А уэрбаховское	1959-1969	2	21	[70]
Сарановское	1979-1998	6	118	
Гороблаголатское	1958-1969	10	143	[70]
I opoonal odditence	1975-1998	3	36	[70]
Валуевское	1975-1998	2	18	
Пебяжинское	1958	15	177	[70]
5100////	1975-1998	3	20	
Высокогорское	1958-1971	14	153	[70]
Direction of period	1975-1998	7	80	
Бакальское	1959—1960	6	, 71	[70]
Северошиханское	1980-1998	4	80	
Соколовское	1974-1985	2	100	
Запалнокаражальское.	1974-1975	2	21	
Молодежное	1983—1995	2	60	

ний, содержащих около 1500 реперов. В настоящее время на предприятиях черной металлургии в регионе Урала и Казахстана Институтом горного дела УрО РАН инструментальные наблюдения ведутся на 9 месторождениях по 50 профильным линиям, содержащим более 800 реперов. Имеющийся объем маркшейдерских инструментальных наблюдений, выполняемый в разнообразных горно-геологических условиях и на разных стадиях разработки месторождения дает объективную картину развития процесса сдвижения, позволяет выделить его основные особенности, сопоставить их со сложившимися теоретическими положениями.

## 2.2. Основные положения теории процесса сдвижения горных пород

В длительном периоде развития науки о сдвижении горных пород преобладает этап механических представлений о процессах перемещения массива горных пород. Поэтому, несмотря на активное внедрение в последние годы методов и понятий механики сплошной среды, теоретические модели которой предусматривают закономерные взаимосвязи между полями напряжений и деформаций, в сдвижении горных пород по-прежнему сохраняют свои позиции механические положения, согласующиеся с действительными положениями лишь в частных случаях. В связи с этим, в целях облегчения восприятия геомеханических представлений процесса сдвижения целесообразно проанализировать их в сопоставлении с экспериментальными данными. Приведенные ниже формулировки основных механических положений носят обобщающий характер.

1. Сдвижение земной поверхности происходит к центру тяжести подработанной площади. Это положение в отечественной литературе впервые, по-видимому, было сформулировано С. Г. Авершиным [76, 77]. Направление сдвижения точек земной поверхности, соответствующее этому положению, демонстрируется рисунком 2.2, заимствованным из работ С. Г. Авершина. Случай, когда в мульде сдвижения образуется зона обрушения, показан на рис. 2.3, взятом из тех же работ. Горизонтальные сдвижения земной поверхности, согласно эпюре 2, направлены в сторону выработанного пространства и плавно возрастают по мере приближения к зоне обрушения.

Г. Кратч [14] положение о направлении сдвижения точек земной поверхности к центру тяжести выработки использует весьма широко и распространяет на пространственный случай.

В работах, посвященных сдвижению горных пород на рудных месторождениях, это положение формулируется менее четко и о его признании и использовании можно судить лишь по типовым кривым сдвижений в главном сечении мульды [4] и рекомендациям по измерению отклонений от профиля [21, § 33].

Таким образом, из положения о направлении сдвижений к центру тяжести отработанной площади следует, что на всех профильных линиях, в особенности расположенных по простиранию и вкрест простирания залежей, векторы сдвижения должны быть направлены в сторону выработанного пространства.

2. На поверхностных профильных линиях, направленных по простиранию и вкрест простирания залежи, возникают только растягивающие деформации. Это положение возникает из типовых кривых распределения деформаций в мульде сдвижения. Если сдвижение происходит без образования зоны обрушения, то в центральной части мульды образуется зона сжатия [76, 4]. В случае образования провала, показанном на рис. 2.3, горизонтальные деформации, в соответствии с эпюрой 2, по всей мульде должны быть растягивающими [76, 77].

Таким образом, инструментальные измерения по поверхност-



Рис. 2.2. Распределение векторов сдвижения в мульде сдвижения по С. Г. Авершину: 1 — граница мульды сцвижения; 2 — векторы горизонтальных сдвижений; 3 — отработанная площадь

Рис. 2.3. Распределение горизонтальных сдвижений в мульде сдвижения при образовании зоны обрушения: *I* — граница мульды сдвижения; 2 — эпюра горизонтальных сдвижений; 3 — эпюра вертикальных сдвижений



Рис. 2.4. Направление векторов сдвижения на вертикальном сечении

Таблица 2.2

ным профильным линиям должны фиксировать, как правило, растягивающие деформации.

3. Трещины в мульде сдвижения образуются под действием растягивающих напряжений в изгибающихся слоях. Взаимосвязь трещин в мульде сдвижения с растягивающими напряжениями в современной научной литературе представляется очевидной [4, 77, 35]. "Возникновение зоны трещин связано с тем, что слои пород по периферии зоны обрушения принимают изогнутое положение, вследствие чего под действием растягивающих напряжений образуются трещины, пормальные к напластованию" [4].

Таким образом, в соответствии с этим положением интервалы профильных линий, пересекающие трещины в мульде сдвижения, должны фиксировать растягивающие деформации.

4. Вертикальные сдвижения земной поверхности проявляются в виде оседаний. В подавляющем большинство работ в качестве нормы принимается, что вертикальные сдвижения проявляются только в виде оседаний (см. рис. 2.3) [4, 13, 21, 76, 77 и др.]. Наряду с этим С. Г. Авершин в своей работе [13] приводит краткий перечень и анализ результатов инструментальных наблюдений, свидетельствующих о проявлении в ряде случаев поднятий реперов. Разнообразные условия проявления поднятий свидетельствуют о том, что они не случайны. Однако, не получив убедительных объяснений, поднятия не оказали практического влияния на теоретические взгляды, в которых вертикальные сдвижения представляются только в виде оседаний.

5. Направление векторов сдвижения на вертикальных сечениях должны совпадать с плоскостями сдвижения. Это положение, демонстрируемое на рис. 2.4, принимается многими авторами, в том числе в работах [4, 76, 79]. Совпадение направления векторов сдвижения с образующими плоскостями скольжения должно обеспечивать стабильность направления векторов, так как углы наклона плоскостей сдвига колеблются в незначительном диапазоне, присущем конкретному типу вмещающих пород.

Естественно, что приведенные основные представления о процессе сдвижения не исчерпывают всего многообразия и сложности происходящих явлений. Они характеризуют лишь те процессы, которые могут быть изучены непосредственными экспериментами. Основополагающий их характер оказывает существенное влияние на методику проведения инструментальных наблюдений и интерпретацию их результатов и, в конечном итоге, на методы прогнозирования процесса сдвижения при проектировании мер охраны сооружений и природных объектов на подземных горных предприятиях.

В то же время, в реальных условиях разработки месторождений

#### Характеристика инструментальных наблюдений сдвижений горных пород на месторождениях Урала

and the second se						
			ч	исло наблю	дений	
Месторождение	Число профиль- ных линий	деформа- ций ин- тервалов	верти- кальных сдвиже- ний репе- ров	сжатий интерва- лов, шт./%	подиятий реперовот- носительно начального положения, шт./%	поднятий реперовот- носительно предыдуще- го наблюде- ния, шт./%
Ha	блюден	ния про	ошлых	лет [70	)]	
Покровское Воронцовское Гороблагодатское Бакальское Высокогорское Дебяжинское Ауэрбаховское Северопесчанское	$ \begin{array}{c cccc} 6 \\ 4 \\ 10 \\ 6 \\ 17 \\ 13 \\ 2 \\ 2 \end{array} $	299 145 703 188 1138 824 72 162	324 148 550 171 814 821 89 203	81/27 19/13 184/26 43/23 182/16 146/18 41/57 53/33	33/10 10/7 32/6 6/4 114/14 164/20 32/36 27/13	58/18 12/18 121/22 12/7 188/23 160/20 43/48 77/38
Северопесчанское Высокогорское Гороблагодатское Валуевское Лебяжинское Сарановское Итого	Соврем   12   7   3   2   3   6   93	анные 3088 713 137 88 66 505 8118	наблю 3182 776 180 106 106 570 8040	595/19 206/29 43/31 52/59 17/30 286/57 1948/24	364/11 141/18 44/25 25/24 19/19 317/55 1328/17	757/24 231/30 72/40 34/32 19/19 287/50 1861/23

руд черных металлов Урала, на которых кроме сил собственного веса фиксируются горизонтальные напряжения тектонического происхождения, результаты инструментальных наблюдений нередко не согласуются с рассмотренными теоретическими положениями. Наряду с растяжением, на профильных линиях возникают сжимающие деформации. Довольно распространены поднятия участков мульды сдвижения, перемещения реперов в противоположном от провала направлении, образования трещин в условиях проявления сжатия на пересекающихся профильных линиях и ряд других явлений. Количественная характеристика наблюдений и встречающихся аномалий приведены в табл. 2.2.

Теоретические модели процесса сдвижения горных пород, основанные на законах теории упругости, допускают более сложный характер деформирования земной поверхности и вмещающих пород. Поэтому прежде, чем перейти к построению теоретической модели для прогнозирования процесса сдвижения, необходимо проанализировать соответствие выделенных положений результатам маркшейдерских наблюдений. Причем приведенный ниже анализ осуществлен статистическими методами и имел целью установление факта соответствия положений результатам наблюдений, выявление взаимосвязей между отклонениями на качественном уровне. Использование полученных корреляционных зависимостей для прогнозирования параметров процесса сдвижения в конкретных условиях нецелесообразно из-за разнообразия горно-геологических и геомеханических условий разработки месторождений, охваченных инструментальными наблюдениями.

## 2.3. "Аномалии" в развитии горизонтальных сдвижений

Применяемые в современной практике методы измерения горизонтальных сдвижений наиболее четко фиксируют знак и величину деформаций на участке профильной линии. Направление перемещения реперов профильных линий определяется относительно опорных реперов, которые условно рассматриваются неподвижными в горизонтальной плоскости. В действительности, как показано ниже, они могут иметь значительные перемещения, учет которых способен изменить представление о направлении горизонтальных перемещений.

В связи с неопределенностью направлений горизонтальных сдвижений в статистическом анализе используется только знак горизонтальных деформаций без учета их абсолютных величин. К "аномальным" горизонтальным деформациям отнесены сжатия интервалов профильных линий, поскольку в работе изучались только случаи, когда в мульде сдвижения образовывалась зона обрушения. К нормальному проявлению процесса сдвижения отнесены растяжения интервалов и случаи, когда на интервалах не фиксируются пикакие деформации. Некоторое неравноправие в статистическом анализе нормального и "аномального" развития процесса сдвижения горных пород за счет отнесения нулевых деформаций к нормальным допущено умышленно в пользу традиционных, установившихся взглядов, предоставляя возможность утверждения противоречивых взглядов только за счет чисто "аномальных" проявлений сдвижений.

Корреляционная зависимость между общим числом наблюдений горизонтальных деформаций и числом сжатий по 105 профильным линиям представлена в табл. 2.3. На одной профильной линии в среднем проводилось 77 измерений деформаций при изменении числа измерений на отдельных профильных линиях от 8 до 205. Среди 8120 наблюдений горизонтальных деформаций интервалов Взаимосвязь между общим числом наблюдений горизонтальных деформаций и числом сжатий на профильных линиях

Число сжатий		Общее число наблюдений на профильных линиях								
на профильных линиях	0—30	31—60	61—90	91—120	121-150	151-180	181—210			
09		:::::			••					
10-18		it is	••••	••••	•		••			
19—27	r = 0,57,		• • • •	Cex = (	0.158n + 6.4	-	•			
28—36	$\sigma(r)=0$	,07	•	•	•	•				
37—45	$\alpha = 9^{\circ} \pm$	1°	•••		••	****				
46—54										
5563										

профильных линий в 1948 случаях, или в 24 %, фиксировалось сжатие. Коэффициент корреляции r = 0,57 не высок, но связь существует вполне надежная, так как среднее квадратическое отклонение коэффициента корреляции  $\sigma(r) = 0,07$ .

В анализе использовались профильные линии как события с равной вероятностью проявления сжатия, хотя на 10 месторождениях с различными горнотехническими и геологическими условиями и различным расположением профильных линий относительно выработанного пространства и направления действия тектонических сил вероятность проявления сжатий различна. Поэтому приведенные в табл. 2.3 параметры корреляционной связи между общим числом наблюдений и числом наблюдавшихся среди них сжатий не предназначены для прогнозирования числа сжатий на конкретных месторождениях. Они характеризуют всю совокупность анализируемых наблюдений и свидетельствуют, что сжимающие деформации носят не случайный характер и их число зависит от общего числа наблюдений. Из 105 профильных линий, наблюдавшихся на 10 месторождениях, сжатия не фиксировались только на 5 профильных линиях.

При рассмотрении всех наблюдений, выполненных на одном месторождении, в качестве отдельного результата (см. табл. 2.2) корреляционная связь сжатий и общего числа наблюдений на место-



Рис. 2.5. Корреляционные взаимосвязи между общим числом наблюдений *n* и числом наблюдавшихся сжатий *E*<sub>сж</sub> по месторождениям

рождении становится более тесной, чем при рассмотрении в качестве отдельного события про-

фильной линии и характеризуется коэффициентом 0,886 (рис. 2.5). Число наблюдений по отдельным месторождениям составляет от 56 на Лебяжинском (современные наблюдения) до 3088 на Северопесчаном, составляя в среднем 580 наблюдений на одно месторождение.

Таким образом, хотя корреляционные связи и уравнения регрессии не рекомендуются для определения числа сжатий в конкретных условиях, обобщенные данные свидетельствуют о достаточно тесной связи сжимающих деформаций с общим числом наблюдений, исключающей представление о них как о случайных явлениях. По месторождениям региона доля сжатий в общем числа наблюдений изменяется от 13 % на Воронцовском до 59 % на Валуевском (см. табл. 2.2). Следовательно, "аномальные" проявления горизонтальных сдвижений в виде сжатий в мульде сдвижения, имеющей зону обрушения, носят вполне закономерный характер и могут рассматриваться такими же нормальными событиями, как и растяжение интервалов профильных линий. Распределения горизонтальных сдвижений и деформаций вокруг провалов круглой и эллиптической формы, рассмотренные далее, свидетельствуют, что сжимающие деформации являются такими же закономерными, как и растягивающие, и их доля в мульде зависит от параметров первоначальных горизонтальных напряжений и формы провала.

Важным фактором, раскрывающим взаимосвязь процесса сдвижения с напряженным состоянием, служат горизонтальные сжатия на интервалах профильных линий, пересекающих образующиеся трещины. Наряду с растяжениями, на участках образования трещин нередко встречаются сжатия, хотя трещины имеют значительные раскрытия, что свидетельствует о деформациях сдвигового характера по трещинам. Деформации сжатия в таких условиях фиксировались на Северопесчанском, Гороблагодатском, Высокогорском, Масловском и на ряде других месторождений. Величины сжатий на интервалах размером 15—25 м составляли от 15—20 мм до 800— 1000 мм, а в некоторых случаях достигали 2000 мм. Число интервалов с подобными сдвижениями на отдельных месторождениях относительно невелико, в пределах нескольких штук, и располагаются на различных участках мульды сдвижения: в висячем и лежачем боках, в торцах залежи. Как правило, они приурочены к участкам, где углы пересечения профильных линий и трещин отличаются от прямых. В отдельных случаях происходило дальнейшее раскрытие трещин во времени, сопровождаемое снижением сжатия и появлением растяжений.

Таким образом, разрывные нарушения в мульде сдвижения могут образовываться не только в условиях растяжения, как принято считать, но и в условиях сдвиговых деформаций. Следовательно, при построении моделей для прогнозирования параметров процесса сдвижения необходимо так называемые аномальные горизонтальные сдвижения, сжатия и сдвиговые нарушения, учитывать как закономерные, наряду с растяжениями и образованием разрывных нарушений в условиях растяжения.

## 2.4. "Аномалии" в развитии вертикальных сдвижений

В статистическом анализе вертикальных сдвижений к "аномальным" направлениям, как и при анализе горизонтальных сдвижений, отнесены только поднятия. Реперы с нулевыми значениями вертикальных сдвижений относятся к нормальным направлениям сдвижений — оседаниям, предопределяя заранее некоторые преимущества принятым представлениям о направлениях вертикальных сдвижений. В анализе различаются два вида вертикальных сдвижений: от начала наблюдений (суммарные сдвижения за весь период наблюдения) и между соседними сериями наблюдений. Суммарные сдвижения характеризуют длительный период, не раскрывая деталей развития процесса сдвижения. Наблюдения между сериями, наоборот, обладают большей чувствительностью к происходящим изменениям. Корреляционная зависимость между общим числом наблюдений вертикальных сдвижений по 105 профильным линиям и числом поднятий суммарных и между сериями наблюдений представлены, соответственно, в таблицах 2.4 и 2.5.

На одной профильной линии проводилось в среднем 80 измерений вертикальных сдвижений, по отдельным профильным линиям число измерений колебалось от 10 до 220.

Среди 8311 наблюдений вертикальных сдвижений в 1355 случаях суммарных вертикальных сдвижений и в 2067 случаях вертикальных сдвижений между двумя сериями наблюдений, или, соответственно, в 16 % и в 25 % случаев, фиксировалось поднятие. Следует

#### Таблица 2.4

Число поднятий	Общее число наблюдений на профильных линиях							
линиях	030	31—60	61—90	91—120	121-150	151-180	181-210	
0—7	· · · · ·	• • • • •		•••	* • •	•		
814			• $\eta_n = 0,0$	68n + 77	••		••	
1521		• • • •	•••		•	••		
22—28		•	•	•	••	•		
29—35		••	••			r = 0,273; o	r(r) = 0,092	
36—42			•	••	• • •	$\alpha = 4^\circ \pm 1^\circ$	0	
43—49		•	•••					

Взаимосвязь между общим числом паблюдений вертикальных сдвижений и числом поднятий (суммарпые вертикальные сдвижения)

#### Таблица 2.5

Взаимосвязь между общим числом наблюдений вертикальных сдвижений и числом подпятий (вертикальные сдвижения между двумя сериями)

Число поднятий	Общее число наблюдений на профильных линиях								
на профильных линиях	0—30	31-60	61—90	91-120	121-150	151-180	181-210		
0—9					•				
10—18		****	•		•				
19—27		• • • • • •			• • • •	•			
28—36		••			$\eta_c = 0.0$	••			
37—45			•		21	n+2,6			
46—54			••		•	<i>r</i> = 0,273			
55—63					•••	•			

Рис. 2.6. Корреляционные взаимосвязи между общим числом наблюдений *n* и числом наблюдавшихся поднятий:

а — суммарных вертикальных сдвижений реперов на месторождении п<sub>и</sub>: 6 — вертикальных сдвижений реперов на месторождении между сернями п<sub>е</sub>



отметить, что поднятия между сериями не только чаще встречаются, но имеют более тесную корреляционную связь



с общим числом наблюдений. Коэффициент корреляции их почти в три раза выше (см. табл. 2.4 и 2.5) (r = 0,723), чем у суммарных вертикальных сдвижений относительно начальных наблюдений (r = 0,273).

Корреляционные зависимости числа поднятий от общего числа наблюдений для обоих видов вертикальных сдвижений, несмотря на достаточно тесную взаимосвязь, не рекомендуются к использованию для прогнозирования числа поднятий на отдельных профильных линиях по причинам, отмеченным в предыдущем разделе.

При рассмотрении всех наблюдений, выполненных на одном месторождении, в качестве одного результата (см табл. 2.2) корреляционная связь поднятий и общего числа наблюдений на месторождении, как и в случае горизонтальных сдвижений, становится более тесной, чем по отдельным профильным линиям, и характеризуется коэффициентами 0,746 и 0,897 (рис. 2.6, *а* и б). В корреляционном анализе рассмотрено 14 месторождений с числом наблюдений от 106 на Лебяжинском (современные наблюдения) до 3182 на Северопесчанском, составляя в среднем 574 наблюдения на одно месторождение.

Таким образом, корреляционные зависимости числа поднятий от общего числа наблюдений по отдельным профильным линиям и в целом по месторождениям свидетельствуют о достаточно тесной взаимосвязи между ними, исключающей представления о поднятиях как о случайных явлениях. Минимальное число поднятий в обоих видах вертикальных сдвижений наблюдалось на Бакальском месторождении и составляло 4 % у суммарных вертикальных сдвижений и 7 % у вертикальных сдвижений между сериями. Максимальное число поднятий было на Сарановском месторождении и составляло, соответственно, 55 % и 50 %. Следовательно, при построении модели для прогнозирования параметров процесса сдвижения так называемые аномальные вертикальные сдвижения, так же как и горизонтальные, должны рассматриваться как нормальные закономерные проявления процесса сдвижения.

# 2.5. Взаимосвязь между "аномальными" проявлениями горизонтальных и вертикальных сдвижений

Вертикальные и горизонтальные сдвижения земной поверхности, исходя из геомеханических представлений о процессе сдвижения, являются следствиями изменения напряженно-деформированного состояния за счет образования зоны обрушения. В этом случае между "аномальными" проявлениями горизонтальных и вертикальных сдвижений должна существовать корреляционная зависимость.

В статистическом анализе, в соответствии с поставленной перед ним задачей принципиального выявления факта существования такой зависимости, используются только количественные показатели частоты проявления аномалий обоих видов сдвижений, как и в предыдущих разделах, причем вертикальные сдвижения рассматриваются суммарные, от начала наблюдения, и между отдельными сериями наблюдений. Корреляционная зависимость между числом горизонтальных сжатий, числом суммарных поднятий и поднятий между сериями по профильным линиям представлены, соответственно, в таблицах 2.6 и 2.7.

В этих взаимосвязях, по-прежнему, корреляционная зависимость вертикальных поднятий от числа горизонтальных сжатий теснее у поднятий, наблюдавшихся между двумя сериями измерений. У суммарных вертикальных поднятий коэффициент корреляции составляет 0,580, хотя корреляционная зависимость достаточно надежная, так как среднее квадратическое отклонение коэффициента корреляции не превышает 12 %. У вертикальных поднятий между сериями коэффициент корреляции 0,701, а его среднее квадратическое отклонение составляет 7 %. Еще более контрастна взаимосвязь между сжатиями интервалов и поднятиями реперов на месторождениях в целом (рис. 2.7). Коэффициенты корреляции в этом случае для суммарных вертикальных поднятий и поднятий между соседними сериями наблюдений составляют, соответственно, 0,840 и 0,876 при средних квадратических отклонениях менее 10 %, свидетельствующих о существовании тесной взаимосвязи.

#### Взаимосвязь между числом горизонтальных сжатий и числом суммарных вертикальных подпятий па профильных липиях



#### Таблица 2.7

Взаимосвязь между числом горизонтальных сжатий и числом поднятий между сериями наблюдений на профильных линиях

		-	Число г	оризонталь	ных сжатий		
Число поднятий	0—9	10-18	19—27	28—36	37—45	46—54	55—63
0—7		::::•	•				
8—14	:::·		•	•		r = 0,701; σ(	(r) = 0,051
1521	•	••••	·	***	•	· α =	37° ± 1°
22—28	•	• • • •	•••	$\cdot$	• • •	¥ -	
29—35		• •			~	•	
36—42	•		• •	••		$\eta_c = 0, \tau_A$	•
43—48		• •	• • •		** • *		EC* + 6





Таким образом, между количеством вертикальных поднятий и сжатий, как по отдельным профильным линиям, так и на месторождениях в целом, существует тесная взаимосвязь, подтверждающая общность причин их возникновения и закономерный характер "аномальных" проявлений сдвижений — поднятий и сжатий.

# 2.6. Обобщающие выводы об "аномалиях" в сдвижении горных пород и причинах их проявления

Рассмотренные результаты инструментальных наблюдений получены более чем за четверть века большим коллективом исследователей, включающим сотрудников Уральского филиала ВНИМИ, Института горного дела, экспедиции № 308 "Союзмаркштреста", маркшейдерских служб горных предприятий. "География" исследований распространяется на Северный, Средний и Южный Урал, Казахстан. Огромным многообразием отличаются горно-геологические условия разрабатываемых месторождений, геометрия рудных тел, свойства и структура руд и массива вмещающих пород, глубины разработки, параметры первоначального напряженного состояния и другие факторы. Несмотря на все это многообразие, противоречия между инструментальными наблюдениями и сложившимися понятиями прослеживаются во всей совокупности инструментальных наблюдений. Одновременно имеющееся многообразие способствует исключению элементов случайности в выводах.

Статистические данные по рассмотренной выше группе месторождений свидетельствуют, что участки мульды сдвижения со сжатиями и подъемами имеют достаточно широкое распространение. позволяющее отнести их к разряду закономерных проявлений при наличии зоны обрушения. Как следует из табл. 2.2 средняя доля интервалов, испытавших сжатие, по всем месторождениям составляет 24 % (1948 результатов из 8118). У поднятий аналогичный показатель составляет 17 % (1328 результатов из 8040) для суммарных вертикальных сдвижений и 23 % (1861 результат из 8040) для вертикальных сдвижений между двумя сериями наблюдений. Примечательно, что на различных месторождениях эти показатели изменяются в значительных диапазонах: у сжатий от 59 % до 13 %, у суммарных вертикальных сдвижений от 55 % до 4 % и у вертикальных сдвижений между сериями от 50 % до 7 %. Различие в интенсивности проявления сжатий и подъемов обусловлены, по-видимому, параметрами первоначального напряженного состояния массива горных пород, размерами и формой зоны обрушения и расположением профильных линий относительно зоны обрушения.

О единстве причин возникновения сжимающих деформаций и поднятий участков мульды сдвижения свидетельствует тесная корреляционная зависимость между частотами их проявления, характеризуемая коэффициентами 0,840 и 0,876.

Проведенный анализ результатов инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород показывает, что основные теоретические положения, выделенные в разделе 2.2, на многих месторождениях не согласуются с эмпирическими данными, а именно:

1. Векторы сдвижения реперов наблюдательных станций могут быть направлены как в сторону выработанного пространства и зоны обрушения, так и в глубь массива горных пород, от зоны обрушения. Некоторые характерные векторные диаграммы показаны на рис. 2.8—2.13.

2. Горизонтальные деформации сжатия в мульде сдвижения распространены столь же широко, как и растяжения.

3. Наряду с трещинами, возникающими в условиях растяжения, нередко образуются трещины в условиях сжатия — трещины сдвига в горизонтальной плоскости.

4. Вертикальные сдвижения проявляются в виде оседаний и поднятий.

5. Непостоянство направлений векторов сдвижения, особенно в краевых частях мульды сдвижения, а также направление их в глубь массива свидетельствует об отсутствии взаимосвязи между ними и предполагаемыми плоскостями сдвижения. Такая взаимосвязь характерна, по-видимому, для областей, прилегающих непосредственно к зоне обрушения, где процесс сдвижения происходит в виде скольжения по плоскостям и сползания в зону обрушения.



Рис. 2.8. Векторы сдвижения по профильной линии 12 Северопесчанского месторождения в 1974—1976 гг.



Рис. 2.9. Векторы сдвижения по профильной линии V Западно-Ревдинского участка в 1959—1971 гг.



Рис. 2.12. Векторы сдвижения по профильной линии I Сарановского месторождения в 1979—1981 гг.





Характер фактических проявлений процесса сдвижения, установленный на основе анализа инструментальных наблюдений, позволяет сформулировать основные рабочие положения, необходимые при построении теоретической модели для прогнозирования параметров процесса сдвижения горных пород:

1. Массив горных пород в области влияния горных работ, особенно в краевых частях мульды сдвижения, деформируется в результате изменений первоначального напряженного состояния в этой области, обусловленных образованием выработанного пространства и зоны обрушения.

2. Параметры процесса сдвижения, измеряемые инструментально в виде деформаций интервалов профильных линий и вертикальных сдвижений, определяются деформационными свойствами и параметрами первоначального напряженного состояния массива горных пород, размерами и формой зоны обрушения.

3. Массив вмещающих горных пород месторождений руд черных металлов в теоретических моделях при прогнозировании параметров процесса сдвижения в первом приближении может рассматриваться как упругая изотропная однородная среда с деформационными характеристиками, эквивалентными свойствам массива горных пород.

## ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

## 3.1. Горно-геологические условия, свойства и напряженное состояние массива горных пород рудных месторождений

Размеры залежей, свойства вмещающих пород, системы разработки, развитие очистных работ и другие характеристики месторождений руд черных металлов, разрабатываемых подземным способом на Урале и в Казахстане, варьируют в широких пределах, что создает благоприятные возможности для изучения закономерностей сдвижения горных пород (см. рис. 2.1, табл. 3.1). Масловское, Воронцовское, Ауэрбаховское и Алапаевское железорудные месторождения отработаны полностью. На Соколовском и Западно-Каражальском железорудных и Молодежном хромитовом месторождениях подземные горные работы достаточно развиты, но процесс сдвижения пока не получил полного развития. Остальные месторождения эксплуатируются от 20—30 до 50 лет и более, имея достаточно развитые мульды сдвижения, соответствующие применяемым системам разработки. К наиболее крупным месторождениям относятся Северопесчанское, Гороблагодатское, Высокогорское, Естюнинское, Западно-Каражальское, Соколовское и 40 лет Казахской ССР — Молодежное, первоначальные запасы которых превышают сотни миллионов тонн. Запасы остальных месторождений исчисляются в пределах десятков миллионов тонн, что и предопределило значительное число горнодобывающих предприятий с широким спектором условий и проявлений процесса сдвижения.

Разработка большинства месторождений производилась открытым и подземным способами. Верхняя часть, выходящая под наносы, как правило, отрабатывалась открытым способом, а нижние горизонты — подземным (Масловское, Ауэрбаховское, Алапаевское, Сарановское, Валуевское, Естюнинское, Бакальское, некоторые

## Таблица З.1

## Горно-геологическая характеристика месторождений

Месторождение, участок	Угол наде- ния, град	Форма рудных тел, мощность, м	Общие размеры уча- стка (простирание, падение), м×м
		X	Келезорулны
Покровское	0 25		250×600
Масповское	60 80	Пластообразная, 955	250×100
Bopowworkoe	0 30		230×100
Боронцовское	0	пластоооразная, 20	110×250
Ауэрбаховское	80—90	Гнездообразная столбо- образная, 10—60	Три участка 300— 500×200—250
Северопесчанское:		•	
Северопесчанский	70—80	Пластообразная, ослож- ненная на флангах, 20— 130	1800×600
Новопесчанский.	0—70	Пластообразная, дефор-	400×1000
Алапаевское	0—90	Линзообразная, грубоплас- тообразная, 2—30	
Гороблагодатское	30—50	Пластообразная, 10-50	450×400
Валуевское	25—30	Пластообразная, 20	750×600
Естюнинское	4075	Пластообразная, 15	1200×700
Высокогорское:		F	
Запално-ревлин-			
ский	50—60	Пластообразная, 8—20	500×700
ский	60—75	Пластообразная, 8—20	400×700
Геологический		I I	
блок 15	7590	Клиновидно-блоковая, 150	315×450
Геологический			
блок 21	75—90	Клиновидно-блоковая, 140	450×800
Леояжинское:			
Западный рудный			
пояс	70-90	Линзообразная, 10—60	1300×800
Восточный рудный	60-75	Грубопластообразная,	800×800
пояс		530	
Бакальское	0-45	Пластообразная, 10-80	200×300
Северошиханское	0—30	Пластообразная, 20—60	300×500
Соколовское	45—55	Пластообразная	1300×1000
Западно-Каражальское	30—50	Пластообразная	1200×1500

## руд черпых металлов Урала и Казахстана

and the second se			
Глубина залега- ния, м	Стросние вмещающих пород	Коэффициент крепости пород	Форма проявления процесса сдвижения
месторожд	ения		
60-120	Неслоистое	12-18	Провалы, зона террас и трещин
0	Неслоистое	10-12	Провалы, зона террас и трещин
80-120	Неслоистое	10-12	Воронки обрушения, провалы,
2005-24			зоны террас и трещин
0-100	Неслоистое	1217	Воронки обрушения, провалы,
00-1-			зоны трещин
250	Неслоистое.	8	Воронки обрушения, провалы,
	Грубослоистое		зоны террас и трещин
in Found			
270	Неслоистое	8-12	Воронки обрушения, провалы,
1.40			зоны террас и трещин
60	Слоистое	2-4	Провалы, зоны террас и трещин
50	Неслоистое	10-12	Провалы, зоны террас
0	Неслоистое	10-12	Провалы, террасы, трещины
0	Неслоистое	10-19	Воронки обрушения
Our ros			
0	Неслоистое	10-15	Провалы, зоны террас и трещин
0	Грубослоистое	10—15	Провалы, зоны террас и трещин
50	Неслоистое	10—15	Провалы, зоны террас и трещин
260	Неслоистое	10—15	Провалы, зоны террас и трещин
- anter a			[
0	Неслоистое	12—15	Провалы, зоны террас и трещин
50	Грубослоистое	46	Провалы, зоны террас и трещин
		8—10	
50	Грубослоистое	46	Воронки обрушения, зоны тер-
100	Грибоолонотор	1.6	рас и трещин
100	г рубослойстве	12_20	воронки оорушения, зоны тре-
200	Грубослоистое	6-10	Разработка с закладкой, воронки
			обрушения
100	Грубослоистое	10—15	Провалы, воронки обрушения,
1 Star			зоны террас и трещин
- CODE (1)	1		

Окончание табл. 3.1

Месторождение, участок	Угол паде- ния, град	Форма рудных тел, мощность, м	Общие размеры уча- стка (простирание, падение), м×м
		· · · ·	Хромитовые
Сарановское хромитовое	60—80	Пластообразная, 8—12	2000×300
40 лет Казахской ССР — Молодежное	20—30	Линзообразное, 30—200	1500×700
Джездинское	10—20	Пластообразная, 5—8	марганцевые 450×600

участки Высокогорского и Лебяжинского). На Покровском, Гороблагодатском, Высокогорском, Соколовском, Западно-Каражальском, Новобакальском и Молодежном месторождениях открытые и подземные работы ведутся одновременно на соседних участках, что накладывает отпечаток на развитие процесса сдвижения и специфику проблем обеспечения безопасности подрабатываемых объектов и самих горных работ.

Рудные тела залегают на различной глубине от поверхности. Некоторые выходят непосредственно под наносы, а на Северопесчанском, Соколовском, Молодежном и других месторождениях мощность покрывающих пород над слепыми рудными телами достигает 250—300 м. Максимальная глубина разработки достигает 500—650 м.

Мощность и размеры рудных тел и рудоносных толщ изменяются также в достаточно широких пределах. Отдельные рудные тела имеют мощность от 5—10 до 150—200 м, а мощность рудоносной зоны Соколовского месторождения достигает 600 м. Размеры отрабатываемых площадей в плане составляют от 200—300 до 2000 м. При достигнутых глубинах разработки эти размеры обеспечивают различную степень подработанности вмещающих пород.

Подавляющее большинство месторождений разрабатывается системами с обрушением вмещающих пород, вызывающими образование воронок обрушения, провалов, террас, трещин и плавных сдвижений. Соколовское месторождение из-за обводненной рыхлой толщи пород разрабатывается с закладкой выработанного пространства. На Соколовском и Джездинском месторождениях вмещающие породы по технологическим причинам поддерживаются регулярными и нерегулярными целиками и закладочным массивом.

Глубина залега- ния, м	Строение вмещающих пород	Коэффициснт крености пород	Форма проявления процесса сдвижения
месторожд	ения		
0	Грубослоистое	6—12	Воронки обрушения, провалы, зоны трещин
400	Блочное	7—10	Зона обрушения, зона трещин
месторожд	ения		
70	Блочное	6—10	Поддержание налегающей тол щи целиками

Крепость вмещающих пород наиболее распространена в пределах 10–15; лишь на отдельных месторождениях, таких как Масловское, Бакальское, Северошиханское, Соколовское и Лебяжинское, встречаются разновидности слабых пород с коэффициентом крепости 2—6. На Покровском, Ауэрбаховском и Северошиханском месторождениях крепость отдельных видов горных пород достигает 17—20. Строение вмещающих пород чаще всего неслоистое или грубослоистое. Слоистые породы встречаются лишь на Бакальском, Алапаевском и Сарановском хромитовых месторождениях.

В таблице 3.1 не отражены многие факторы, оказывающие влияние на процесс сдвижения, в том числе такие, как трещиноватость вмещающих пород и первоначальное или естественное напряженное состояние нетронутого массива горных пород.

Трещиноватость массива горных пород на многих месторождениях изучалась непосредственной съемкой элементов залегания трещин на обнажениях. Для основных массивов вмещающих пород характерна достаточно выдержанная нарушенность, включающая, как правило, 2—3, иногда 4, системы трещин. На отдельных месторождениях в зонах крупных тектонических нарушений встречаются участки с повышенной трещиноватостью, и в частности, на Северопесчанском месторождении, на Восточном рудном поясе Лебяжинского месторождения. Минимальная интенсивность трещиноватости свойственна Покровскому месторождению.

Параметры естественного поля напряжений нетронутого массива горных пород исследовали с применением различных методик. Большой объем работ по измерению напряжений был выполнен методами разгрузки на малых базах [80—82]. Горизонтальные напряжения нетронутого массива горных пород, полученные измере-

#### Таблица 3.2

Параметры естественного	поля напряжений жел	езорудных месторождений
Урала по результатам і	ізмерения па малых б	азах (методы разгрузок)

Месторождение	Глубина измере-	Горизонтальные на- пряжения, МПа		Азимут направле-	Горизонтальные напря- жения, приведенные к поверхности, МПа	
	ния, м	$\sigma_t$	$\sigma_2$	град	σ1	σ2
Северопесчанское	300	-7,4	-10,3	10	-4,1	-7,0
Гороблагодатское	170	-17,3	-23,8	98	-15,4	-21,9
Валуевское	60	-2,1	-4,9	28	-1,4	-4,2
Высокогорское	370	6,5	2,1	54	10,6	6,2
Лебяжинское	300	-7,8	-15,5	74	-4,5	-12,2

ниями на малых базах, приведены в табл. 3.2. Из таблицы следует основной вывод — естественному полю напряжений нетронутого массива горных пород присуща значительная анизотропия, превышающая 1,5 на Северопесчанском, Гороблагодатском и Высокогорском и 3,0 на Валуевском и Лебяжинском месторождениях. Очень существен разброс по величинам напряжений, составляющий от -15,4 МПа до 10,6 МПа для  $\sigma_1$  и от -21,9 МПа до 6,2 МПа для  $\sigma_2$ , т. е. имеют место сжимающие и растягивающие напряжения.

В последние годы ведутся работы по изучению первоначального напряженного состояния массива горных пород на больших базах применительно к вопросам сдвижения горных пород [83, 84]. Параметры поля напряжений некоторых железорудных месторождений приведены в табл. 3.3 (см. рис. 2.1). Разница в параметрах полей напряжений Северопесчанского, Гороблагодатского и Высокогорского месторождений, приведенных в табл. 3.2 и 3.3, объясняются различными базами измерений. Методами разгрузки на малых базах измерения проводят в пределах структурных блоков, поэтому интерпретация их на большие участки, на месторождения и регионы, как отмечалось в работах [82, 85—88], недостаточно обоснована.

Измерения на больших базах охватывают месторождение или его участок в целом и получаемые интегральные характеристики поля напряжений в большей мере соответствуют решению вопросов сдвижения горных пород. Однако экспериментальные работы в этом направлении нуждаются в продолжении. Из восемнадцати рассматриваемых месторождений измерения пока проведены на шести.

На современном этапе, видимо, целесообразно ограничиться выводом, что в реальном массиве горных пород действует анизот-

Параметры естественного поля напряжений железорудных месторождений Урала и Казахстана по результатам измерения на больших базах

Месторождение	Количе- ство из- мерений	Горизонтальные напряжения, МПа		Азимут направле-	Доверительные интер- валы с надежностью 0,95, МПа		
		$\sigma_i$	σ2	град	σι	σ2	
Покровское Северопесчанское Гороблагодатское Высокогорское Западно-Каражальское Соколовское*	45 220 85 168 42 53	-5,0 -1,5 -5,3 -6,7 -9,6 -2,9	-30,4 -9,6 -17,9 -12,3 -10,8 -5,9	50 96 124 66 175 177	$\pm 2,0$ $\pm 0,62$ $\pm 0,7$ $\pm 0,6$ $\pm 1,6$ $\pm 0,8$	$\pm 6,8$ $\pm 0,6$ $\pm 2,3$ $\pm 0,8$ $\pm 2,0$ $\pm 2,3$	

\* Измерения на Соколовском месторождении проводились в подземных условиях на глубине 250 м. Приведенные к поверхности горизонтальные напряжения должны быть равны  $\sigma_1 = -0.7$  МПа,  $\sigma_2 = -3.7$  МПа.

ропное напряженное состояние, подтвержденное приведенными аномалиями в развитии процесса сдвижения.

Таким образом, несмотря на разнообразие горно-геологических условий месторождений руд черных металлов, основным факторам, определяющим развитие процесса сдвижения, присущи общие признаки:

— месторождения руд черных металлов залегают в скальных породах;

— разработка системами с обрушением приводит, чаще всего, к образованию зон обрушения, трещин и плавных сдвижений;

— первоначальное напряженное состояние характеризуется высоким уровнем анизотропии горизонтальных напряжений, определяя особенности сдвижения горных пород и земной поверхности.

## 3.2. Факторы, определяющие геомеханическую модель процесса сдвижения разрабатываемого рудного месторождения

Экспериментальные и теоретические исследования сдвижения горных пород, относящегося к сложным природным явлениям, сопряжены со многими трудностями. В частности, полное представление о параметрах процесса сдвижения горных пород при разработке мощных рудных тел можно получить с помощью инструментальных наблюдений лишь после завершения разработки месторождения, т. е. по истечении 30—50 лет и более. Недостаточная надежность интерполяции результатов наблюдения обусловлена тем, что на месторождениях подобного типа, как правило, отсутствует так называемая установившаяся стадия процесса сдвижения и каждому периоду разработки присущи свои параметры. Кроме того, в большинстве случаев остается скрытым процесс сдвижения промежуточной толщи пород между горными выработками и земной поверхностью, так как применяемые методы наблюдения дают весьма ограниченную информацию.

Проведению теоретических исследований с использованием математического аппарата механики сплошной среды в значительной мере препятствуют сложности строения реальных массивов горных пород и слабая изученность их свойств и поведения в сложных условиях нагружения. "Вследствие исключительной сложности структуры и текстуры реальных горных пород в теоретических разделах петромеханики для получения законченных в математическом смысле решений часто также схематизируют (упрощают) структуру и тестуру, задачи горного давления и явления равновесия и сдвижения горных пород, так же как и их физико-технические параметры и свойства" [89].

Трудности непосредственного изучения многих сторон процесса сдвижения горных пород предопределили моделированию важную роль в науке о сдвижении, как и в других областях современного познания. Упрощение и схематизация реального явления и среды, в которой оно протекает, приводят к замене исследуемого процесса его моделью, под которой подразумевается принятое в философии понятие — мысленно представляемая или материально реализуемая система, которая, отражая и воспроизводя объект исследования, замещает его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте [90]. Примеры некоторых геомеханических моделей процесса деформирования и разрушения вмещающих пород на разрабатываемых месторождениях, использовавшихся на различных этапах истории развития науки о сдвижении горных пород, приведены в разделе 1.2. Модели содержали среду, которой придавались определенные свойства, отражавшие главные качества реального горного массива, выработанное пространство с присущими ему размерами, формой и положением относительно земной поверхности и напряженное состояние среды, связанное преимущественно с собственным весом пород.

Несмотря на то, что даже самые совершенные модели не отражают со всей полнотой реальную действительность, использование их является целесообразным и необходимым этапом научных исследований, позволяющим выделить основные черты исследуемого явления, изучить взаимосвязи между параметрами процесса и отдельными факторами. Созданию общей модели процесса сдвижения горных пород, пригодной для любых условий разработки, препятствует многообразие и недостаточная изученность свойств массива горных пород и его начального состояния, математические трудности в описании закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в зоне влияния горных работ и другие нерешенные вопросы. В последующих разделах работы изложены исследования геомеханической модели процесса сдвижения на рудных месторождениях, разработка которых сопровождается выходом зоны обрушения на земную поверхность. При ее построении был принят ряд упрощений, обоснованность которых может быть оценена по конечным результатам из сравнения данных теоретических исследований с практикой.

Форма, характер и параметры процесса сдвижения, как отмечалось выше, зависят от комплекса факторов, оказывающих, в свою очередь, влияние на построение модели. Условно их можно разделить на следующие группы, определяющие различные стороны процесса сдвижения: 1. Свойства массива горных пород. 2. Состояние массива горных пород до начала разработки месторождения. 3. Геометрические параметры разрабатываемых рудных тел. 4. Технологию разработки месторождения.

Большинство месторождений руд черных металлов Урала и Казахстана залегает в неслоистых массивах горных пород. Так, из двадцати трех участков и месторождений, приведенных в табл. 3.1, слоистое строение толщи встречается на двух месторождениях, на шести — грубослоистое, которое в большей мере можно отнести к неслоистому. Породы, как правило, представлены изверженными метаморфизованными разновидностями, отличительными особенностями которых являются достаточно высокая крепость и жесткость, оказывают определяющее влияние на характер проявления процесса сдвижения, происходящего с образованием зоны обрушения и с ограниченным уровнем плавных деформаций, и на выбор соответствующих свойств среды модели.

К факторам, характеризующим состояние массива горных пород, относятся параметры напряженного состояния, действующего в нетронутом массиве. В разделе 3.1 отмечалось, что железорудные, хромитовые и марганцевые месторождения разрабатываются в районах с современной тектонической деятельностью, где наряду с гравитационными силами, характеризуемыми изотропными тензорами напряжений, нередко встречаются анизотропные поля тектонических напряжений, выступающие причиной аномальных проявлений процесса сдвижения. Наличию анизотропии способствует отмеченная выше жесткость пород, снижающая явления релаксации напряжений. Следовательно, в геомеханической модели необходимо иметь возможность задания различных параметров первоначального напряженного состояния — граничных условий.

Характерной чертой современных горных предприятий черной металлургии является постоянное наращивание их производственной мощности. Требуемые объемы добычи обеспечиваются вовлечением в эксплуатацию рудных тел с большими запасами и применением высокопроизводительных систем. Из табл. 3.1 следует, что на большинстве предприятий разрабатываются мощные рудные тела с размерами в плане, превышающими глубины разработки. Пустоты, образуемые в процессе их добычи, в сочетании с отмеченной выше склонностью пород к хрупкому разрушению, вызывают обязательное образование зоны обрушения в налегающей толще пород с выходом ее на земную поверхность. Зона обрушения на различных этапах разработки месторождения изменяет размеры и форму, вызывая соответствующие изменения в модели.

Технология разработки месторождений руд черных металлов предполагает, как правило, применение систем с обрушением вмещающих пород. Закладка выработанного пространства, изменяющая характер развития процесса сдвижения, применяется в особых случаях, связанных с разработкой месторождений в сложных гидрогеологических условиях, с выемкой запасов под охраняемыми объектами и в других случаях, для которых разработанные положения не подходят.

Таким образом, в самом общем виде геомеханическая модель процесса сдвижения горных пород при разработке месторождений руд черных металлов, на которых образуются зоны обрушения, может быть представлена, как на рисунке 3.1. В нижнем полупространстве, сложенном крепким упругим материалом, образуется открытая выемка, заполненная разрыхленным материалом, отображающая зону обрушения. Равновесие в первоначальном поле напряжений, нарушенное образованием выемки, восстанавливается за счет перераспределения напряжений в зоне влияния, сопровождаемого соответствующими деформациями и сдвижениями. Зона влияния, согласно принципу Сен-Венана, имеет в плане ограниченные размеры. Закономерности деформирования среды описываются математическим аппаратом механики сплошной среды.

## 3.3. Геометрические параметры модели сдвижения горных пород

Процесс сдвижения горных пород, как известно, зарождается непосредственно у места производства горных работ и, захватывая значительные по размерам области в окружающем массиве горных



Рис. 3.1. Схематическая модель процесса сдвижения: *I* — область влияния горных работ; 2 — зона трещин; 3 — зона обрушения; 4 — рудное тело; *5* — выработанное пространство

Таблица	3	.4
---------	---	----

M						
месторождение	β‴	۲"	β.‴	δ‴	- Источник	
Покровское	80	80		80	[41]	
Воронцовское	80	80	í —	80	[41]	
Ауэрбаховское	85		85	85	[41]	
Северопесчанское	80	<u> </u>	65	80	[92, 94]	
Алапаевское	65	_	65	65	[41]	
Гороблагодатское	75	75		80	1951	
Валуевское	105	_		85	[95]	
Высокогорское, Восточно-						
и Западно-Ревдинские залежи	95			85	[93]	
Высокогорское, геологический						
блок 15	80	_	80	80	[41]	
Лебяжинское, Западный пояс	80		80	80	[41, 95]	
Лебяжинское, Восточный пояс	70	_	—	80	[41]	
Сарановское хромитовое	85		85	85		
Бакальское	65	70		75	[41]	
Северошиханское	95		95	95		
Западно-Каражальское	85	_	85	85	[73]	

Значения углов обрушения вмещающих пород месторождений руд черных металлов Урала и Казахстана

пород, проявляется на земной поверхности задолго до выхода обрушения. Специальные исследования, выполненные при проходке туннелей большого сечения, свидетельствуют, что вертикальные и горизонтальные сдвижения земной поверхности, вызванные проходкой одиночной выработки на глубинах 50—70 м, легко улавливаются обычными методами инструментальных наблюдений [91].

С выходом обрушения на земную поверхность завершается скрытая стадия и начинается основная, так называемая установившаяся форма развития процесса сдвижения. Однако к установившейся форме процесс сдвижения можно отнести лишь условно, подразумевая под этим только качественную сторону явления. В этот период, действительно, формируются и сохраняются в последующем все основные зоны, присущие области влияния очистных работ, а именно: зона обрушения, зона трещин и зона плавных деформаций. Численные же значения параметров процесса сдвижения при последующей разработке месторождения могут претерпеть серьезные изменения.

Положение границ зоны обрушения в пространстве определяется размерами и формой разрабатываемых рудных тел и углами обрушения во вмещающих породах. Результаты многолетних инструментальных наблюдений на железорудных месторождениях Урала и Казахстана, приведенные в табл. 3.4, свидетельствуют, что углы обрушения изменяются в пределах 65—95°, причем угол обрушения 65° наблюдался только на Бакальском и Алапаевском месторождениях, разработка которых в настоящее время завершена. На разрабатываемых в настоящее время месторождениях этот диапазон еще меньше и составляет 70—95°. На железорудных месторождениях Горной Шории и Хакасии углы обрушения около 70° [54].

Таким образом, схематически зону обрушения можно представить в виде полости в массиве горных пород, заполненной обрушенными породами. Ее боковые границы отстраиваются от нижних контуров выработанного пространства под углами обрушения.

Размеры и форма зоны обрушения на земной поверхности и на различных глубинах определяются отработанной площадью и углами обрушения. На нижних горизонтах, прилегающих непосредственно к очистным работам, горизонтальные сечения зоны обрушения могут быть близки к контурам отработки. Выше, по мере удаления от выработанного пространства, это подобие может проявиться лишь в крупном плане без повторения деталей.

На большинстве месторождений руд черных металлов Урала, Казахстана и других бассейнов форма зоны обрушения на земной поверхности близка к кругу или эллипсу, что дает возможность в расчетной модели реальную зону обрушения представлять в виде правильных фигур. Статистические исследования отклонений фактических границ зоны обрушения от расчетных на ряде разрабатываемых месторождений, результаты которых представлены в табл. 3.5, свидетельствуют о возможности замены реального контура расчетным. На каждом из исследуемых месторождений фактический контур зоны обрушения заменялся расчетным эллипсом или кругом так, чтобы площади реальной и расчетной фигур были одинаковыми. Отклонения измерялись в 48 точках расчетного контура, расположенных регулярно через 7,5°.

Статистическими исследованиями определялись доверительный интервал отклонений с надежностью 0,99, значения эксцесса (E) и асимметрии ( $S_{\kappa}$ ), характеризующих соответствие распределения отклонений нормальному закону. Распределение удовлетворяет нормальному закону, если значения эксцесса и асимметрии меньше их трех среднеквадратических отклонений [96].

$$|S_{\kappa}| < 3\sigma'(S_{\kappa}); \tag{3.1}$$

$$|E| < 3\sigma'(E), \tag{3.2}$$

65

#### Таблица 3.5

Месторождение, участок, год	Расчетная форма зо- ны обру- шения	Радиус зоны обруше- ния, мм	Модуль эллип- тичнос- ти <i>т</i> і	Довери- тельный интервал отклоне- ний, мм	Асимме- трия S <sub>к</sub>	Эксцесс Е	Соотно- шение с нормаль- ным рас- пределе- нисм
Покровское, 1965	Эллипс	95	0,263	±2,5	0,278	-0,427	Удов- летво- ритель- ное
Гороблагодатское, 1965 Высокогорское, Вос- точно-Ревдинский учас-	Эллипс	95	0,231	±2,2	0,371	0,280	То же
ток, 1970 Высокогорское, общая зона Восточно- и Запад- но-Ревдинских участков.	Эллипс	87,5	0,200	±3,1	-0,589	0,450	
1977 Гороблагодатское, 1980 Северопесчанское, 1973 Северопесчанское, 1975	Эллипс Эллипс Круг Эллипс	138 260 115 140	0,345 0,310  0,072	±7,1 ±9,9 ±3,8 ±4,9	0,561 0,624 0,595 0,150	0,370 -0,12 -0,170 0,100	'' ''

#### Результаты статистических исследований отклонений фактических и расчетных контуров зон обрушения

где  $\sigma'(S_{\kappa}) \approx \sqrt{\frac{6}{n}} = \sqrt{\frac{6}{48}} = 0,354$  — среднеквадратическое отклоне-

ние асимметрии;

$$\sigma'(E) \approx \sqrt{\frac{24}{n}} = \sqrt{\frac{24}{48}} = 0,707$$
 — среднеквадратическое отклоне-

#### ние эксцесса;

n = 48 — число исследуемых точек на контуре.

На рис. 3.2 и 3.3 показаны для примера действительный и расчетный контуры зоны обрушения Гороблагодатского месторождения и гистограмма распределений их отклонений.

Проведенные статистические исследования свидетельствуют, что отклонения между реальным и расчетным контурами зоны обрушения подчиняются нормальному закону распределения случайных величин, причем доверительный интервал отклонений не превышает 2—5 % от радиуса зоны обрушения. Таким образом, структура массива горных пород, являющаяся одной из основных причин образования неправильных границ зоны обрушения, не препятству-



Рис. 3.2. Граница зоны обрушения на Гороблагодатском месторождении и аппроксимирующий ее эллипс (состояние 1965 г.)

Рис. 3.3. Гистограмма распределения отклонений реального контура зоны обрушения от теоретического на Гороблагодатском месторождении



1.2.3 - тензометры

ет применению геометрически правильных расчетных контуров, так как отклонения носят местный случайный характер.

Напряженно-деформированное состояние модели, в соответствии с ее геометрическими пространственными параметрами, имеет объемный характер. Однако математическое решение такого рода задачи в аналитическом виде, пригодном для инженерных расчетов, имеется только для круглой цилиндрической полости большой длины, когда ее торец находится на достаточном удалении от рассматриваемой плоскости или земной поверхности [97]. Для полостей с эллиптическим поперечным сечением подобные аналитические решения пока отсутствуют.

Расчет деформаций и сдвижений весьма эффективно может производиться с использованием плоской задачи теории упругости. Математический аппарат для зон обрушения с круглым и эллиптическим сечениями приведен ниже. Ограничения на применение плоской задачи накладывает влияние торца зоны обрушения. Расчетное сечение или земная поверхность могут рассматриваться в плоском напряженном состоянии только в том случае, если они достаточно удалены от торца. Вопрос о влиянии торца цилиндрической полости на распределение напряжений на поверхности исследовался ранее автором при разработке метода измерения напряжений частичной разгрузкой [80]. Было установлено, что торец скважины не влияет на деформации поверхности при его удалении от поверхности более чем на диаметр скважины (рис. 3.4). Позднее этот вопрос исследовался на объемных фотоупругих моделях [98]. Из результатов моделирования следовало, что напряженно-деформированное состояние на поверхности остается неизменным после достижения глубины зоны обрушения большей ее диаметра, причем это положение имело место во всем исследуемом диапазоне углов обрушения от 60° до 90° (рис. 3.5).

Таким образом, геометрическое строение модели процесса сдвижения основывается на следующих положениях. В нижнем полупространстве образуется полость, отображающая в соответствующем масштабе зону обрушения (рис. 3.6). Нижняя граница зоны обрушения совпадает с нижней площадью разработки. Боковыми границами являются поверхности, отстроенные от границ площади разработки под углами обрушения. Действительные границы зоны обрушения в массиве горных пород и на земной поверхности заменяются расчетными, в качестве которых применяются окружность и эллипс. Модель пригодна для применения математического аппарата плоской и объемной задач механики сплошной среды. Применение плоской задачи допустимо при глубине разработки, превышающей диаметр зоны обрушения.



Рис. 3.5. Теоретическое и экспериментальное распределение напряжений вокруг отверстия:
 *a* – при *H* = *R*; *б* – *H* = 3*R*; – теоретическое; –ο- – экспериментальное при β<sup>'''</sup> = 70°; –Δ- — экспериментальное при β<sup>'''</sup> = 90°



Рис. 3.6. Геометрические параметры модели процесса сдвижения: *а* — при провале круглой формы; *б* — при провале эллиптической формы В области геометрических параметров при построении модели сделаны следующие упрощения:

1. Реальные границы зоны обрушения на земной поверхности и в массиве горных пород заменены правильными геометрическими фигурами — окружностью или эллипсом.

2. Описание напряженно-деформированного состояния объемной модели осуществляется математическим аппаратом для плоского напряженного состояния.

## 3.4. Деформационные свойства среды модели

Геомеханическая модель процесса сдвижения горных пород, описанная выше, не накладывает дополнительных ограничений на свойства пород, кроме отмеченных в разделе 2.2 особенностей, присущих скальным массивам вмещающих пород железорудных месторождений — высокой крепости, достаточно выраженной жесткости и склонности к хрупкому разрушению, обобщенных академиком В. В. Ржевским в понятие начальной неподвижности [89, 100, 101]. Что касается поведения среды под нагрузкой, то в модели возможно использование сред, наделенных упругими, упруго-пластическими и иными свойствами.

Современная горная наука и другие области научных знаний располагают обширными сведениями о физических и механических свойствах горных пород в куске, позволяющими обоснованно решать многие горнотехнологические задачи. Большой вклад в развитие исследований в этой области в последние два десятилетия внесла школа, возглавляемая академиком В. В. Ржевским [102, 103]. Исследования же свойств пород в массивах, в условиях их естественного залегания пока носят единичный характер и касаются, в основном, относительно небольших объемов. Поэтому выбор деформационных свойств модели сопряжен с серьезными трудностями, обусловленными недостаточной изученностью поведения горных пород в массивах, вовлекаемых в процесс сдвижения.

Реальный массив скальных пород обладает чрезвычайно сложной структурой, определяющей в значительной мере его поведение под нагрузкой. Современные инженерно-геологические и горнотехнические классификации, используемые большинством исследователей, выделяют, в зависимости от масштабов проявления, несколько порядков (уровней, классов) структурных неоднородностей [102—105]. К неоднородностям нулевого порядка относят наиболее крупные нарушения, связанные с региональными полями тектонических напряжений, разбивающие участки земной коры на блоки.
Неоднородности первого порядка включают тектонические разрывы с линейными размерами от 100 м до 10 км и разбивают массив горных пород на структурные блоки соответствующих размеров. Их происхождение обычно связывают с проявлениями локальных полей тектонических напряжений.

К неоднородностям второго порядка относятся видимые в обнажениях макротрещины с линейными размерами от 10 см до 100 м.

Микротрещины и дефекты кристаллической решетки минералов относятся к неоднородностям третьего и четвертого порядков. Размер микротрещин условно ограничивается величинами 0,01— 10 см.

Таким образом, массив горных пород представляет собой сложную систему структурных блоков различных размеров, образуемую совокупностью неоднородностей и дефектов различных порядков. Пример подобного строения массива горных пород показан на рис. 3.7.

Влияние трещин третьего и четвертого порядков на деформационные и прочностные свойства учитывается стандартными испытаниями образцов пород. Наиболее мелкие трещины второго порядка с размерами до нескольких метров оказывают влияние на результаты натурных испытаний с помощью гидроподушек, гидродомкратов, штампов, напорных туннелей и другими способами. О свойствах более крупных массивов и влиянии всего комплекса нарушений пока можно судить лишь по некоторым косвенным данным.

В сдвижении горных пород принимают участие массивы различных размеров. Так, при изучении общих закономерностей процесса сдвижения на месторождении размеры деформируемого участка составляют от сотен метров до 1—2 километров. Решения частных вопросов охраны подрабатываемых объектов, проведение инструментальных наблюдений и интерпретация их результатов связаны с деформациями участков размерами в десятки и сотни метров. В обоих случаях в качестве деформируемой среды выступает массив горных пород. Но относительно размеров элементарного объема, отражающего в полной мере свойства массива горных пород, имеющиеся экспериментальные данные пока не дают однозначного ответа.

Сложность экспериментального определения деформационных свойств массива горных пород обусловлена техническими трудностями нагружения участков больших размеров. Наиболее развиты экспериментальные работы в этой области в гидротехническом строительстве [107—110]. Размеры испытываемых объемов, как правило, не превышают нескольких метров или первых десятков метров. Экспериментальные данные о деформационных свойствах





массива горных пород свидетельствуют, что в первом приближении массив скальных пород на испытываемых базах может рассматриваться как упругая среда.

Обоснованию возможности и целесообразности теоретических методов анализа напряженно-деформированного состояния и применения теории упругости посвящены работы многих ученых, в том числе А. Н. Динника [111], С. Г. Авершина [112], К. В. Руппенейта и Ю. М. Либермана [113, 114, 115], А. В. Докукина, С. Е. Чиркова и Б. К. Нореля [116] и других. Х. Гупта и Б. Растоги [117] описывают экспериментальные и теоретические исследования, проведенные в США при заполнении крупных водохранилищ: Мид, Либби и Дворжах. Величины оседаний земной поверхности, измеренные повторными нивелированиями, согласуются с результатами расчета по схеме упругого прогиба участка земной коры; причем наблюдения охватывали период более 25 лет. Т. Рикитаке [118] приводит результаты инструментальных измерений деформаций в районах землетрясений, свидетельствующие, что массивы горных пород на участках в несколько километров деформируются как упругая однородная изотропная среда.

Промышленные эксперименты на железорудных месторождениях Урала, описанные ниже, свидетельствуют, что расчеты деформаций и сдвижений с использованием однородной упругой изотропной модели массива горных пород дают в большинстве случаев результаты, хорошо согласующиеся с опытом. Это дает возможность пользоваться расчетами не только в методическом плане, но и для инженерно-технических целей. Определение конкретных значений деформационных характеристик при решении практических вопросов может осуществляться теоретическими методами [119], непосредственными экспериментами [109, 110] или с помощью эмпирических корреляционных связей [108].

В практике исследования сдвижения горных пород на железорудных месторождениях Урала и Казахстана использовалась методика института Гидропроект [108]. В последние годы в Институте горного дела УрО РАН разработан экспериментальный метод определения модуля деформации на базах, превышающих километры [120]. Метод основан на измерении деформаций земной поверхности, вызванных нарушением равновесия на участке земной коры за счет разработки месторождения, отсыпки отвалов и других видов масштабного воздействия [99]. Определение модуля деформации массива на километровых и близких к ним базах наиболее полно соответствует условиям развития процесса сдвижения горных пород на рудных месторождениях, решению задач по прогнозу и управлению его основными параметрами.

F Таким образом, на современном этапе в качестве первого приближения целесообразно материал модели сдвижения горных пород на месторождениях руд черных металлов со скальными вмещающими породами принимать в виде упругой однородной изотропной среды. Введение иных свойств среды, приближающих поведение модели к реальному массиву горных пород, будет, несомненно, способствовать более глубокому проникновению в сущность происходящих явлений, уточнению прогноза параметров сдвижения, но на современном этапе едва ли возможно и целесообразно. Применение упругой среды модели позволяет снять рассмотренные выше противоречия между некоторыми сформировавшимися теоретическими положениями и экспериментальными данными, вскрыть некоторые важные закономерности развития процесса сдвижения и повысить обоснованность решения ряда вопросов охраны сооружений от подработки. Однако и в случае использования уточненных сред с углублением познаний о процессе сдвижения, с разработкой и совершенствованием методов прогноза его параметров неизбежно возникнут новые противоречия и неувязки. Если ранее они выступали в виде качественных категорий — направление векторов сдвижения к выработанному пространству или в глубь массива, растяжение или сжатие интервалов, подъем или оседание реперов и т. п., — то в дальнейшем, видимо, речь пойдет о противоречиях численного характера, изменении величин сдвижений во времени. Разрешение новых противоречий потребует уточнения самой модели, свойств ее среды, математического аппарата и других совершенствований. Такой ход развития теории естествен и диктуется законами теории познания.

## 3.5. Граничные условия в массиве горных пород и задание их на модели

Граничные условия включают систему сил и деформаций, действующих по плоскостям, ограничивающим область массива горных пород, затронутую процессом сдвижения. Их величины и направления определяются непосредственно параметрами первоначального напряженного состояния нетронутого массива. Среди выделенных выше факторов, влияющих на развитие процесса сдвижения, граничные условия играют активную роль, поэтому, наряду с геометрическими параметрами и свойствами среды, целесообразно остановиться подробнее на реальных напряжениях в массиве горных пород, их задании на моделях, на принимаемых допусках и упрощениях.

При образовании зоны обрушения массив горных пород в ее пределах изменяет свои первоначальные свойства, переходя в разрыхленное состояние. В соответствии с изменениями свойств меняется и характер взаимодействия среды зоны обрушения с окружающими горными породами. В ненарушенном состоянии горные породы в будущем контуре зоны обрушения обеспечивали равновесие за счет ответной реакции воздействию окружающих пород; при их разрыхлении упругий отпор заменяется боковым распором обрушенных пород. Величина его меньше бокового распора пород в массиве и может быть определена по аналогии с давлением сыпучего материала на подпорную стенку из выражения

$$\sigma_{\rm ob} = \gamma_{\rm ob} [H \cos^2 \beta^{\prime\prime\prime} + \eta_{\rm ob} (H - h_0) \sin^2 \beta^{\prime\prime\prime}], \qquad (3.3)$$

где  $\sigma_{00}$  — давление обрушенных пород на стенки провала, МПа;

γ<sub>00</sub> — плотность обрушенных пород, МН/м<sup>3</sup>;

h<sub>0</sub> — высота свободностоящей вертикальной стенки обрушенных пород, м;

*H* — глубина от поверхности до рассматриваемой точки (мощность налегающих обрушенных пород), м;

β<sup>'''</sup> — угол наклона стенок провала (угол обрушения вмещающих пород), град;

 $\eta_{\sigma\sigma} = \frac{1 - \sin\rho}{1 + \sin\rho}$ — коэффициент бокового давления обру-

шенных пород;

ρ — угол внутреннего трения пород в зоне обрушения, град.

Вертикальные напряжения на земной поверхности остаются, как и до начала разработки, равными нулю, а по наклонным стенкам провала и его нижней границе — днищу выработанного пространства — изменяются за счет разницы плотности пород в естественном и обрушенном состоянии (рис. 3.8).

$$\Delta \sigma_{\rm s} = H(\gamma_{\rm M} - \gamma_{\rm o6}), \tag{3.4}$$

где  $\Delta \sigma_{2}$  — изменения вертикальных напряжений, МПа;

γ<sub>м</sub> — плотность массива горных пород в ненарушенном состоянии, MH/м<sup>3</sup>.

Остальные обозначения аналогичны таковым в выражении (3.3)

Из выражения (3.4) следует, что изменения вертикальных напряжений по граничным плоскостям зоны обрушения в статическом состоянии пропорциональны глубине.



Рис. 3.8. Граничные условия в массиве горных пород модели процесса сдвижения

Первоначальные горизонтальные напряжения, действующие на внешние границы, в общем случае включают следующие компоненты:

1) силы бокового распора от действия веса налегающей толщи пород, определяемые из выражения

$$\sigma_{\rm r} = \sigma_{\rm s} \eta_{\rm M} = \gamma_{\rm M} H \frac{\mu}{1-\mu}, \qquad (3.5)$$

— коэффициент бокового распора в массиве горных

пород;

главных нормальных напряжений от, от и направлением их действия α (угол α отсчитывается от оси х до σ<sub>т1</sub> против часовой стрелки).

Параметры суммарного поля напряжений могут быть записаны в следующем виде:

$$\sigma_{1} = \sigma_{\tau 1} + \gamma_{M} H \frac{\mu}{1-\mu};$$

$$\sigma_{2} = \sigma_{\tau 2} + \gamma_{M} H \frac{\mu}{1-\mu}.$$
(3.6)

В этих выражениях вторые слагаемые, соответствующие боковому распору, одинаковы, поэтому анизотропию поля горизонтальных напряжений создают тектонические силы. Направления действия главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответствуют направлениям тектонических напряжений, так как круговой тензор напряжений бокового распора не придает направленности суммарному полю напряжений.

Таким образом, по вертикальным плоскостям, ограничивающим область влияния горных работ, действуют горизонтальные напряжения, определяемые выражением (3.6), величины которых в процессе разработки остаются неизменными. В целом, в массиве горных пород, подверженном плавным деформациям процесса сдвижения, и в его геомеханической модели выделяются две системы сил: по наружным границам — компоненты первоначального напряженного состояния, а по внутренней границе — боковой распор от обрушенных пород.

Величины нагрузок, задаваемых по граничным контурам, соответствуют конкретным значениям сил, действующих на расчетной глубине. Давление обрушенных пород может быть определено из выражения (3.3). Относительно естественных горизонтальных напряжений, действующих по внешнему контуру, а также о вертикальных тектонических напряжениях в современной науке не сформировались достаточно четкие и ясные представления. Применяемые методы измерения первоначальных напряжений, как уже отмечалось ранее, обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих их возможности и снижающих достоверность получаемой информации. Кроме того, разрозненность и недостаточный объем выполненных измерений не позволяют проследить закономерности формирования напряженного состояния в конкретных условиях отдельных районов. Однако некоторые обобщения могут быть получены на основе статистических исследований результатов инструментальных измерений напряжений, приведенных в Приложении 1. Эмпирические данные, заимствованные из работ [81, 82, 121, 122], не исчерпывают всей совокупности имеющихся результатов измерения напряжений. По оценке Н. К. Булина число единичных замеров напряжений в 1973 г. составляло около 30 000, а количество объектов, на которых они выполнялись, превышало 100 [123]. Но используемые эмпирические результаты достаточно широко охватывают различные по условиям геологические регионы земного шара, что важно для обеспечения достоверности и представительности статистических исследований.

Вертикальные напряжения на каждом объекте измерялись на различных глубинах, поэтому статистической обработке подвергалась разница между эмпирическими значениями вертикальных напряжений и давлением налегающей толщи пород. Эта разница по своему смыслу представляет собой тектоническую составляющую вертикальных напряжений и является сопоставимой величиной для каждого объекта измерения. Среднее значение вертикальных тектонических напряжений определяется из обычного выражения

$$\bar{\sigma}_{zr} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\sigma_{zri} - \gamma_{M}H)}{n} , \qquad (3.7)$$

где б<sub>-т</sub> — среднее значение вертикальных тектонических напряжений;

б<sub>тті</sub> — эмпирические значения напряжений в точках измерения:

i = 1, 2, ... — номера пунктов измерения;

C

*п* — число измерений.

Остальные обозначения аналогичны обозначениям в (3.3) и (3.4).

Среднее значение вертикальных тектонических напряжений составляет 0,4 МПа с доверительным интервалом ±1,3 МПа при вероятности 0,99.

Для последующих выводов важно выявить, являются ли вертикальные тектонические напряжения, приведенные в Приложении 1, случайными величинами, численно характеризующими случайные явления и отражающими многообразие неучтенных колебаний условий измерения, и подчиняются ли они нормальному закону распределения. На рис. 3.9 представлена гистограмма относительных частот и эмпирическая кривая распределения тектонических вертикальных напряжений. О степени точности соблюдения нормального закона распределения можно судить по отклонению эксцесса и асимметрии эмпирического распределения от их теоретических значений.



Рис. 3.9. Гистограмма относительных частот и эмпирическая кривая распределения тектонических вертикальных напряжений

Величины эксцесса и его среднего квадратического отклонения определяются из выражений [96]

$$E = \frac{\mu'_4}{(\mu'_2)^2} - 3;$$

$$\sigma'(E) \approx \sqrt{\frac{24}{n}},$$
(3.8)

где 
$$\mu_4' = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{zri} - \overline{\sigma}_{zr})^4}{n}$$
 — центральный момент четвертого по-

рядка;

 $\mu_{2}' = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\sigma_{zri} - \overline{\sigma}_{zr})^{2}}{n}$  — центральный момент второго порядка; n — число измерений. Для ряда, приведенного в Приложении 1, эксцесс можно считать несущественным, так как |E| = 1,3 не превышает  $3\sigma'(E) = 3 \cdot 0,42 = 1,3$ . Показатель асимметрии и его среднее квадратическое отклонение определяются из выражений [96]

$$=\frac{\mu'_{3}}{\left(\sigma_{\sigma_{\text{ET}}}\right)^{3}};$$
  
$$S_{\kappa} \approx \sqrt{\frac{6}{n}},$$

S<sub>K</sub> :

(3.9)

 $= \frac{\sum_{j=1}^{n} (\sigma_{z\tau i} - \overline{\sigma}_{z\tau})^2}{n}$  — центральный момент третьего порядка;  $\sigma_{z\tau}$  — среднее квадратическое отклонение

вертикальных тектонических напряжений.

Эмпирическое распределение практически симметрично, так как

$$|S| = 0.14 < 3\sigma'(S_{\kappa}) \approx 0.63.$$

Следовательно, эмпирическая кривая распределения тектонических вертикальных напряжений представляет собой высоковершинное распределение с несуществующим эксцессом, практически симметричное с незначительным скосом влево, т. е. эмпирическое распределение близко к нормальному.

Полученные характеристики позволяют сделать следующие выводы [124—126]:

1. Тектонические вертикальные напряжения представляют собой случайные величины, доверительный интервал которых с вероятностью 0,99 составляет 0,4 ± 1,3 МПа.

2. Отличия от нуля среднего значения вертикальных тектонических напряжений, эксцесса, а также асимметрии эмпирического распределения обусловлены, по-видимому, ограниченным числом измерений.

Таким образом, вертикальные напряжения на участках массива горных пород, вовлекаемых в процесс сдвижения при подземной разработке месторождений, соответствует весу налегающих пород. Аномалии в величинах вертикальных напряжений, обусловлены, по-видимому, неоднородностями второго и, особенно, третьего порядков, в пределах которых проводятся анализируемые инструментальные измерения напряжений.

Горизонтальные напряжения для статистического анализа приведены к тектонической составляющей, определяемой, согласно (3.6), из выражения

$$\sigma_{\rm T} = \sigma' - \gamma_{\rm M} H \, \frac{\mu}{1-\mu} \,, \tag{3.10}$$

где о<sup>′</sup> — измеренные горизонтальные напряжения.

Диапазон глубин, на которых проводились измерения, как следует из Приложения 1, составляет 60—2800 м. Среднее значение горизонтальных тектонических напряжений по всей выборке составляет -15,4 ± 2,34 МПа при доверительной вероятности 0,99. Следовательно, несмотря на разнообразие условий и большой диапазон глубин. доверительный интервал, в котором изменяются горизонтальные тектонические напряжения, оказывается весьма незначительным: от -13,1 до -17,7 МПа.

Чтобы изучить распределение средних значений горизонтальных тектонических напряжений по глубине, все результаты измерений разбиты по четырнадцати двухсотметровым интервалам, охватывающим весь диапазон глубин проведенных измерений от 0 до 2800 м (табл. 3.6 и рис. 3.10).

В доверительные границы среднего значения по всей выборке не укладываются средние пять интервалов глубины 400—600, 1400—1600, 1600—1800, 1800—2000 и 2600—2800 м, причем у интервала 400—600 м отклонение очень незначительное и составляет -1,5 МПа. Болышие отклонения имеют место на интервалах 1600— 1800 м и 1800—2000 м, соответственно, 6,2 МПа и 8,8 МПа, но на эти интервалы приходится всего по 4 и 2 измерения.

Таким образом, средние значения горизонтальных тектонических напряжений на различных интервалах глубины до 2800 м близки к доверительным границам изменения среднего значения по всей выборке, что свидетельствует об относительном постоянстве горизонтальных тектонических напряжений в пределах рассмотренных глубин. Но в этом случае отличия значений горизонтальных тектонических напряжений во всех конкретных измерениях должны представлять собой случайные величины (случайными величинами, как известно, называют переменную величину, численно характеризующую случайное явление и отражающую многообразие неучтенных колебаний условий, при которых производятся испытания [96]. На рис. 3.11 представлена гистограмма относительных частот и эмпирическая кривая распределения отклонений горизонтальных

Распределение средних значений горизонтальных тектонических напряжений по интервалам глубины

			•	•	
	Интервал глубины, м	Количество измерений	Среднее горизонталь- ное напряжение в ин- тервале, б <sub>т</sub> ', МПа	Отклонение от среднего всей выработки $(\vec{\sigma}_{\tau}' - \vec{\sigma}_{\tau}), MПа$	Отклонение от до- верительного ин- тервала б <sub>т</sub> , МПа
-	0-200	21	-13,4	2,0	
	200-400	45	-13,4	2,0	—
	400-600	22	-19,2	-3,8	-1,5
	600-800	13	-17,0	-1,6	
	800-1000	12	-17,3	-1,9	
	1000-1200	10	-14,0	1,4	
	1200-1400	3	-13,1	2,3	_
	1400-1600	3	-11,7	3,7	1,4
	1600-1800	4	-23,9	-8,5	-6,2
	1800-2000	2	-26,5	-11,1	-8,8
	2000-2200	—		—	—
	2200-2400	2	-13,4	2,0	
	2400-2600	3	-13,1	2,0	
	2600-2800	1	-18,4	-3,0	-0,7
		1			

тектонических напряжений от среднего значения. О степени соответствия эмпирического распределения нормальному закону распределения можно судить, как и при рассмотрении вертикальных тектонических напряжений, по величине эксцесса и асимметрии. Из приведенных выше формул и данных табл. 3.6 следует:

 $E = -1,39; \ \sigma'(E) \approx 0,417;$  $|E| = 1,39 > 3\sigma'(E) = 1,25;$  $S_{\kappa} = -0,188; \ \sigma'(S_{\kappa}) \approx 0,206;$  $|S_{\kappa}| = 0,188 < 3\sigma'(S_{\kappa}) = 0,618.$ 

Полученные характеристики свидетельствуют, что эмпирическое распределение низковершинно и по эксцессу не удовлетворяет нормальному закону. Отклонение несущественное, но больше трех среднеквадратических отклонений эксцесса. Показатели асимметрии укладываются в требования к теоретической кривой нормального распределения.

Таким образом, тектоническое горизонтальные напряжения в различных условиях и на разных глубинах проявляют характерные свойства случайных величин, среднее значение которых составляет





-15,4 ÷ 2,34 МПа с доверительной вероятностью 0,99. Следовательно, при решении практических задач в натуре и на моделях можно принимать тектонические горизонтальные напряжения одинаковыми по всей глубине.

Необходимо помнить, что статистическим исследованиям подвергались средние тектонические напряжения  $1/2(\sigma_{r1} + \sigma_{r2})$ . Для рассмотренных выше вопросов эта величина обладает определенной общностью. Но для прогнозирования тектонических напряжений или задания конкретных граничных условий использовать ее



Рис. 3.11. Гистограмма относительных частот и эмпирическая кривая распределения отклонений горизонтальных тектонических напряжений от среднего значения

нецелесообразно, так как на закономерности развития сдвижения горных пород оказывает влияние не столько средняя величина напряжений, сколько соотношение главных нормальных напряжений и их направление. А эти данные, по нашему мнению, можно получить только путем непосредственных измерений. Предпринятые же выше статистические исследования имели своею целью только выявление общих закономерностей распределения тектонических напряжений по глубине.

Для последующего выбора расчетных схем представляют интерес изменения сил в массиве горных пород при образовании зоны обрушения в процессе разработки месторождения.

Вертикальные напряжения, вызываемые, как отмечалось выше, весом налегающих пород, в контуре зоны обрушения изменяются в незначительных пределах, определяемых выражением (3.4). За границами зоны обрушения вертикальные напряжения не изменяют своих первоначальных значений, поэтому вертикальные напряжения не оказывают существенного влияния на развитие горизонтальных деформаций и сдвижений горных пород и земной поверхности. Но вертикальные сдвижения, в отличие от горизонтальных, существенным образом зависят от изменений вертикальных напряжений, несмотря на их незначительную величину. Эффект обусловлен тем, что изменения вертикальных напряжений представляют собой неуравновешенную систему сил, действие которой распространяется на бесконечно большую глубину. Вертикальные сдвижения земной поверхности, проявляющиеся в виде подъемов, являются суммарными величинами деформаций всей толщи пород зоны влияния. Этот вид вертикальных сдвижений, связанный с явлением изостазии, проявляется плавно на площадях, значительно превышающих размеры профильных линий наблюдательных станций. По этой причине вертикальные сдвижения указанного типа, как правило, не улавливаются обычными инструментальными наблюдениями. Исследования их требуют постановки специальных наблюдений и экспериментов [127].

Горизонтальные напряжения, в отличие от вертикальных, претерпевают существенные изменения. В радиальном направлении изменения соответствуют разнице между первоначальными напряжениями и распором обрушенных пород. По мере удаления от контура зоны обрушения в глубь массива радиальные напряжения быстро достигают своего первоначального значения. Максимальная концентрация наблюдается у тангенциальных напряжений. В зависимости от соотношения между первоначальными главными нормальными напряжениями и формой зоны обрушения вторичные тангенциальные напряжения на различных участках могут в несколько раз превышать первоначальные, причем коэффициент концентрации напряжений может быть и положительным, и отрицательным. Следовательно, горизонтальные напряжения в зоне влияния провала претерпевают серьезные изменения, являющиеся основной причиной деформирования массива горных пород и земной поверхности. Они представляют собой уравновешенную систему сил, действие которой, согласно принципу Сен-Венана, локализуется на небольшом участке, размеры которого также превосходят обычную зону инструментальных наблюдений, но значительно меньше зоны, подверженной явлениями изостазии.

Из рассмотренных изменений вертикальных и горизонтальных напряжений следует, что породы, окружающие зону обрушения, находятся в условиях обобщенного плоского напряженного состояния: изменяются только горизонтальные напряжения, а вертикальные, действующие перпендикулярно рассматриваемым плоскостям, остаются неизменными за счет возможности свободного° деформирования в этом направлении. Сохранение обобщенного плоского напряженного состояния в процессе разработки обеспечивает возможность применения горизонтальных плоских сечений для расчета параметров процесса сдвижения. Правомерность плоских решений теории упругости определяется ограничениями, приведенными выше.

## 3.6. Упрощения, принятые при построении модели

Введение упрощений реальных свойств среды и происходящих в ней явлений при построении геомеханической модели сдвижения горных пород на железорудных месторождениях является вынужденной мерой, обусловленной сложностью исследуемого явления, трудностями изучения свойств массива горных пород, несовершенством математического аппарата, описывающего закономерности формирования вторичного напряженно-деформированного состояния в реальных условиях. Подобные приемы в теории познания не новы, и использование различного рода гипотез, упрощений, допусков и схематизаций явлений приносило положительный эффект. Ближайшим примером удачной идеализации может служить понятие упругого однородного и изотропного тела в современной теории упругости. Основная задача при упрощении состоит в том, чтобы обеспечить возможность исследования происходящих процессов, сохранить и выделить их основные черты и закономерности.

Все упрощения, допущенные выше при построении модели, можно условно разделить на следующие группы:

1. Идеализация среды модели: 1) представление массива горных пород в виде однородной изотропной среды; 2) выделение упругих свойств массива горных пород.

 Идеализация и замена форм деформируемых областей:
 придание контурам зоны обрушения геометрически правильных форм;
 замена объемной деформируемой области плоской.

3. Идеализация граничных условий: 1) представление первоначальных напряжений в виде однородного поля напряжений; 2) задание одинаковых тектонических напряжений в пределах области сдвижения.

Вопрос о целесообразности принятых упрощений рассмотрен в предшествующих разделах. Однако, как и в других практических областях, правомерность и пригодность принятых гипотез и упрощений может быть оценена лишь на практике. Результаты некоторых промышленных экспериментов, позволяющие судить о возможностях модели и расчетного аппарата, приведены в последующих разделах.

Кроме отмеченных выше упрощений в модели не отражен ряд важных моментов в развитии процесса сдвижения, выходящих за рамки этой области. В частности, в ней на современном этапе не рассматриваются разрушение горных пород в процессе сдвижения, взаимосвязь деформаций с процессом трещинообразования и др.

Все эти вопросы требуют дальнейшего углубленного изучения критериев прочности массива горных пород, закономерностей рас-

пределения полных деформаций и напряжений в зоне сдвижения и других явлений и могут служить предметами самостоятельных исследований.

## Выводы

1. Анализ условий разработки рудных месторождений на примере региона Урала и Казахстана и результатов исследований процесса сдвижения горных пород свидетельствует, что его параметры на рассматриваемом типе месторождений определяются группами факторов, характеризующих свойства массива горных пород, его напряженное состояние, геометрические параметры разрабатываемого месторождения и технологию разработки.

2. Обобщение параметров областей, образующихся в скальном массиве горных пород в процессе сдвижения, позволило представить геомеханическую модель разрабатываемого месторождения в виде нижнего полупространства, в котором образована выемка, оконтуренная от нижних границ разработки наклонными поверхностями под углами обрушения. Выемка заполнена обрушенными породами.

3. Контур зоны обрушения аппроксимируется окружностью или эллипсом. Отклонения между реальными и расчетными контурами зоны обрушения подчиняются нормальному закону распределения случайных величин. Доверительный интервал отклонений с надежностью 0,99 не превышает 2—5 % от радиуса зоны обрушения.

4. Скальный массив горных пород, имеющий блочную структуру со сложной иерархией структурных нарушений, представляется в геомеханической модели в виде упругой однородной изотропной среды с деформационными характеристиками, определяемыми на базах, соответствующих задачам сдвижения горных пород.

5. В качестве граничных условий за пределами влияния зоны обрушения задается полный тензор первоначальных напряжений, слагающийся из тектонических напряжений, одинаковых на всей глубине модели, и гравитационных напряжений (веса пород), изменяющихся по глубине. На контуре зоны обрушения задается боковой распор от обрушенных пород.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

# 4.1. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в горизонтальном сечении мульды сдвижения

Земная поверхность массива горных пород, в котором производится разработка месторождений, представляет собой граничную плоскость объемной области со сложным напряженно-деформированным состоянием, каждой точке которой присущи свои параметры напряжений и деформаций. Для первоначального напряженнодеформированного состояния они могут быть записаны в следующем виде:

$$\mathbf{T}_{\mu} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{x}, \boldsymbol{\tau}_{xy}, \boldsymbol{\tau}_{xz} \\ \boldsymbol{\tau}_{yx}, \boldsymbol{\sigma}_{y}, \boldsymbol{\tau}_{yz} \\ \boldsymbol{\tau}_{zx}, \boldsymbol{\tau}_{zy}, \boldsymbol{\sigma}_{z} \end{vmatrix}, \qquad (4.1)$$

$$T_{\mu e \phi} = \begin{vmatrix} \epsilon_{x}, 1/2 \gamma_{xy}, 1/2 \gamma_{xz} \\ 1/2 \gamma_{yx}, \epsilon_{y}, 1/2 \gamma_{yz} \\ 1/2 \gamma_{zx}, 1/2 \gamma_{zy}, \epsilon_{z} \end{vmatrix},$$
(4.2)

- где Т<sub>и</sub> тензор напряжений;
- σ<sub>x</sub>, σ<sub>y</sub>, σ<sub>z</sub> нормальные напряжения, параллельные осям x, y и z;
- т<sub>ху</sub> касательные напряжения по площадкам элементарного объема;
- Т<sub>леф</sub> тензор деформаций;
- ε<sub>x</sub>, ε<sub>y</sub>, ε<sub>z</sub> нормальные деформации вдоль осей x, y и z;
- Yлу... Ууз деформация сдвига.

Известно, что симметричные относительно главной диагонали касательные напряжения и деформации сдвига равны, т. е.

$$\begin{split} \tau_{xy} &= \tau_{yx}; \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}; \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}; \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx}; \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy}. \end{split}$$

Напряженное и деформированное состояние в любой точке массива горных пород вполне определено, если заданы тензоры напряжений или деформаций в этой точке. Компоненты тензора деформаций находятся в линейной зависимости от компонентов тензора напряжений, выраженной обобщенным законом упругости [128]:

$$\varepsilon_{x} = \frac{1}{E} \Big[ \sigma_{x} - \mu \big( \sigma_{y} + \sigma_{z} \big) \Big], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G};$$

$$\varepsilon_{y} = \frac{1}{E} \Big[ \sigma_{y} - \mu \big( \sigma_{z} + \sigma_{x} \big) \Big], \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G};$$

$$\varepsilon_{z} = \frac{1}{E} \Big[ \sigma_{z} - \mu \big( \sigma_{x} + \sigma_{y} \big) \Big], \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}, \quad (4.3)$$

где E — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  — модуль сдвига.

С точки зрения оценки влияния горных работ на подрабатываемые объекты интерес представляют не первоначальные напряжения и деформации, а последующие их приращения, вызванные разработкой. По аналогии с (4.1) и (4.2) тензоры приращений смогут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta T_{\rm H} = \begin{vmatrix} \Delta \sigma_{x}, \Delta \tau_{xy}, \Delta \tau_{xz} \\ \Delta \tau_{yy}, \Delta \sigma_{y}, \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx}, \Delta \tau_{zy}, \Delta \sigma_{z} \end{vmatrix}, \qquad (4.1')$$

$$\Delta T_{\mu e \varphi} = \begin{vmatrix} \Delta \varepsilon_{x}, 1/2 \, \Delta \gamma_{xy}, 1/2 \, \Delta \gamma_{xz} \\ 1/2 \, \Delta \gamma_{yx}, \Delta \varepsilon_{y}, 1/2 \, \Delta \gamma_{yz} \\ 1/2 \, \Delta \gamma_{zy}, 1/2 \, \Delta \gamma_{zy}, \Delta \varepsilon_{z} \end{vmatrix} .$$
(4.2')

Таким образом, для оценки состояния объектов, попавших в зону влияния горных работ, достаточно знать тензоры приращений напряжений и деформаций. Оценка состояния массива горных пород производится с помощью суммарных значений напряжений и деформаций, определяемых сложением первоначальных напряжений и деформаций с их приращениями. Суммарные тензоры или тензоры полных напряжений и деформаций по аналогии с (4.1) и (4.2) запишутся в следующем виде:

$$\Sigma T_{\mu} = \begin{vmatrix} \Sigma \sigma_{x}, \Sigma \tau_{xy}, \Sigma \tau_{xz} \\ \Sigma \tau_{yx}, \Sigma \sigma_{y}, \Sigma \tau_{yz} \\ \Sigma \tau_{zx}, \Sigma \tau_{zy}, \Sigma \sigma_{z} \end{vmatrix}, \qquad (4.1'')$$

$$\Sigma T_{\mu e \phi} = \begin{vmatrix} \Sigma \varepsilon_{x}, \Sigma 1/2 \gamma_{xy}, \Sigma 1/2 \gamma_{xz} \\ \Sigma 1/2 \gamma_{yx}, \Sigma \varepsilon_{y}, \Sigma 1/2 \gamma_{yz} \\ \Sigma 1/2 \gamma_{zx}, \Sigma 1/2 \gamma_{zy}, \Sigma \varepsilon_{z} \end{vmatrix}, \qquad (4.2'')$$

где

$$\Sigma \sigma_i = \sigma_i + \Delta \sigma_i; \ \Sigma \tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij};$$
$$\Sigma \varepsilon_i = \varepsilon_i + \Delta \varepsilon_i; \ \Sigma \gamma_{ii} = \gamma_{ii} + \Delta \gamma_{ij};$$

*i*, *j* — индексы *x*, *y* и *z*.

Суммарное поле напряжений и деформаций по всей мульде сдвижения, как и приращения напряжений и деформаций, будет неоднородным. Тензоры для каждой точки будут зависеть от ее координат относительно центра провала. Следовательно, состояние массива горных пород и земной поверхности и безопасность подрабатываемых объектов зависят от разных тензоров деформаций и напряжений. Исключения представляют такие объекты, как подземные нефте- и газохранилища, чаши водохранилищ и отстойников и т. п., для которых массив горных пород представляет собой конструктивный элемент. Для дальнейшего изложения целесообразно подробнее рассмотреть напряженно-деформированное состояние земной поверхности в процессе разработки месторождения (рис. 4.1).

На элементарном объеме массива горных пород, выделенном у поверхности, на горизонтальной грани в случае невесомого полупространства, рассмотрением которого мы ограничиваемся, напряжения отсутствуют. Элементарный слой массива горных пород находится в условиях плоского напряженно-деформированного состояния, для которого тензоры напряжений и деформаций запишутся в следующем виде:

$$\mathbf{T}_{\mathbf{H}} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{x}, \boldsymbol{\tau}_{xy} \\ \boldsymbol{\tau}_{yx}, \boldsymbol{\sigma}_{y} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{T}_{\pi e \phi} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{x}, 1/2 \boldsymbol{\gamma}_{xy} \\ 1/2 \boldsymbol{\gamma}_{xy}, \boldsymbol{\varepsilon}_{y} \end{vmatrix};$$
(4.4)

$$\Delta T_{\mu} = \begin{vmatrix} \Delta \sigma_{x}, \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yx}, \Delta \sigma_{y} \end{vmatrix}; \quad \Delta T_{\pi c \phi} = \begin{vmatrix} \Delta \varepsilon_{x}, 1/2 \Delta \gamma_{xy} \\ 1/2 \Delta \gamma_{yx}, \Delta \varepsilon_{y} \end{vmatrix};$$
(4.5)

$$\Sigma T_{\mu} = \begin{vmatrix} \Sigma \sigma_{x}, \Sigma \tau_{xy} \\ \Sigma \tau_{yx}, \Sigma \sigma_{y} \end{vmatrix}; \quad \Sigma T_{\pi c \phi} = \begin{vmatrix} \Sigma \varepsilon_{x}, \Sigma 1/2 \gamma_{xy} \\ \Sigma 1/2 \Delta \gamma_{yx}, \Sigma \varepsilon_{y} \end{vmatrix}.$$
(4.6)

Значительно упрощается для этого случая и обобщенный закон упругости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x} &= \frac{1}{E} \left( \sigma_{x} - \mu \sigma_{y}; \right) \\ \varepsilon_{y} &= \frac{1}{E} \left( \sigma_{y} - \mu \sigma_{x}; \right) \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}. \end{aligned}$$

$$(4.7)$$

Сведения о тензорах напряжений подробно рассматриваются в специальной литературе. Здесь приводятся лишь некоторые их особенности, необходимые в решении вопроса охраны сооружений и оценки состояния массива горных пород.

Известно, что при любом напряженно-деформированном состоянии имеются взаимно перпендикулярные главные оси деформаций [128]. В случае объемного напряженного состояния их три, а в рас-



Рис. 4.1. Напряженное состояние массива горных пород вблизи земной поверхности

сматриваемом плоском случае таких осей две. Особенностью этих осей является неизменность угла между ними. Следовательно, вдоль осей имеют место только нормальные деформации удлинения или сжатия, именуемые главными удлинениями,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ .

Деформация по любому направлению в заданной точке определяется из выражения

$$\varepsilon = \varepsilon_x l^2 + \varepsilon_y m^2 + \varepsilon_z n^2 + \gamma_{xy} lm + \gamma_{yz} mn + \gamma_{zx} ml.$$
(4.8)

При известном тензоре напряжений значения нормальных деформаций по любому направлению находятся заданием направляющих косинусов *l*, *m* и *n*, которые, как известно, представляют собой косинусы углов между искомым направлением и, соответственно, осями *x*, *y* и *z*. Главные нормальные деформации обозначаются в соответствии с условием  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$ .

В случае плоского напряженного состояния уравнение (4.8) существенно упрощается:

$$\varepsilon = \varepsilon_x l^2 + \varepsilon_y m^2 + \gamma_{xy} lm. \tag{4.9}$$

Наглядно распределение деформаций можно представить в виде круговой диаграммы, на которой на радиусах-векторах, изображающих направление, откладываются величины деформаций, возникающих в данном направлении, причем положительное значение нормальной деформации откладывается от центра в положительном направлении радиуса вектора; отрицательные деформации (сжимающие) откладываются в обратном направлении. На рис. 4.2 представлены круговые диаграммы для различных случаев напряженно-деформированного состояния. В изотропном поле напряжений круговая диаграмма деформаций представляет собой круг. По мере нарушения изотропии диаграмма переходит в эллипс, и в условиях анизотропного поля напряжений и деформаций круговая диаграмма приобретает сложные очертания, показанные на последних схемах рисунка.

Из представленных особенностей круговых диаграмм вытекают некоторые выводы, представляющие интерес для вопросов сдвижения горных пород и охраны сооружений:

1. В изотропном напряженно-деформированном состоянии деформации по всем направлениям одинаковы, и измерение по любому направлению полностью характеризует интенсивность процесса сдвижения на этом участке.

2. При незначительной анизотронии, когда обе деформации одного знака и отличаются только по величине, измерениями деформаций по одному направлению можно получить любые промежу-



Рис. 4.2. Круговые диаграммы деформаций при различных напряженных состояниях: ε<sub>1</sub>, ε<sub>2</sub> — главные деформации на участке; ε<sub>1</sub> — измеренная деформация на профильной линии

точные значения деформаций — от минимальных до максимальных.

3. В случае значительной анизотропии, когда главные деформации отличаются по знаку, измерения по одному направлению могут дать ложное представление о процессе сдвижения. В зависимости от направления измерения могут быть получены и положительные и отрицательные деформации, а по двум направлениям деформации вообще отсутствуют.

## 4.2. Расчет горизонтальных сдвижений и деформаций вокруг провалов круглой формы

## 4.2.1. Математический аппарат для расчета векторов горизонтальных сдвижений

Векторы горизонтальных сдвижений представляют собой горизонтальные перемещения точек земной поверхности и массива горных пород, обусловленные образованием зоны обрушения от подземной разработки месторождения. Величины и направления их зависят от размеров и формы зоны обрушения, деформационных свойств и первоначального напряженного состояния массива горных пород и координат рассматриваемой точки. На практике необходимость в расчете векторов горизонтальных сдвижений возникает при исследовании общих закономерностей развития процесса сдвижения на месторождении, решении вопросов охраны от подработки протяженных сооружений, расположенных на опорах, оценке стабильности пунктов геодезического и маркшейдерского обоснования и в ряде других случаев.

Наиболее распространенной формой зоны обрушения на рудных месторождениях являются фигуры, приближающиеся к кругу или эллипсу с различным модулем эллиптичности. Зоны обрушения круглой формы достаточно широко распространены на месторождениях с клиновидными, штокообразными и линзообразными рудными телами. На первой стадии разработки месторождения, при выходе обрушения на земную поверхность, провалы, независимо от формы рудных тел, имеют в плане круглую форму. Крутлый провал представляет собой частный случай эллиптического провала с модулем эллиптичности равным нулю. Однако простота математического аппарата при круглой форме провала обуславливает целесообразность отдельного рассмотрения случаев крутлой и эллиптической форм.

Расчетная схема для определения векторов горизонтальных сдвижений земной поверхности и верхних слоев горных пород, где давление обрушенных пород на стенки провала отсутствует или несущественно, представлена на рис. 4.3, *а*. Фактическая зона обруше-



Рис. 4.3. Расчетная схема к определению векторов горизонтальных сдвижений и тензоров горизонтальных деформаций вокруг провала круглой формы: *а* — поверхностные сечения; *б* — глубинные сечения ния аппроксимируется равновеликим по площади кругом в упругой изотропной однородной плоскости. В качестве граничных условий за пределами зоны влияния провала выступают направления и величины главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  суммарного поля напряжений, определяемые в соответствии с выражением (4.6) тектоническими напряжениями и боковым распором от веса налегающих пород. Для схемы, соответствующей земной поверхности, граничные условия определяются только тектоническими напряжениями.

Векторы горизонтальных сдвижений находятся из решения плоской задачи теории упругости. Радиальная и тангенциальная составляющие вектора сдвижения определяются из выражений, полученных нами ранее [80].

$$V_{r} = -\frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{4G} \left[ \frac{R^{4}}{r^{3}} - \frac{R^{2}}{r} (\chi + 1) \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{4G} \frac{R^{2}}{r} ;$$

$$V_{\theta} = \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{4G} \left[ \frac{R^{4}}{r^{3}} + \frac{R^{2}}{r} (\chi - 1) \right] \sin 2\theta , \qquad (4.10)$$

- где V<sub>r</sub>, V<sub>θ</sub> радиальные и тангенциальные составляющие вектора горизонтальных сдвижений, м;
- σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub> главные нормальные напряжения за пределами зоны влияния провала, МПа;

 $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  — модуль сдвига массива горных пород, МПа;

— модуль деформации массива горных пород; — коэффициент Пуассона массива горных пород;

 $\chi = \frac{3-\mu}{1+\mu}$  — коэффициент Колосова — Мусхелишвили;

R — радиус зоны обрушения (провала), м;  $r, \theta$  — подярные коордицати разложности

 — полярные координаты расчетной точки (θ отсчитывается от σ<sub>1</sub> против часовой стрелки), м, град.

Полный вектор горизонтальных сдвижений рассматриваемой точки находится из выражения

$$\xi = \sqrt{V_r^2 + V_{\theta}^2} \,. \tag{4.11}$$

Его направление относительно положительной радиальной координаты точки определяется углом  $\delta$ , отсчитываемым против часовой стрелки. Численное значение угла  $\delta$  определяется из выражения

$$\delta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{V_{\theta}}{V_r}.$$
(4.12)

Четверть, в которой находится угол  $\delta$ , определяется исходя из знаков  $V_r$  и  $V_{\theta}$  (положительное направление  $V_r$  — от центра,  $V_{\theta}$  — против часовой стрелки).

При рассмотрении более глубоких горизонтов массива горных пород, когда боковой распор обрушенных пород достигает существенных величин, которыми уже нельзя пренебречь, расчетная схема дополняется действием обрушенных пород на стенки зоны обрушения, представляемым в виде равномерного давления  $\sigma_{ob}$ , определяемого из выражения (4.3) (см. рис. 4.3, б). Расчетные формулы для этого случая на основе принципа суперпозиции могут быть получены путем сложения приведенного выше решения с известным решением задачи о равномерном давлении, приложенном к границе круглого отверстия в упругой изотропной плоскости [129]. Радиальные и тангенциальные смещения от действия обрушенных пород определяются выражениями

$$V_r = \frac{\sigma_{o6}R^2}{2Gr};$$

$$V_{\theta} = 0, \qquad (4.13)$$

где  $\sigma_{oo}$  — давление обрушенных пород, МПа.

Суммарные векторы горизонтальных сдвижений по радиальным и тангенциальным направлениям от действия всей системы сил определяются выражениями

$$V_r = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[ \frac{R^4}{r^3} - \frac{R^2}{r} (\chi + 1) \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} \frac{R^2}{r} + \frac{\sigma_{o6}}{2G} \frac{R^2}{r};$$

Ε

μ

$$V_{\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} \left[ \frac{R^4}{r^3} + \frac{R^2}{r} (\chi - 1) \right] \sin 2\theta .$$
 (4.14)

Определение величины полного вектора горизонтальных сдвижений и его направления производятся, как и в первом случае, из выражений (4.11) и (4.12).

Наряду с полными векторами горизонтальных сдвижений в практике охраны сооружений и исследования процессов сдвижения горных пород нередко возникает необходимость определения перемещений точки в каком-либо заданном направлении. В дополнение к формулам (4.10) и (4.14) для этой цели может быть использовано выражение

$$\Delta = V_r \cos \alpha + V_\theta \sin \alpha, \qquad (4.15)$$

где *Δ* — смещение точки в заданном направлении, м;

α — угол, определяющий заданное направление смещения, отсчитывается от положительного направления радиальной координаты точки до заданного направления против часовой стрелки, град.

### 4.2.2. Математический аппарат для расчета тензоров горизонтальных деформаций

Деформации участка земной поверхности на различных стадиях разработки месторождения характеризуются разными тензорами деформаций, описываемых выражениями (4.2), (4.2) и (4.2"). Каждый из них применяется для решения соответствующих вопросов, отмеченных в разделе 4.1. Однако тензор деформаций в приведенном виде, являясь полной характеристикой деформированного состояния в точке или на участке, не дает непосредственного представления об экстремальных величинах деформаций, определяющих безопасность охраняемых объектов. Более полно этой задаче отвечает тензор, характеризуемый главными деформациями растяжения или сжатия  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , максимальной деформацией сдвига  $\gamma_{1,2}$  и их направлениями. Параметры тензора деформаций определяются из решения плоской задачи теории упругости. Расчетное горизонтальное сечение, как и в предыдущем случае, располагается на поверхности мульды сдвижения или на требуемой глубине (см. рис. 4.3, а, б).

Компоненты первоначального напряженного состояния в ненарушенной плоскости в полярных координатах могут быть представлены в следующем виде:

$$\widehat{rr_{0}} = \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} + \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \cos 2\theta;$$

$$\widehat{\theta\theta}_{0} = \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} - \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \cos 2\theta;$$

$$\widehat{r\theta}_{0} = -\frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \sin 2\theta,$$
(4.16)

где  $\widehat{rr_0}$ ,  $\widehat{\theta\theta_0}$  — нормальные напряжения по радиальному и тангенциальному направлениям;

*г* $\theta_0$  — касательные напряжения.

При образовании провала круглой формы в плане радиусом *R* в области его влияния произойдут изменения напряжений, сопровождаемые соответствующими деформациями. Новые значения напряжений, возникших вокруг провала, определяются выражениями известного решения Кирша, преобразованными для двухосного напряженного состояния [128],

$$\widehat{rr'} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta; \\
\widehat{\theta\theta'} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta; \\
\widehat{r\theta'} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta.$$
(4.17)

Изменения напряжений на рассматриваемом участке определяются разницей между конечными (4.17) и начальными (4.16) напряжениями.

$$\widehat{rr} = \widehat{rr'} - \widehat{rr_0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \frac{R^2}{r^2};$$

$$\widehat{\theta\theta} = \widehat{\theta\theta'} - \widehat{\theta\theta}_0 = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \frac{3R^4}{r^4} \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \frac{R^2}{r^2};$$

$$\widehat{r\theta} = \widehat{r\theta'} - \widehat{r\theta}_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( \frac{3R^4}{r^4} - \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.$$
(4.18)

Относительные деформации, вызванные образованием провала, с помощью обобщенного закона упругости запишутся в следующем виде:

$$\begin{split} \varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E} \left( \widehat{rr} - \mu \widehat{\theta \theta} \right); \\ \varepsilon_{\theta \theta} &= \frac{1}{E} \left( \widehat{\theta \theta} - \mu \widehat{rr} \right); \\ \gamma_{r \theta} &= \frac{\widehat{r \theta}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \widehat{r \theta}, \end{split}$$
 (4.19)

- где є<sub>п</sub>, є<sub>θθ</sub> нормальные деформации по радиальному и тангенциальному направлениям;
  - *ү*,<sub>•</sub> деформация сдвига.

После подстановки (4.18) выражения (4.19) преобразуются к следующему виду:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ \frac{3R^4}{r^4} (1+\mu) - \frac{4R^2}{r^2} \right] \cos 2\theta - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \frac{R^2}{r^2} (1+\mu) \right\};$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} \left\{ -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left[ \frac{3R^4}{r^4} (1+\mu) - \mu \frac{4R^2}{r^2} \right] \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \frac{R^2}{r^2} (1+\mu) \right\};$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{(1+\mu)(\sigma_1 - \sigma_2)}{E} \left( \frac{3R^4}{r^4} - \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta.$$

$$(4.19')$$

Главные нормальные деформации, их направления и максимальный сдвиг через полученные из (4.19) значения  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$  и  $\gamma_{r\theta}$  находятся из следующих выражений [128, 129]:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_{rr} + \epsilon_{\theta\theta}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\epsilon_{rr} - \epsilon_{\theta\theta}\right)^{2} + \gamma_{r\theta}^{2}};$$
  

$$tg2\phi = \frac{\gamma}{\epsilon_{rr} - \epsilon_{\theta\theta}};$$
  

$$\gamma_{max} = \epsilon_{1} - \epsilon_{2},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — главные нормальные деформации;

 $\varphi$  — угол, определяющий направление  $\varepsilon_1$  относительно положительного направления *r* (отсчитывается против часовой стрелки; четверть расположения угла 2 $\varphi$  определяется исходя из знаков  $\gamma_{r\theta}$  и  $\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta}$ , соответствующих знакам sin 2 $\varphi$  и cos 2 $\varphi$ .

Воздействие обрушенных пород на нижних горизонтальных сечениях, как и в предыдущем разделе, может быть учтено на основе принципа суперпозиции путем дополнения выражений (4.17) известными решениями о распределении напряжений вокруг кругового отверстия с равномерным внутренним давлением [129].

$$\widehat{rr'} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \frac{\sigma_{06}R^2}{r^2};$$

$$\widehat{\theta\theta'} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \frac{\sigma_{06}R^2}{r^2} \\
\widehat{r\theta'} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta,$$
(4.21)

где  $\sigma_{ob}$  — давление обрушенных пород.

После преобразований, аналогичных (4.18), (4.19) и (4.19), выражения для расчета относительных деформаций запишутся в следующем виде:

$$\begin{split} \varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E} \left\{ \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \left[ \frac{3R^{4}}{r^{4}} (1+\mu) - \frac{4R^{2}}{r^{2}} \right] \cos 2\theta - \left( \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} + \sigma_{06} \right) \frac{R^{2}}{r^{2}} (1+\mu) \right\}; \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} \left\{ -\frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \left[ \frac{3R^{4}}{r^{4}} (1+\mu) - \mu \frac{4R^{2}}{r^{2}} \right] \cos 2\theta + \left( \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} + \sigma_{06} \right) \frac{R^{2}}{r^{2}} (1+\mu) \right\}; \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{(1+\mu)(\sigma_{1} - \sigma_{2})}{E} \left( \frac{3R^{4}}{r^{4}} - \frac{2R^{2}}{r^{2}} \right) \sin 2\theta. \end{split}$$
(4.22)

Главные параметры тензора деформаций, аналогично предыдущему случаю, определяются по формулам (4.20).

Таким образом, комплекс выражений (4.19), (4.20) и (4.22) позволяет определить величины экстремальных нормальных деформаций, максимального сдвига и направление их действия. Наличие этих параметров дает представления о состоянии поверхности и охраняемых объектов.

## 4.3. Расчет горизонтальных сдвижений и деформаций вокруг эллиптического провала

## 4.3.1. Математический аппарат для расчета векторов горизонтальных сдвижений

Зоны обрушения, образующиеся на земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений, можно отобразить эллипсом с соответствующими параметрами: большой и малой осями, модулем эллиптичности. Расчетная схема к определению компонентов напряженно-деформированного состояния вокруг провала, аппроксимируемого отверстием эллиптической формы, представлена на рис. 4.4. В верхних сечениях, прилегающих к поверхности, контур провала свободен от внешних усилий (рис. 4. 4, а). Давление обрушенных пород на стенки провала, проявляющееся с увеличением глубины расположения расчетного сечения, учитывается заданием граничных условий в виде нормального давления на контур выемки (рис. 4.4, б). Напряженно-деформированное состояние вокруг эллиптического отверстия в упругой изотропной плоскости описываются уравнениями известных решений Н. И. Мусхелишвили [129]. В случае одноосного напряженного состояния и незагруженного контура функции комплексного переменного имсют следующий вид:

$$\varphi(\zeta) = \frac{\sigma_1 R}{4} \left( \zeta + \frac{2e^{2i\alpha} - m}{\zeta} \right);$$

$$\Psi(\zeta) = -\frac{\sigma_1 R}{2} \left\{ e^{-2i\alpha} \zeta + \frac{e^{2i\alpha}}{m\zeta} - \frac{\left(1 + m^2\right)\left(e^{2i\alpha} - m\right)}{m} \frac{\zeta}{\zeta^2 - m} \right\}, (4.23)$$

- где σ<sub>1</sub> напряжения, действующие за пределами области влияния зоны обрушения;
  - направление действия напряжений (отсчитывается против часовой стрелки от оси x, совмещаемой с большой полуосью эллипса);

$$R = \frac{a+b}{2} - - радиус эллипса;$$

$$m = \frac{a-b}{a+b}$$
 — модуль эллипса.



Рис. 4.4. Расчетная схема к определению векторов горизонтальных сдвижений и тензоров горизонтальных деформаций вокруг эллиптического провала:

а — поверхностные сечения; 6 — глубинные сечения

α

Однако в приведенной функции  $\Psi(\zeta)$  при m = 0, когда эллипс превращается в круг, второе и третье слагаемые стремятся к бесконечности. Поэтому целесообразно ее после нескольких преобразований привести к виду

$$\Psi(\zeta) = -\frac{\sigma_1 R}{2} \left\{ e^{-2i\alpha} \zeta + \frac{\zeta (m^2 + 1) - (m\zeta^2 + 1) e^{2i\alpha}}{\zeta (\zeta^2 - m)} \right\} .$$
(4.23')

В случае эллиптического отверстия, по контуру которого действует равномерное давление, функции комплексного переменного имеют следующий вид [129]:

$$\varphi(\zeta) = -\frac{\sigma_{00}Rm}{\zeta};$$

$$\Psi(\zeta) = \frac{\sigma_{00}R}{\zeta} - \frac{\sigma_{00}Rm}{\zeta} \frac{1+m\zeta^2}{\zeta},$$

$$(4.24)$$

где  $\sigma_{ob}$  — давление обрушенных пород.

Векторы горизонтальных сдвижений, обусловленные образованием провала, представляют собой разность между горизонтальными смещениями в плоскости с эллиптической выемкой и в сплошной плоскости без отверстия, нагружаемыми по внешним границам первоначальными напряжениями. Выражения для горизонтальных сдвижений в плоскости с эллиптическим отверстием получаются из функций (4.23) с помощью известных формул преобразования [129]. Смещения связаны с функциями комплексных переменных уравнением

$$2G(U+iV) = \chi \varphi(\zeta) - \omega(\zeta) / \overline{\omega'(\zeta)} \varphi'(\zeta) - \Psi(\zeta) , \qquad (4.25)$$

где U, V

 составляющие вектора смещения, соответственно, по осям *x* и *y*;

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$
 — модуль сдвига;  
 $\chi = \frac{3-\mu}{1+\mu}$  — коэффициент Колоса — Мусхелишвили

$$\omega(\zeta) = R\left(\zeta + \frac{m}{\zeta}\right)$$
 — комплексная функция конформного отображе

ния плоскости с эллиптическим отверстием на плоскость с круговым отверстием.

Чертой сверху обозначаются функции, сопряженные основным функциям.

После несложных преобразований, опущенных из-за их громоздкости, и использования принципа суперпозиции для учета действия двухосного напряженного состояния формулы для расчета горизонтальных сдвижений принимают следующий вид:

$$U' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} (N_1 - N_3 + N_5) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} (N_2 - N_4 + N_6 - N_7);$$
  

$$V' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{4G} (N_8 - N_{10} + N_{12}) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4G} (N_9 - N_{11} + N_{13} - N_{14}),$$
(4.26)

где

$$N_{1} = \frac{\chi R}{2\rho} (\rho^{2} - m) \cos \theta;$$

$$N_{2} = \frac{\chi R}{2\rho} \cos(\theta - 2\alpha);$$

$$N_{3} = \frac{R}{2\rho k_{1}} \Big[ m\rho^{2} (\rho^{2} - m) \cos 3\theta + (\rho^{6} - m^{3}) \cos \theta \Big];$$

$$N_{4} = \frac{R}{\rho k_{1}} \Big[ m\cos(\theta - 2\alpha) - \rho^{4} \cos(3\theta + 2\alpha) \Big];$$

$$N_{5} = \frac{R\rho}{k_{1}} (m^{2} + 1) (\rho^{2} - m) \cos \theta;$$

$$N_{6} = R\rho \cos(\theta + 2\alpha);$$

$$N_7 = \frac{R}{\rho k_1} \Big[ m \big( \rho^4 - 1 \big) \cos(\theta + 2\alpha) + \rho^2 \cos(3\theta + 2\alpha) - m^2 \rho^2 \cos(\theta - 2\alpha) \Big]$$

$$\begin{split} N_8 &= \frac{\chi R}{2\rho} \left( \rho^2 + m \right) \sin \theta \; ; \\ N_9 &= -\frac{\chi R}{\rho} \sin(\theta - 2\alpha) \; ; \\ N_{10} &= \frac{R}{2\rho k_1} \Big[ m \rho^2 \left( \rho^2 + m \right) \sin 3\theta + \left( \rho^6 + m^3 \right) \sin \theta \Big] \; ; \\ N_{11} &= -\frac{R}{\rho k_1} \Big[ m^2 \sin \left( \theta - 2\alpha \right) + \rho^4 \sin \left( 3\theta + 2\alpha \right) \Big] \; ; \\ N_{12} &= \frac{R\rho}{k_1} \Big( m^2 + 1 \Big) \Big( \rho^2 + m \Big) \sin \theta \; ; \\ N_{13} &= -R\rho \sin(\theta + 2\alpha) ; \\ \frac{R}{\rho k_1} \Big[ m \Big( \rho^4 - 1 \Big) \sin(\theta + 2\alpha) + \rho^2 \sin(3\theta + 2\alpha) + m^2 \rho^2 \sin(\theta - 2\alpha) \Big] \; ; \end{split}$$

ρ, θ — криволинейные координаты расчетной точки.

Горизонтальные сдвижения в плоскости без отверстия могут быть найдены из расчетной схемы, показанной на рис. 4.5. Деформации по направлениям осей x' и y', совпадающим с направлениями главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , определяются из известных уравнений

 $k_1 = \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2;$ 

$$\epsilon_{1} = \frac{1}{2G(1+\mu)} (\sigma_{1} - \mu \sigma_{2});$$

$$\epsilon_{2} = \frac{1}{2G(1+\mu)} (\sigma_{2} - \mu \sigma_{1}).$$
(4.27)



Рис. 4.5. Схема к расчету сдвижений в сплошной плоскости без отверстия

Смещения точки по осям x' и y' определяются из выражений

$$\Delta x' = \varepsilon_1 x';$$

$$\Delta y' = \varepsilon_2 y'.$$
(4.27')

Смещения по осям x и y представляют собой проекции  $\Delta x'$  и  $\Delta y'$  на соответствующие оси и находятся из выражений

$$U'' = \Delta x' \cos \alpha - \Delta y' \sin \alpha;$$
  

$$V'' = \Delta x' \sin \alpha + \Delta y' \cos \alpha.$$
(4.27")

 $N_{14} =$ 

После подстановки (4.27), (4.27") и выражений

$$x' = y\sin\alpha + x\cos\alpha;$$
  

$$y' = y\cos\alpha - x\sin\alpha;$$
  

$$x = R\left(\rho + \frac{m}{\rho}\right)\cos\theta;$$
  

$$y = R\left(\rho - \frac{m}{\rho}\right)\sin\theta$$

в (4.27") формулы для смещений по осям *x* и *y* принимают следующий вид:

$$U'' = \frac{\sigma_1 - \mu \sigma_2}{2G(1+\mu)} k_6 \cos \alpha - \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{2G(1+\mu)} k_7 \sin \alpha;$$
  

$$V'' = \frac{\sigma_1 - \mu \sigma_2}{2G(1+\mu)} k_6 \sin \alpha + \frac{\sigma_2 - \mu \sigma_1}{2G(1+\mu)} k_7 \cos \alpha,$$
(4.28)

где

$$k_{6} = R\left[\left(\rho - \frac{m}{\rho}\right)\sin\theta\sin\alpha + \left(\rho + \frac{m}{\rho}\right)\cos\theta\cos\alpha\right];$$
$$k_{7} = R\left[\left(\rho - \frac{m}{\rho}\right)\sin\theta\cos\alpha - \left(\rho + \frac{m}{\rho}\right)\cos\theta\sin\alpha\right].$$

Остальные обозначения аналогичны приведенным выше.

Искомые значения горизонтальных сдвижений, вызванных образованием провала, представляют собой разность между выражениями (4.26) и (4.28)

$$U = U' - U''; V = V' - V''.$$
 (4.29)

Величина вектора горизонтальных сдвижений и его направление находятся из выражений, аналогичных (4.11) и (4.12),

$$\zeta = \sqrt{U^2 + V^2} \; ; \tag{4.30}$$

$$\delta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{V}{U} . \tag{4.31}$$

Угол  $\delta$  отсчитывается от оси *x* против часовой стрелки. Четверть, в которой находится угол  $\delta$ , устанавливается по знакам *U* и *V*, соответствующим осям *x* и *y*.

Для глубоких горизонтов расчетная схема дополняется действием обрушенных пород на контур эллипса (см. рис. 4.4, б). В этом случае расчет производится на основе принципа суперпозиции — суммированием двух решений: от действия естественного поля напряжений, приведенное выше, и от действия обрушенных пород.

После преобразований функций комплексных переменных (4.24) для горизонтальных сдвижений, вызванных давлением обрушенных пород, получаются следующие выражения:

$$U''' = \frac{\sigma_{06}R}{2G} (k_2 + k_4);$$

$$V''' = \frac{\sigma_{06}R}{2G} (k_3 + k_5),$$
(4.32)

где

$$k_1 = \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2;$$

$$k_2 = \frac{1}{\rho} (1 - \chi m) \cos \theta;$$
  
$$k_3 = \frac{1}{\rho} (1 + \chi m) \sin \theta;$$

$$k_4 = \frac{m}{\rho k_1} (1 - \rho^2) \left[ \rho^2 \cos 3\theta - m (1 + \rho^2 - m) \cos \theta \right]$$

110

$$k_5 = \frac{m}{\rho k_1} (1 - \rho^2) \left[ \rho^2 \sin 3\theta - m \left( 1 + \rho^2 + m \right) \sin \theta \right].$$

Суммарные векторы горизонтальных сдвижений по осям x и y определяются сложением величин, получаемых из выражений (4.29) и (4.32). Величины и направления векторов горизонтальных сдвижений вычисляются, как и в предыдущем случае, по формулам (4.30) и (4.31) с использованием суммарных значений U и V.

## 4.3.2. Математический аппарат для расчета тензоров горизонтальных деформаций

Расчетная схема к определению тензора горизонтальных деформаций, граничные условия у поверхностных и глубинных сечений аналогичны расчету векторов горизонтальных сдвижений (см. рис. 4.4).

Напряжения, возникающие в областях влияния зоны обрушения, определяются из выражений (4.23) с помощью формул преобразования [129].

$$\sigma_{x} + \sigma_{y} = 4Re\Phi(\zeta);$$
  

$$\sigma_{y} - \sigma_{x} + 2i\tau_{xy} = \frac{2}{\omega'(\zeta)} \left\{ \overline{\omega(\zeta)} \Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta) \Psi(\zeta) \right\},$$
(4.33)

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  — компоненты тензора напряжений;

 $\Phi(\zeta) = \frac{\phi'(\zeta)}{\omega'(\zeta)};$  $\Psi(\zeta) = \frac{\Psi(\zeta)}{\omega'(\zeta)};$ 

*Re* — реальная часть функции комплексного переменного.

При двухосном первоначальном напряженном состоянии конечные формулы для определения компонентов напряженного состояния в зоне влияния горных работ имеют следующий вид:

$$\sigma'_{y,x} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2n_1} \left[ n_2 \pm \frac{1}{\rho^2 n_1^2} (n_4 + n_8) \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2n_1} \left[ n_3 \pm \frac{1}{\rho^2 n_1^2} (n_5 + n_6 + n_7) \right];$$

$$\tau'_{xy} = \frac{1}{2\rho^2 n_1^3} \left[ (\sigma_1 + \sigma_2) (n_9 + n_{13}) + (\sigma_1 - \sigma_2) (n_{10} + n_{11} + n_{12}) \right], \quad (4.34)$$

где

$$\begin{split} n_{1} &= \rho^{4} - 2m\rho^{2}\cos 2\theta + m^{2}; \\ n_{2} &= \rho^{4} - m^{2}; \\ n_{3} &= 2[m\cos 2\alpha - \rho^{2}\cos 2(\theta - \alpha)]; \\ n_{4} &= 2\rho^{4}[-m(\rho^{8} - m^{4})\cos 4\theta - 2m^{2}\rho^{6}(m^{2} - 1)\cos 2\theta; \\ n_{5} &= 2\rho^{4}[\rho^{8}\cos 2(2\theta - \alpha) - 2m\rho^{6}\cos 2(\theta - \alpha) + \\ + 2 m^{3}\rho^{2}\cos 2(\theta + \alpha) - m^{4}\cos 2(2\theta + \alpha)]; \\ n_{6} &= n_{1}^{2}\rho^{4}[m\cos 2(\theta - \alpha) - \rho^{2}\cos 2\alpha]; \\ n_{7} &= \rho^{2}[m\rho^{6}\cos 2(3\theta - \alpha) - \rho^{4}(3\rho^{4} + m^{2}\rho^{4} + 3m^{2})\cos 2(2\theta - \alpha) - \\ - m\rho^{2}(\rho^{8} - 9\rho^{4} - 3m^{2}\rho^{4} - 3m^{2})\cos 2(\theta - \alpha) - m^{3}\rho^{2}(3\rho^{4} - 3 - m^{2})\cos 2(\theta + \\ + \alpha) + m^{4}\rho^{4}\cos 2(2\theta + \alpha) - m^{2}(9\rho^{4} - 3\rho^{2} + 3m^{2}\rho^{4} - m^{2})\cos 2\alpha]; \\ n_{8} &= \rho^{4}(m^{2} + 1)[\rho^{2}(\rho^{6}\cos 2\theta + 3m^{2}\rho^{2}\cos 2\theta - 3\rho^{4}m - m^{3}\cos 4\theta) + \\ + m(\rho^{6}\cos 4\theta - 3m\rho^{4}\cos 2\theta + 3\rho^{2}m^{2} - m^{3}\cos 2\theta)]; \\ n_{9} &= 2\rho^{4}[m(\rho^{8} + m^{4})\sin 4\theta - 2m^{2}\rho^{6}(m^{2} + 1)\sin 2\theta]; \\ n_{10} &= 2\rho^{4}[-\rho^{8}\sin 2(2\theta - \alpha) + 2m\rho^{6}\sin 2(\theta - \alpha) + \\ + 2m^{3}\rho^{2}\sin 2(\theta + \alpha) - m^{4}\sin 2(2\theta + \alpha)]; \\ n_{11} &= n_{1}^{2}\rho^{4}[\rho^{2}\sin 2\alpha + m\sin 2(\theta - \alpha)]; \\ n_{12} &= \rho^{2}[m\rho^{2}(\rho^{8} - 9\rho^{4} - 3m^{2}\rho^{4} - 3m^{2})\sin 2(\theta - \alpha) + \\ + \rho^{4}(3\rho^{4} + m^{2}\rho^{4} + 3m^{2})\sin 2(2\theta - \alpha) - \\ - m\rho^{6}\sin 2(3\theta - \alpha) - m^{3}\rho^{2}(3\rho^{4} - 3 - m^{2})\sin 2(\theta + \alpha) + \\ + m^{4}\rho^{4}\sin 2(2\theta + \alpha) - m^{2}(9\rho^{4} - 3\rho^{8} + 3m^{2}\rho^{4} - m^{2})\sin 2\alpha]; \end{split}$$

112

$$n_{13} = \rho^4 (m^2 + 1) [\rho^2 (-\rho^6 \sin 2\theta + 3m^2 \rho^2 \sin 2\theta - m^3 \sin 4\theta) + m (-\rho^6 \sin 4\theta + 3m \rho^4 \sin 2\theta - m^3 \sin 2\theta)];$$

 $\alpha$  — угол от *x* до  $\sigma_i$  (ось *x* совпадает с большой полуосью).

Изменения напряжений, вызванные горными работами, находятся вычитанием из компонентов (4.34) исходных значений напряжений по тем же площадкам.

$$\sigma_x = \sigma_x' - \sigma_x^0;$$
  

$$\sigma_y = \sigma_y' - \sigma_y^0;$$
  

$$\tau_{xy} = \tau_{xy'} - \tau x y^0.$$
(4.35)

Относительные деформации через полученные разности определяются, как и в (4.19), из обобщенного закона упругости

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x} &= \frac{1}{E} \left( \sigma_{x} - \mu \sigma_{y} \right); \\ \varepsilon_{y} &= \frac{1}{E} \left( \overset{\circ}{\sigma}_{y} - \mu \sigma_{x} \right); \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}. \end{aligned}$$

$$(4.36)$$

Главные компоненты тензора деформаций и их направления находятся из выражений, аналогичных (4.20),

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\varepsilon_x - \varepsilon_y\right)^2 + \gamma_{xy}^2};$$
  
$$tg 2\phi = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y};$$
  
$$\gamma_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2,$$
 (4.37)

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — главные нормальные деформации;

 $\varphi$  — угол, определяющий направление  $\varepsilon_1$  относительно оси *х* (отсчитывается против часовой стрелки; четверть расположения угла 2 $\varphi$  определяется исходя из знаков  $\gamma_{xy}$  и  $\varepsilon_x - \varepsilon_y$ , соответствующих знакам sin 2 $\varphi$  и cos 2 $\varphi$ ).

Для сечений, расположенных достаточно глубоко, напряжения в области влияния зоны обрушения, вызванные дополнительным воздействием обрушенных пород, могут быть получены из выражений (4.24) с помощью формул преобразования (4.33) и в конечном виде запишутся следующим образом:

$$\sigma_{y,x}'' = 2\sigma_{o6} \left[ \frac{k_2}{k_1} \pm \frac{1}{2k_1^3 \rho^2} (k_3 + k_4 + k_5 + k_9) \right];$$
  

$$\tau_{xy}'' = \frac{\sigma_{o6}}{k_1^3 \rho^2} (k_6 + k_7 + k_8 + k_{10}),$$
(4.38)

где

$$\begin{split} k_1 &= \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2; \\ k_2 &= m(\rho^2 \cos 2\theta - m); \\ k_3 &= -2m\rho^4[(\rho^8 - m^4) \cos 4\theta - 2m\rho^2(\rho^4 - m^2) \cos 2\theta]; \\ k_4 &= \rho^2 k_1(\rho^2 \cos 2\theta - m); \\ k_5 &= -m^2 \rho^2[(\rho^6 \cos 6\theta - \rho^4 m(m^2 - 3) \cos 4\theta + \\ + \rho^2(3m^2 - \rho^8 - 3\rho^4 m^2) \cos 2\theta - m(m^2 - 3\rho^8)]; \\ k_6 &= -2m\rho^4[-(\rho^8 + m^4) \sin 4\theta + 2m\rho^2(\rho^4 + m^2) \sin 2\theta]; \\ k_7 &= -\rho^2 k_1^2 \sin 2\theta; \\ k_8 &= -m^2 \rho^2[-\rho^6 \sin 6\theta + \rho^4 m(m^2 + 3) \sin 4\theta - \\ - \rho^2(3m^2 - \rho^8 + 3\rho^4 m^2) \sin 2\theta]; \\ k_9 &= \rho^4 m(m^3 + 3)[\rho^6 \cos 4\theta - (3\rho^4 + m^3) \cos 2\theta + 3\rho^2 m^2]; \\ k_{10} &= \rho^4 m(m^3 + 3)[-\rho^6 \sin 4\theta + (3\rho^4 - m^3) \sin 2\theta]. \end{split}$$

Изменения напряжений в этом случае можно получить, добавив в (4.35) значения (4.38).

$$\sigma_{x} = \sigma'_{x} - \sigma_{x}^{0} + \sigma''_{x};$$
  

$$\sigma_{y} = \sigma'_{y} - \sigma_{y}^{0} + \sigma''_{y};$$
  

$$\tau_{xy} = \tau'_{xy} - \tau_{xy}^{0} + \tau''_{xy}.$$
(4.39)

Относительные деформации и главные компоненты тензора деформаций определяются аналогично предыдущему случаю по формулам (4.36), (4.37) с использованием суммарных компонентов (4.39).

Таким образом, система приведенных выше выражений (4.23)— (4.39) позволяет расчетным путем определить необходимые параметры, характеризующие поле деформаций в зоне влияния провала. Использование этих параметров дает возможность исследовать закономерности развития процесса сдвижения на разных стадиях разработки месторождения.

## 4.4. Методика расчета границ зоны трещин

Наряду с величинами деформаций и сдвижений, определяемыми в зоне плавных сдвижений с помощью описанного выше математического аппарата, для охраны сооружений от вредного влияния процесса сдвижения нередко приходится прогнозировать границы зоны образования трещин.

Как отмечал академик В. В. Ржевский, частицы и части пород, как правило, более прочны, чем цементирующее их вещество, вследствие чего деформации и разрыв сплошности происходят преимущественно по цементирующим породам, поверхностям ослабления и естественным трещинам [130]. Это свойство массивов пород, подтверждаемое практикой открытой и подземной разработки месторождений со скальными вмещающими породами, использовано в качестве основного положения методики расчета границы зоны трещин [131].

Деформирование массива горных пород в зоне влияния образовавшегося провала происходит преимущественно по всей совокупности существующих структурных ослаблений. Причем, в соответствии с интенсивностью изменения первоначальных напряжений величины взаимных перемещений структурных блоков увеличиваются по мере приближения к провалу и по достижению определенных пределов вызывают видимые нарушения в виде трещин на земной поверхности и в массиве горных пород. Массив горных пород, попадающий в область нарушения первоначальной сплошности, частично или полностью разгружается от первоначальных напряжений. Этот участок массива можно условно назвать "зоной разгрузки", в которой дальнейшее поведение пород определяется в большей мере силами, связанными с весом самих пород, и воздействием пород зоны обрушения. В соответствии с этим положением расчет границы зоны трещин производится в два этапа.

На первом этапе определяется граница зоны разгрузки. С этой целью рассматривается распределение напряжений вокруг провала в упругой изотропной плоскости. В области его влияния анализируется условие равновесия по системам трещин, плоскостям напластования, тектоническим нарушениям и другим структурным ослаблениям горных пород. Участок массива с нарушенным равновесием оконтуривается по крайним неустойчивым ослаблениям и относится к зоне разгрузки.

На втором этапе определяется непосредственно граница зоны трещин, по которой возможно сползание разгруженного массива в провал под воздействием собственного веса.

Исходными данными для обоих этапов расчета служат геометрические параметры рудного тела и первоначальное напряженное состояние, определяемое одним из известных способов измерения. Расчетная схема для определения зоны разгрузки представляет

Расчетная схема для определения зопы разгрубли пределения собой упругую невесомую плоскость с отверстием, отображающую в соответствующем масштабе горизонтальное сечение месторождения по коренным породам вблизи их контакта с наносами (рис. 4.6). В плоскости за пределами зоны влияния провала действует двухосное напряженное состояние. Направление главных нормальных напряжений определяется углом  $\alpha$ , отсчитываемым от оси *x* до  $\sigma_1$ .

Преобразование приведенного в разделе 4.3.1 общего решения Н. И. Мусхелишвили задачи о распределении напряжений вокруг эллиптического отверстия дает в криволинейных координатах при двухосном напряженном состоянии следующие выражения для нормальных и касательных напряжений:

$$\begin{aligned} \widehat{\Theta\Theta}, \ \widehat{\rho\rho} &= \frac{1}{2n_1^2} \left\{ \left( \sigma_1 + \sigma_2 \right) \left[ n_1 n_4 \pm \frac{1}{\rho^2} \left( n_2 n_6 + n_3 n_8 \right) \right] + \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right) \left[ -n_1 n_5 \pm \frac{1}{\rho^2} \left( n_2 n_7 + n_3 n_9 \right) \right] \right\}; \\ \widehat{\rho\Theta} &= \frac{1}{2n_1^2 \rho^2} \left[ \left( \sigma_1 + \sigma_2 \right) \left( n_2 n_8 - n_3 n_6 \right) + \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right) \left( n_2 n_9 - n_3 n_7 \right) \right], \quad (4.40) \end{aligned}$$





где

$$n_1 = \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2;$$
  

$$n_2 = \rho^2 \cos 2\theta - m;$$
  

$$n_3 = \sin 2\theta;$$
  

$$n_4 = \rho^4 - m^2;$$
  

$$n_5 = 2[\rho^2 \cos 2(\theta - \alpha) - m \cos 2\alpha];$$

$$n_{6} = \rho^{4} \{ [\rho^{2}(m^{2} + 1) - 2m^{2}] \cos 2\theta + m(m^{2} + 1 - 2\rho^{2}) \};$$

$$n_{7} = \rho^{2} [\rho^{2}(2\rho^{2} - 2m^{2} - 3) \cos 2\alpha + \rho^{2}m(2 - \rho^{2}) \cos 2(\theta + \alpha) + m(1 + 2\rho^{4}) \cos 2(\theta - \alpha) - \rho^{6} \cos 2(2\theta - \alpha)];$$

$$n_{8} = \rho^{4} [\rho^{2}(m^{2} + 1) - 2m^{2}] \sin 2\theta;$$

$$n_{9} = \rho^{2} [\rho^{2}(2\rho^{2} - 3) \sin 2\alpha + \rho^{2}m(2 - \rho^{2}) \sin 2(\theta + \alpha) + m(2\rho^{4} - 1) \sin 2(\theta - \alpha) - \rho^{6} \sin 2(2\theta - \alpha)];$$

ρ, θ — криволинейные координаты точки.

В случае, когда провал имеет форму, близкую к кругу, можно пользоваться формулами (4.40), принимая m = 0. Однако более простые формулы, без применения конформного отображения, получаются из решения задачи для плоскости с круговым отверстием [129].

$$\widehat{rr} = \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} \left( 1 - \frac{R^{2}}{r^{2}} \right) + \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \left( 1 - \frac{4R^{2}}{r^{2}} + \frac{3R^{4}}{r^{4}} \right) \cos 2\theta;$$

$$\widehat{\theta\theta} = \frac{\sigma_{1} + \sigma_{2}}{2} \left( 1 + \frac{R^{2}}{r^{2}} \right) + \frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} \left( 1 + \frac{3R^{4}}{r^{4}} \right) \cos 2\theta;$$

$$\widehat{r\theta} = -\frac{\sigma_{1} - \sigma_{2}}{2} - \left( 1 + \frac{2R^{2}}{r^{2}} - \frac{3R^{4}}{r^{4}} \right) \sin 2\theta,$$
(4.41)

где rr,  $\theta\theta$ , r $\theta$  — нормальные и касательные напряжения в полярных координатах;

*r*, θ — полярные координаты точки; *R* — радиус зоны обрушения.

Соответствие расчетной модели реальному массиву достигается нанесением на расчетную плоскость следов тектонических нарушений, контактов напластования, систем трещин и других структурных особенностей горных пород.

Равновесие по трещинам и нарушениям оценивается из сопоставления удерживающих и сдвигающих усилий. Сдвигающие силы Т соответствуют касательным компонентам к плоскости нарушения в рассматриваемой точке. Удерживающие силы складываются из сцепления C по контакту, сил трения Ntgo, которые академиком В. В. Ржевским объединяются в едином понятии сил зацепления [130]. Условие равновесия при отрицательном значении записывается в виде

$$|Ntg\phi| + C > |T|, \tag{4.42}$$

где

$$N = \theta \theta \cos^2 \gamma + \widehat{\rho \rho} \sin^2 \gamma + \widehat{\rho \theta} \sin^2 \gamma;$$

$$T = \frac{1}{2} (\widehat{\theta \theta} - \widehat{\rho \rho}) \sin 2\gamma - \widehat{\rho \theta} \cos 2\gamma;$$

ү — угол между р и нарушением;

ф — угол трения по контакту.

При N положительном (растяжение) условие равновесия имеет вид

$$N < [\sigma]_{\text{pact}}, C > |T|, \tag{4.43}$$

где  $[\sigma]_{pact}$  — прочность спаянности контакта на растяжение.

Для определения границы зоны разгрузки на расчетную схему наносятся криволинейные координаты и точки, располагаемые по нарушениям, по которым оценивается состояние равновесия. К зоне разгрузки относятся точки, в которых у выражения (4.42) правая часть равна или больше левой.

Криволинейные координаты  $\rho$  и  $\theta$  строятся по известным формулам

$$x = R\left(\rho + \frac{m}{\rho}\right)\cos\theta;$$
  

$$y = R\left(\rho + \frac{m}{\rho}\right)\sin\theta.$$
(4.44)

Задавая последовательно значения  $\rho$  и  $\theta$ , строят сеть криволинейных координат на плоскости вокруг эллиптического отверстия в виде линий  $\rho$  = const и  $\theta$  = const, показанных на рис. 4.6.

Определение границ зоны трещин сводится к оценке возможности отрыва призм сползания от остального массива в пределах зоны разгрузки. Одновременно отыскиваются вероятные плоскости скольжения. В отличие от известных методик [4, 132] расчет производится с учетом воздействия обрушенных пород на призмы



Рис. 4.7. Расчетная схема к определению зоны разгрузки

сползания. Расчетная схема представляет собой вертикальное поперечное сечение месторождения со следами структурных нарушений, которые могут быть вероятными плоскостями скольжения (рис. 4.7).

Пия (рис. ч. г.). Обрушенные породы действуют на устойчивость призм сполза-Имя двояко. С одной стороны, боковой распор обрушенных пород препятствует сдвижению призм сползания, с другой — силы трения, возникающие на границе с провалом при перемещении обрушенных пород, создают сдвигающие усилия.

ных пород, создают сдвигающие усилих. Боковой распор обрушенных пород действует по нормали к граничной плоскости и может быть найден по аналогии с вычислением давления сыпучего материала на наклонную стенку бункера (см. (3.3)).

(3.3)). Выпуск руды на рабочем горизонте приводит к периодическим подвижкам обрушенных пород в провале. В момент, предшествующий переходу обрушенных пород от покоя к движению, на граничной плоскости развиваются силы трения, определяемые из выражения

$$T_0 = \sigma_{o6} \operatorname{tg} \varphi. \tag{4.45}$$

Равнодействующие нормальных и сдвигающих сил по плоскости "0" на любой глубине определяется из выражения

$$g_0 = \frac{\sigma_{o6}}{\cos\varphi} \ . \tag{4.46}$$

Суммарное воздействие обрушенных пород соответствует площади эпюры внешней нагрузки по  $L_0$ 

$$G_0 = \frac{1}{2} L_0 g_0 , \text{ при } h_{\text{max}}, \qquad (4.47)$$

и раскладывается на нормальную и касательную составляющие к плоскости скольжения *А*:

$$N_0 = G_0 \cos \delta;$$
  

$$T_0 = G_0 \sin \delta,$$
(4.48)

где  $\delta$  — угол между  $L_1$  и  $G_0$  ( $\delta = \beta''' - \alpha_1 - \phi$ ).

Влияние обрушенных пород на устойчивость откоса определяется суммарным воздействие сил трения по  $L_1$  от  $N_0$  и сдвигающих-ся сил  $T_0$ 

$$T_{y,0} = T_0 + T_{rp,0} = G_0 \sin \delta + f_1 G_0 \cos \delta.$$
(4.49)

Сдвигающие силы в зависимости от угла б могут быть как положительные, так и отрицательные в зависимости от знака и должны суммироваться с учетом знака.

Возможность отрыва призм сползания и образования трещин разрыва на земной поверхности зависит от коэффициента запаса устойчивости, представляющего собой отношение удерживающих и сдвигающих сил. Выражение для определения коэффициента запаса устойчивости по системе плоскостей скольжения, учитывающее воздействие обрушенных пород, записывается в следующем виде:

$$K_{\rm yer} = \frac{C_1 L_1 + f_1 [G_1 \cos \alpha_1 + G_2 (\sin \alpha_2 - f_2 \cos \alpha_2) \sin(\alpha_2 - \alpha_1) + G_0 \sin \delta + f_1 G_0 \cos \delta]}{G_1 \sin \alpha_1 + G_2 (\sin \alpha_2 - f_2 \cos \alpha_2) \cos(\alpha_2 - \alpha_1)},$$
(4.50)

где  $C_1$ 

 $L_1$ 

— сцепление по плоскости A, МПа;
 — длина плоскости A, м;

*f*<sub>1</sub>, *f*<sub>2</sub> — коэффициенты трения по соответствующим плоскостям;

*G*<sub>1</sub>, *G*<sub>2</sub> — вес соответствующих блоков.

Граница зоны трещин проводится по нарушениям или плоскостям, ограничивающим призмы сползания с коэффициентом запаса устойчивости 1,3 и менее, принятым по аналогии с коэффициентом запаса устойчивости бортов карьеров [133].

В принципе определить коэффициент устойчивости массива пород можно и для более сложной системы плоскостей скольжения с разбивкой его последовательно на отдельные блоки и передачей дефицита удерживающей силы от вышележащих блоков к нижележащим.

### Выводы

1. Характер напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области влияния образовавшейся зоны обрушения позволяет производить расчет горизонтальных сдвижений и деформаций с использованием плоских задач теории упругости, принимая в качестве расчетной схемы горизонтальные сечения геомеханической модели на необходимой для расчета глубине. Влияние торцевой части зоны обрушения на напряженно-деформированное состояние рассматриваемых сечений, отстоящих от торца более чем на радиус зоны обрушения, не превышает нескольких процентов.

2. Методики и математический аппарат основываются на решениях теории упругости и позволяют рассчитывать векторы горизонтальных сдвижений и тензоры горизонтальных деформаций вокруг зон обрушения круглой и эллиптической форм на различных этапах разработки месторождения.

3. Методика расчета границ зоны трещин сочетает решения упругих задач однородной изотропной среды с оценкой устойчивости реальных структурных нарушений массива горных пород в горизонтальных и вертикальных сечениях с учетом тектонических и гравитационных напряжений, а также веса пород в потенциальных призмах сдвижения.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

## 5.1. Вертикальные сдвижения и деформации земной поверхности и горных пород в мульде сдвижения

Вертикальные сдвижения горных пород и земной поверхности являются следствием изменения первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зоне влияния подземных разработок. В комплексе явлений, определяющих их величину и характер распределения на земной поверхности, преобладают явления изостазии и поперечные деформации на свободную от нагрузки земную поверхность. Явления изостазии вызывают вертикальные сдвижения за счет добычи и перемещения значительных масс горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых [127]. Силы техногенного происхождения представляют собой неуравновешенную систему, на которую не распространяется известный принцип Сен-Венана, поэтому деформации от них охватывают обширные территории и большие глубины. Несмотря на значительные смещения, достигающие нескольких сотен миллиметров, градиент вертикальных смещений оказывается небольшим, вследствие чего вертикальные сдвижения и деформации, обусловленные явлениями изостазии, не оказывают существенного влияния на охраняемые объекты и традиционными методами инструментальных наблюдений, практически, не фиксируются. Основную долю в вертикальных сдвижениях, определяющих наклоны и кривизну земной поверхности и массива горных пород, составляют вертикальные сдвижения, являющиеся следствием проявления вертикальных поперечных деформаций, вызванных изменением горизонтальных напряжений при образовании зоны обрушения.

Преобладающая роль приращений горизонтальных напряжений в возникновении и проявлении вертикальных сдвижений подтверждается тесной взаимосвязью между горизонтальными и вертикальными сдвижениями. Специальными исследованиями в натурных условиях на Сарановском, Северопесчанском и других месторождениях Урала с тектоническими полями напряжений установлена четкая взаимосвязь между циклическими изменениями горизонтальных и вертикальных сдвижений и деформаций [134---136].

Таким образом, одним из путей расчета вертикальных сдвижений является определение суммарных вертикальных деформаций области влияния горных работ, вызванных формированием вторичного поля напряжений при образовании зоны обрушения. Вертикальные деформации являются производными от вертикальных сдвижений. В практике охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок используются вертикальные деформации наклона

$$i_{1,2} = \frac{\eta_2 - \eta_2}{l_{12}} \tag{5.1}$$

и кривизны

$$k_2 = \frac{2(i_{12} - i_{23})}{l_{12} + l_{23}} , \qquad (5.2)$$

где η<sub>1</sub>, η<sub>2</sub>— вертикальные сдвижения начала и конца интервала;

— наклон интервала;

 $i_{12}$ — длина интервала.

Наклон является первой производной от функции распределе $l_{12}$ ния вертикальных сдвижений, кривизна — второй производной. Их величины на рассматриваемом участке зависят от направления, и в каждой точке существуют направления минимума и максимума. В современной практике инструментальных исследований процесса сдвижения это обстоятельство, к сожалению, не учитывается. Наклон и кривизну определяют, обычно, по профильным линиям, расположенным вкрест простирания месторождения, и принимают в качестве максимальных при оценке состояния охраняемых объектов. В действительности, как показано в разделе 6, деформации по этим направлениям бывают максимальными лишь в некоторых частных случаях, и подобная оценка может привести к ошибочным выводам.

## 5.2. Математический аппарат для расчета вертикальных сдвижений вокруг провалов круглой формы

Вертикальные деформации горизонтальных сечений единичной толщины, в соответствии с обобщенным законом Гука, определяются из выражения (рис. 5.1)

$$\varepsilon_{z} = -\frac{\mu}{E} \left( \widehat{rr} + \widehat{\theta} \widehat{\theta} \right), \qquad (5.3)$$

где є — вертикальная деформация;

μ, *E* — коэффициент Пуассона и модуль упругости;

*rr*,  $\hat{\theta}$  — радиальные и тангенциальные изменения первоначального напряженного состояния.

Вертикальные деформации по глубине не остаются постоянными в связи с изменением размеров зоны обрушения в горизонтальных сечениях, возрастанием первоначальных напряжений и появлением распора обрушенных пород зоны обрушения. Вертикальные сдвижения суммируются из вертикальных деформаций единичных сечений и определяются как площадь эпюры вертикальных деформаций из выражения

$$\eta = \frac{\varepsilon_{z0} + \varepsilon_{zh}}{2}h , \qquad (5.4)$$

где η — вертикальные сдвижения;

ε<sub>10</sub>, ε<sub>1</sub> — вертикальные деформации поверхностного и торцевого сечений массива горных пород;

*h* — глубина разработки.

После подстановки в него выражений для  $\varepsilon_{z0}$ ,  $\varepsilon_{zh}$ ,  $\widehat{rr}$ ,  $\widehat{\theta\theta}$  из (5.3), (4.18) и (4.21) выражение (5.4) для определения вертикальных сдвижений преобразуется окончательно к следующему виду:

$$\eta = \left(\sigma_1 - \sigma_2\right) \frac{\mu}{E} h \left( \frac{R_0^2}{r_0^2} \cos 2\theta_0 + \frac{R_h^2}{r_h^2} \cos 2\theta_h \right), \quad (5.5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — первоначальные напряжения в массиве горных пород за пределами зоны влияния горных разработок;



Рис. 5.1. Схема к расчету вертикальных сдвижений вокруг зоны обрушения круглой формы

 $r_0, \theta_0$  и  $r_h, \theta_h$  — радиальные координаты расчетной точки на поверхности и ее проекции на торцевой плоскости.

Расчет вертикальных сдвижений осуществляется с помощью совмещенного плана поверхности и торцевой плоскости с расчетными контурами зоны обрушения и радиальными координатами. Картина распределения вертикальных сдвижений может представляться наглядно в виде изолиний. Наклоны и кривизна рассчитыва-

ются при наличии вертикальных сдвижений по известным формулам (5.1) и (5.2).

Анализ выражения (5.5) позволяет получить некоторые закономерности проявления вертикальных сдвижений вокруг провалов круглой формы:

1. Боковой распор обрушенных пород в зоне обрушения и боковой распор нетронутого массива горных пород не вызывают вертикальных сдвижений.

2. В изотропном первоначальном поле напряжений ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) вертикальные сдвижения не возникают. Для их проявления необходима анизотропия первоначальных напряжений.

3. Максимальные значения вертикальных сдвижений возникают на лучах, совпадающих с направлением первоначальных главных напряжений нетронутого массива горных пород. По лучам, направленным под углами 45° к направлению главных напряжений, вертикальные сдвижения не возникают.

### 5.3. Математический аппарат для расчета вертикальных сдвижений и деформаций вокруг эллиптического провала

Вертикальные деформации массива горных пород в сечениях, прилегающих к земной поверхности, в соответствии с обобщенным законом Гука, определяются из выражения (рис. 5.2)

$$\varepsilon_{z0} = -\frac{\mu}{E} \left[ \left( \sigma'_x + \sigma'_y \right) - \left( \sigma^0_x + \sigma^0_y \right) \right], \qquad (5.6)$$

где  $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$  — нормальные напряжения по площадкам *x* и *y* в плоскости с эллиптическим отверстием;

 $\sigma_x^0, \sigma_y^0$  — первоначальные нормальные напряжения по тем же площадкам *x* и *y* в плоскости без отверстия.

После подстановки в него выражений  $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$  из (4.34) и  $\sigma^0_x$ ,  $\sigma^0_y$  из (4.16) формула для определения вертикальных деформаций примет следующий вид:

$$\varepsilon_{z0} = \frac{\mu}{E} \left[ \left( \sigma_1' + \sigma_2' \right) \left( 1 - \frac{n_2^0}{n_1^0} \right) - \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right) \frac{n_3^0}{n_1^0} \right] .$$
 (5.6')

Для глубинных сечений, в которых дополнительно на стенки зоны обрушения действуют обрушенные породы  $\sigma_{ob}$ , а за пределами



Рис. 5.2. Схема к расчету вертикальных сдвижений вокруг зоны обрушения эллиптической формы

зоны влияния подземных разработок к напряжениям, действующим на поверхности, добавляются напряжения бокового распора

 $\frac{\mu}{1-\mu}\gamma h$ , выражение для вертикальных деформаций получится преобразованием (5.6') путем добавления в него  $\sigma_x'' + \sigma_y''$  из (4.38) и заменой  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , соответственно, на  $\sigma_1 \frac{\mu}{1-\mu}\gamma h$  и  $\sigma_2 \frac{\mu}{1-\mu}\gamma h$ .

$$\varepsilon_{zh} = \frac{\mu}{E} \left[ \left( \sigma_1 + \sigma_2 + 2\gamma h \frac{\mu}{1 - \mu} \right) \left( 1 - \frac{n_2^h}{n_1^h} \right) - \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right) \frac{n_3^h}{n_1^h} + 4\sigma_{oo} \frac{n_4^h}{n_1^h} \right] . (5.6'')$$

После подстановки  $\varepsilon_{z0}$  и  $\varepsilon_{zb}$  в (5.4) выражение для вертикальных сдвижений вокруг провала эллиптической формы запишется в следующем виде:

$$\eta = \frac{\mu h}{2E} \left[ \left( \sigma_1 + \sigma_2 \right) \left( 2 - \frac{n_2^0}{n_1^0} - \frac{n_2^h}{n_1^h} \right) - \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right) \left( \frac{n_3^0}{n_1^0} + \frac{n_3^h}{n_1^h} \right) + \frac{2\mu\gamma h}{1 - \mu} \left( 1 - \frac{n_2^h}{n_1^h} \right) + 4\sigma_{o6} \frac{n_4^h}{n_1^h} \right], \qquad (5.7)$$

- где  $\sigma_1, \sigma_2$  главные нормальные напряжения за пределами зоны влияния провала в поверхностных слоях массива горных пород;
  - --- давление обрушенных пород (боковой распор) на стен- $\sigma_{o\delta}$ ки зоны обрушения;
  - плотность обрушенных пород;
  - h - глубина разработки;
  - коэффициент Пуассона и модуль упругости массива  $\mu, E$ горных пород;

 $n_1 = \rho^4 - 2m\rho^2 \cos 2\theta + m^2;$  $n_2 = \rho^4 - m^2;$  $n_3 = 2[m \cos 2\alpha - \rho^2 \cos 2(\theta - \alpha)];$  $n_{\rm A} = m(\rho^2 \cos 2\theta - m).$ 

Индексы "0" и "h" при  $n_1...n_4$  соответствуют расчетным точкам на поверхности и их проекциям на торцевую плоскость зоны обрушения. В соответствии с этими индексами в выражения подставляются параметры ρ, θ, α и m по верхней и нижней плоскостям расчетной схемы.

Как и в случае провала круглой формы, для расчета сдвижений строится совмещенный план поверхности и торцевой плоскости с расчетными контурами зоны обрушения и криволинейными координатами. Расчетные точки, в зависимости от поставленных задач, могут располагаться произвольно или по узлам координатной сетки. Картина распределений вертикальных сдвижений может представляться в виде изолиний. Расчет наклонов и кривизны производится также по формулам (5.1) и (5.2).

## Выводы

1. Характер напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области влияния образовавшейся зоны обрушения таков, что в формировании вертикальных сдвижений и деформаций участвует вся толща пород, вовлеченная в процесс сдвижения, поэтому расчет их параметров производится на объемной модели. 2. Методики и математический аппарат, предложенные в рабо-

те, позволяют рассчитывать вертикальные сдвижения и деформации при образовании зон обрушения, имеющих круглую или эллиптическую форму.

3. В качестве вертикальных деформаций разработанные методики позволяют рассчитывать величины наклонов и кривизны по различным направлениям, определить траектории максимальных наклонов и кривизны.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ

Исследования сдвижений горных пород в промышленных условиях, а также на теоретических геомеханических моделях свидетельствуют о существенных различиях в закономерностях формирования мульд сдвижения вокруг провалов круглой и эллиптической форм. Это обусловило принятое в работе раздельное рассмотрение особенностей строения мульд сдвижения при круглых и эллиптических формах провалов.

### 6.1. Формирование мульды сдвижения вокруг провала круглой формы

### 6.1.1. Распределение горизонтальных сдвижений и деформаций

Поле горизонтальных сдвижений земной поверхности и вмещающих пород характеризуется величиной и направлением сдвижений ( $\zeta$ ,  $\delta$ ), подчиняющимися сложным закономерностям [137]. Наглядное представление о направлении горизонтальных сдвижений дают траектории сдвижений, полученные компьютерными расчетами по разработанным методикам при различных параметрах геомеханической модели.

Наиболее простое распределение горизонтальных сдвижений вокруг круглого провала происходит в изотропном поле напряжений, когда величины главных нормальных напряжений за зоной влияния горных работ одинаковы  $\sigma_1 = \sigma_2$  (рис. 6.1). Траектории горизонтальных сдвижений, соответствующие этому случаю, направлены к центру зоны обрушения.

В анизотропном поле напряжений, когда по одному из направлений действуют большие напряжения, траектории горизонтальных сдвижений приобретают более сложные очертания. При отношении  $\sigma_2/\sigma_1 = 2$  в зоне, прилегающей к радиальному направлению, совпадающему с  $\sigma_2$ , траектории близки к радиальному направлению (рис. 6.2). Но по мере приближения к радиальному направлению, совпадающему с  $\sigma_1$ , траектории горизонтальных сдвижений



Рис. 6.1. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг круглого провала при  $\sigma_1 = \sigma_2$ 



Рис. 6.2. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг круглого провала при σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 2



Рис. 6.3. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг круглого провала при  $\sigma_2/\sigma_1 = 3$ 

#### Таблица 6.1

#### Расчетные значения вскторов горизоптальных сдвижений при провале круглой формы

Угловая коорли-		Ради	иальная ко	ординат гори	а точек, в зонтальні	сличина лх сдвиж	н направл сний	ение век	тора	
ната то-	r = 1 r		r =	= 2 r =		3 r		4	r = 5	
аск, град	ξ	δ	ξ	δ	ξ	δ	ξ	δ	ξ	δ
				$\sigma_1 = -$	-1, $\sigma_2$ :	= - 1				
0 30 60 90	1,30 1,30 1,30 1,30	180 180 180 180	0,65 0,65 0,65 0,65	180 180 180 180	0,43 0,43 0,43 0,43	180 180 180 180	0,33 0,33 0,33 0,33	180 180 180 180	0,26 0,26 0,26 0,26	180 180 180 180
				$\sigma_1 = -$	-1, σ <sub>2</sub> :	= - 2				
0 30 60 90	0,60 1,73 2,87 3,31	180 223 204 180	0,06 0,64 1,49 1,90	180 216 185 180	0,01 0,40 1,00 1,30	180 214 193 180	0,00 0,29 0,75 0,98	360 214 192 180	0,01 0,23 0,60 0,79	360 213 192 180
				$\sigma_1 = -$	-l, σ <sub>2</sub> :	= - 3				
0 30 60 90	0,10 2,66 4,60 5,31	360 242 211 180	0,54 0,84 2,35 1,14	360 243 199 180	0,42 0,50 1,58 2,16	360 243 196 180	0,33 0,36 1,19 1,63	360 244 196 180	0,27 0,28 0,95 1,31	360 244 195 180
				$\sigma_1 = -$	1, $\sigma_2 =$	= - 30				
0 30 60 90	19,09 34,01 52,37 59,45	360 269 221 180	16,62 11,35 25,85 36,81	360 287 205 180	11,92 7,00 17,33 26,41	360 292 202 180	8,20 5,11 13,03 19,29	360 294 201 180	7,44 4,04 10,44 15,52	360 295 201 180

все больше отклоняются от радиального направления, а на участке  $\theta = 0^{\circ} \div 15^{\circ}$  и  $r = 4R \div 5R$  направляются от провала в глубь массива.

С увеличением анизотропии первоначального напряженного состояния зона с обратным направлением горизонтальных сдвижений расширяется и при  $\sigma_2/\sigma_1 = 3$  занимает всю область в диапазоне  $\theta \approx 340^\circ$ ÷ 20° (рис. 6.3). При дальнейшем увеличении анизотропии первоначального напряженного состояния картина траекторий горизонтальных сдвижений качественно не изменяется, но наблюдается некоторое расширение зоны с обратным направлением сдвижений. Так, например, при  $\sigma_2/\sigma_1 = 30$  она охватывает сектор  $\theta \approx 325^\circ \div 35^\circ$  (рис. 6.4).

Расчетные величины векторов горизонтальных сдвижений и их направления для приведенных выше соотношений первоначальных напряжений и модели с параметрами R = 1 м,  $G = 0.384 \cdot 10^4$  МПа,  $\chi = 2.08$  и  $\sigma_1 = -1$  МПа приведены в таблице 6.1. Для конкретных условий величины векторов горизонтальных сдвижений определя-







 $a = \epsilon_2 \cdot 10^3$ ;  $b = \epsilon_1 \cdot 10^3$ 

ются умножением табличных значений на коэффициенты подобия, учитывающие геометрический и силовой масштабы, а также соотношение модулей сдвига модели и натуры. Из таблицы следует, что векторы горизонтальных сдвижений земной поверхности, их величина и направление, являются функцией первоначальных горизонтальных напряжений массива горных пород, расположения точек относительно провала, и направления действия главных напряжений.

На всей территории мульды сдвижения векторы сдвижения бывают направлены к центру выработанной площади только в частном случае, когда первоначальное поле напряжений изотропное. Во всех остальных случаях, при анизотропном напряженном состоянии, направления сдвижений подчиняются более сложным закономерностям.

Расчетные значения параметров тензоров деформаций в мульде сдвижения горных пород в виде величины и направления главных нормальных деформаций для некоторых случаев естественного поля напряжений и параметров модели, аналогичных расчетной модели векторов горизонтальных сдвижений, приведены в табл. 6.2.

При изотропных горизонтальных напряжениях изолинии главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  представляют собой концентрические окружности (рис. 6.5). На каждом участке мульды сдвижения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ равны по величине, но противоположны по знаку, соответственно, растягивающие и сжимающие. Растягивающие деформации направлены радиально, а сжимающие — по касательным к окружности.

Обращает на себя внимание распространение области влияния в глубь массива. На расстоянии 4*R* от центра провала (*R* — радиус провала) величины главных нормальных деформаций составляют 7—8 % от максимальных деформаций, возникающих на контуре провала.

Следовательно, зона влияния горных работ представляет собой обширную область, превышающую во многих случаях длины профильных линий, определяемые в соответствии с действующей инструкцией по наблюдениям за сдвижением [21]. Так, например, на Северопесчанском месторождении при радиусе зоны обрушения около 400 м и глубине горных работ 450 м зона влияния размером 4*R* составит 1600 м, а инструкцией рекомендуется оборудовать опорные реперы в этом случае на расстоянии 450—500 м от зоны обрушения. При решении технических вопросов эта разница не играет существенной роли, так как основные параметры процесса сдвижения определяются по относительным деформациям. В случае же проведения исследований это обстоятельство надо иметь в виду.

Из характера распределения деформаций вокруг провала, как и из поля векторов, следует, что при изотропном напряженном состо-

0 00 33 0 0 66 0 0 69 0 ÷ 0000 5 -0,006 -0,013 -0,015 -0,142 -0,164 -0,154 -0,141 -0,006 -0,008 -0,010 -0,005 -0,005 -0,005 ф относительно Ś ŝ 11 формы 0,005 0,007 0,020 0,026 0,020 0,083 0,236 0,304 0,000 0,005 0,012 0,015 0,005 0,005 0,005 0,005 ω деформаций є<sub>1</sub>, є2 и направление 138 + 0161 0 0 -152 0 круглой 0 69 0 0000 Ð ,214 ,249 ,234 -0,010 -0,020 -0,022 -0,022 -0,013 -0,015 -0,015 -0,008 -0,008 -0,008 -0,009 ώ главиых нормальных деформаций вокруг провала ģ 'nΫ q 11 -0,039 0,122 0,361 0,466 0,011 0,031 0,040 0,000 0,008 0,019 0,024 0,008 0,008 0,008 0,008 -0,007 ŵ  $\begin{array}{c} 0 \\ 162 \\ 0 \end{array}$ 0 54 0 0 163 0 0000 9нормальных -0,023 -0,026 -0,026 -0,020 -0,035 -0,038 -0,037 -0,351 -0,194 -0,387 -0,347 ,017 -0,014 -0,014 -0,014 4 -30 -0,01 3 -7 è 11 q ា 11 0,194 0,613 0,798 0,002 0,015 0,033 0,041 02 0,019 0,054 0,069 0,100 -0,011 б g 62 0,014 ,014 0,014 главных ω ó -11 0 161 169 0 0 146 164 0 168 172 0 б б г, величина ю б 0000 9 -0,593 -0,805 -0,694 -0,585 -0,074 -0,075 -0,071 -0,051 -0,053 -0,051 -0,032-0,032-0,032-0,032,046 059 N ຜ່ 1 Ý Ŷ TOPICK / -0,422 0,298 1,201 1,600 0,011 0,034 0,070 0,086 -0,011 0,039 0,110 0,141 0,032 0,032 0,032 0,032 координата ω q значения 0 28 15 0 0120 0 10 0 0000 9 5,930 4,393 0,938 1,900 -0.530-0.414-0.1550.010-0,330 -0,270 -0,137 -0,060 -0,130-0,130-0,130-0,130Радиальная ŝ N, 4, 9 11 Расчетные 1 0,250 0,274 0,295 0,270 ,870 ,363 ,966 0,190 0,200 0,207 0,200 0,130 0,130 0,130 0,130 ω している Угловая коор-дината точек 0, град 0 20 30 06030 08080

 $\sim$ 

9.

Таблица



Рис. 6.6. Изолинии главных нормальных деформаций вокруг круглого провала при  $\sigma_2/\sigma_1 = 2$ :  $a - \epsilon_2 \cdot 10^3; \ 6 - \epsilon_1 \cdot 10^3$ 

янии профильные линии радиального направления будут фиксировать растягивающие деформации. На профильных линиях любого другого направления могут проявиться деформации различных знаков в зависимости от степени отклонения профильной линии от радиального направления.

С появлением анизотропии напряженного состояния распределение деформаций заметно усложняется (рис. 6.6). Минимальные (с учетом знака) нормальные деформации, как и при изотропном поле напряжений, остаются сжимающими во всей зоне влияния, но их изолинии значительно отличаются от концентрических окружностей предшествующего случая, группируясь вдоль направления  $\theta = 0^{\circ}$ .



Рис. 6.7. Изолинии главных нормальных деформаций вокруг круглого провала при  $\sigma_2/\sigma_1 = 3$ :  $a - \epsilon_2 \cdot 10^3$ ;  $6 - \epsilon_1 \cdot 10^3$ 

У изолиний максимальных нормальных деформаций по нулевому направлению намечается прогиб в сторону провала и появление в зоне влияния нулевой изолинии. Интересно отметить, что участок прогиба изолиний совпадает с областью проявления векторов горизонтальных сдвижений, направленных от провала в глубь массива (см. рис. 6.2).

(см. рис. 0.2). С увеличением анизотропии до σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 3 в картине минимальных деформаций происходят изменения только количественного характера. Качественно картина изолиний аналогична предыдущей (рис. 6.7). В картине изолиний максимальных деформаций тенденция прогиба изолиний к провалу усиливается. Нулевая изолиния пеция прогиба изолиний к провалу усиливается.



Рис. 6.8. Изолинии главных нормальных деформаций вокруг круглого провала при  $\sigma_2/\sigma_1 = 30$ :  $a - \epsilon_2 \cdot 10^3; \ 6 - \epsilon_1 \cdot 10^3$ 

ремещается из района 4*R* при  $\sigma_2/\sigma_1 = 2$  в район 2*R*, и расширяется охватываемая ею область. Внутри нулевой изолинии возникает область со сжимающими максимальными деформациями. Расширение области, ограничиваемой нулевой изолинией, и области сжимающих максимальных деформаций также хорошо согласуется с расширением области с обратным направлением векторов горизонтальных сдвижений (см. рис. 6.3). Дальнейшее увеличение анизотропии напряженного состояния практически не вносит изменений в картину изолиний минимальных и максимальных деформаций. Изменения касаются в основном количественных параметров (рис. 6.8).

Таким образом, в общем случае при анизотропном напряженном состоянии в областях, прилегающих к нулевому направлению, в зависимости от степени анизотропии, возможны и сжимающие, и растягивающие деформации.

#### 6.1.2. Распределение вертикальных сдвижений и деформаций

Расчеты вертикальных сдвижений, выполненные по разработанной методике, свидетельствуют, что одним из основных свойств картины изолиний вертикальных сдвижений вокруг круглой зоны обрушения является ее относительная стабильность при различных параметрах поля первоначальных напряжений, в отличие от горизонтальных сдвижений, у которых распределение в значительной мере зависит от соотношения первоначальных напряжений. Общая схема изолиний вертикальных сдвижений вокруг круглого провала показана на рис. 6.9. Четырьмя лучами с нулевыми вертикальными сдвижениями, направленными под углом 0 45°-225° и 135°-315°, вся площадь мульды сдвижения разделяется на четыре квадранта. В двух из них, прилегающих к направлению о, проявляются поднятия, а в двух других, совпадающих с направлением σ<sub>2</sub>, — оседания. В целом, вокруг круглого провала получается последовательное чередование зон с поднятиями и оседаниями земной поверхности. Такое строение картины изолиний вертикальных сдвижений сохраняется при любом соотношении между σ<sub>1</sub> и σ<sub>2</sub>. Разность первоначальных напряжений σ<sub>1</sub> - σ<sub>2</sub> оказывает влияние только на величину вертикальных сдвижений. Чем больше эта разность, тем больше оседания в зонах оседаний и поднятия в зоне поднятий. Величины поднятий и оседаний и строения изолиний этих зон одинаковы, а вся картина изолиний вертикальных сдвижений симметрична относительно осей с углами θ̂ 0°—180° и 90°—270°.

Общей картине распределения вертикальных сдвижений вокруг зон обрушения круглой формы не соответствует только один случай, когда  $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ , т. е. при изотропном поле горизонтальных первоначальных напряжений. В этом случае вертикальные сдвижения отсутствуют во всей мульде сдвижения, кроме зоны обрушения.

Для некоторых конкретных горно-геологических и геомеханических условий расчетные величины вертикальных сдвижений приведены в таблице 6.3. Детальная картина изолиний вертикальных сдвижений для провала радиусом 500 м и глубины разработки 500 м показана на рис. 6.10.

Наклоны земной поверхности, вызываемые вертикальными сдвижениями, характеризуются величиной и направлением. В каждой точке существуют два ортогональных направления, по кото-

140



Рис. 6.9. Картина изолиний вертикальных сдвижений вокруг круглого провала (*сплошные* — поднятие, *пунктирные* — оседания)



Рис. 6.10. Изолинии вертикальных сдвижений (см) вокруг зоны обрушения круглой формы.  $R_0 = 500 \text{ м}; R_b = 450 \text{ м}; h = 500 \text{ м}; \mu = 0,3; E = 7 \cdot 10^3 \text{ МПа}; \sigma_2 - \sigma_1 = 8 \text{ МПа}$ 

Таблица 6.	3	
------------	---	--

Величины вертикальных сдвижений земпой поверхности (см) вокруг зоны обрушения круглой формы

	θ								
Г, М	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
$R_0 = 100$ м; $R_h = 91$ м; $h = 100$ м; $\mu = 0,3$ ; $E = 7 \cdot 10^3$ МПа; $\sigma_1 - \sigma_2 = 8$ МПа									
100 125 150 175 200 250 300 400	6,27 4,01 2,79 2,05 1,57 1,00 0,70 0,39	5,43 3,47 2,41 1,77 1,36 0,87 0,60 0,34	3,13 2,01 1,39 1,02 0,78 0,50 0,35 0,20	0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00	$\begin{array}{r} -3,13\\ -2,01\\ -1,39\\ -1,02\\ -0,78\\ -0,50\\ -0,35\\ -0,20\end{array}$	-5,43 -3,47 -2,41 -1,77 -1,36 -0,87 -0,60 -0,34	$\begin{array}{c} -6,27\\ -4,01\\ -2,79\\ -2,05\\ -1,57\\ -1,00\\ -0,70\\ -0,39\end{array}$		
$R_0 = 100 \text{ m}; R_h = 91 \text{ m}; h = 100 \text{ m}; \mu = 0.3;$ $E = 7 \cdot 10^3 \text{ M}\Pi a; \sigma_1 - \sigma_2 = 1 \text{ M}\Pi a$									
100 125 150 175 200 250 300 400	$\begin{array}{c} 0,78\\ 0,50\\ 0,35\\ 0,25\\ 0,20\\ 0,12\\ 0,09\\ 0,05 \end{array}$	0,68 0,43 0,30 0,22 0,17 0,11 0,07 0,04	0,39 0,25 0,17 0,13 0,10 0,06 0,04 0,03	$\begin{array}{c} 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ \end{array}$	$\begin{vmatrix} -0,39\\ -0,25\\ -0,17\\ -0,13\\ -0,10\\ -0,06\\ -0,04\\ -0,03 \end{vmatrix}$	$\begin{array}{ c c c } -0,68 \\ -0,43 \\ -0,30 \\ -0,22 \\ -0,17 \\ -0,11 \\ -0,07 \\ -0,04 \end{array}$	$ \begin{vmatrix} -0,78\\-0,50\\-0,35\\-0,25\\-0,20\\-0,12\\-0,09\\-0,05 \end{vmatrix} $		
$R_0 = 500 \text{ m}; R_\mu = 450 \text{ m}; h = 500 \text{ m}; \mu = 0,3;$ $E = 7.10^3 \text{ MHa}; \sigma_1 - \sigma_2 = 8 \text{ MHa}$									
500 625 750 875 1000 1250 1500 2000	33,77 21,61 15,01 11,03 8,44 5,40 3,75 2,11	29,25 18,72 13,00 9,55 7,31 4,68 3,25 1,83	16,89 10,81 7,50 5,51 4,22 2,70 1,88 1,06	$\begin{array}{c} 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ \end{array}$	-16,89 -10,81 -7,50 -5,51 -4,22 -2,70 -1,88 -1,06	-29,25 -18,72 -13,00 -9,55 -7,31 -4,68 -3,25 -1,83	$\begin{vmatrix} -33,77\\ -21,61\\ -15,01\\ -11,03\\ -8,44\\ -5,40\\ -3,75\\ -2,11 \end{vmatrix}$		
$R_0 = 500$ м; $R_h = 450$ м; $h = 500$ м; $\mu = 0,3$ ; $E = 7 \cdot 10^3$ МПа; $\sigma_1 - \sigma_2 = 1$ МПа									
500 625 750 875 1000 1250 1500 2000	4,22 2,70 1,88 1,38 1,06 0,68 0,47 0,26	3,66 2,34 1,62 1,19 0,91 0,58 0,41 0,23	2,11 1,35 0,94 0,69 0,53 0,34 0,23 0,13	$\begin{array}{c} 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ 0,00\\ \end{array}$	$\begin{array}{ c c c } -2,11 \\ -1,35 \\ -0,94 \\ -0,69 \\ -0,53 \\ -0,34 \\ -0,23 \\ -0,13 \end{array}$	-3,66 -2,34 -1,62 -1,19 -0,91 -0,58 -0,41 -0,23	-4,22 -2,70 -1,88 -1,38 -1,06 -0,68 -0,47 -0,26		

t


Рис. 6.11. Траектории максимального наклона вокруг зоны обрушения круглой формы

рым наклон минимальный, равный нулю, и максимальных (по абсолютному значению). Направление максимального значения наклона, исходя из самого понятия наклона, перпендикулярно изолиниям вертикальных сдвижений. Поэтому траектории максимальных наклонов, являющихся важнейшей характеристикой поля вертикальных деформаций, представляют собой семейство кривых, ортогональных изолиниям вертикальных сдвижений (рис. 6.11). Траектории минимальных наклонов (нулевых) совпадают с изолиниями вертикальных сдвижений. В картине траекторий максимальных наклонов особенно примечательны два участка: источник траекторий максимальных наклонов, находящийся у пересечения с кругом радиальных направлений, совпадающих с направлением  $\sigma_1$ , и сток траекторий, находящийся в аналогичной точке  $\sigma_2$ .

Источник соответствует участку поднятий, а сток расположен на участке оседаний. Все траектории выходят из источника и направляются в виде плавных кривых в сток, создавая сложную симметрию картину с осями симметрии 0°—180° и 90°—270°. С радиальным направлением совпадают только две траектории, совпадающие с направлением действия  $\sigma_1$  (вытекающая) и  $\sigma_2$  (стекающая).

Из картины траекторий максимальных наклонов можно сделать важный вывод относительно интерпретации результатов инструментальных наблюдений. Радиальные профильные линии, обычно образуемые при проведении инструментальных наблюдений, дают информацию о максимальных наклонах только в том случае, когда они совпадают с направлениями от и ос. В остальных случаях они будут давать информацию о промежуточных значениях накло-



Рис. 6.12. Изолинии абсолютных значений максимальных наклонов вокруг зоны обрушения круглой формы

нов, а когда профильная линия окажется направленной под углом  $45^{\circ}$  к  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , то она совпадает с нулевыми наклонами. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при интерпретации инструментальных наблюдений, чтобы не допустить серьезных ошибок.

Изолинии абсолютных значений наклонов имеют более простой вид, чем траектории наклонов (рис. 6.12). Изолинии по своей форме близки к концентрическим окружностям с небольшими отклонениями. В непосредственной близости от границ зоны обрушения образуются небольшие по площади зоны концентрации наклонов. В целом, по абсолютному значению соблюдается закономерность роста наклонов по мере приближения к зоне обрушения.

#### 6.2. Формирование мульды сдвижения вокруг эллиптического провала

## 6.2.1. Распределение горизонтальных сдвижений и деформаций

Общие закономерности развития горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала в условиях изотропного и анизотропного напряженных состояний, рассмотренные на расчетной геомеханической модели с параметрами a = 300 м, b = 100 м, R = 200 м, m = 0.5 с упругими постоянными  $G = 0.27 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = 0.3$ , в отличие от круглого провала являются более сложными.

чие от круглого провала двилотол соное сполонтальных сдвижений На рис. 6.13 показаны траектории горизонтальных сдвижений в нетронутом при изотропном поле горизонтальных напряжений в нетронутом



Рис. 6.13. Трасктории горнзонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при  $\sigma_1 = \sigma_2$ 

массиве горных пород  $\sigma_1 = \sigma_2$ . На большей части площади зоны влияния горных разработок в секторе от 20° до 160° горизонтальные сдвижения направлены в сторону зоны обрушения. Траектории сдвижений по главным осям эллипса совпадают с радиальными направлениями, а на остальных участках указанного сектора они нсзначительно отклоняются от радиальных направлений. В секторах от 0° до 20° и от 160° до 180°, примыкающих к торцам эллипса, траектории горизонтальных сдвижений разворачиваются в направлении нетронутого массива пород, в сторону, противоположную провалу.

Таким образом, в случае провала эллиптической формы, аномалии в развитии горизонтальных сдвижений, отмечавшиеся при круглом провале лишь при апизотропном поле напряжений ( $\sigma_2/\sigma_1 = 2$  и более), появляются при изотропном первоначальном напряженном состоянии, причем удельный вес площади с аномальными проявлениями горизонтальных сдвижений составляет около 25 %.

Влияние анизотропии первоначального поля напряжений на горизонтальные сдвижения вокруг провала эллиптической формы неоднозначно, как в случае круглого провала, и зависит не только от величины анизотропии, характеризуемой соотношением  $\sigma_2/\sigma_1$ , но и направления главных напряжений. В случае действия максимальных сжимающих напряжений по направлению меньшей оси эллипса траектории горизонтальных сдвижений показаны на рис. 6.14 и 6.15. Следует отметить, что, несмотря на значительную анизотропию, изменяющуюся от 2 до 10, картина траекторий горизонтальных сдвижений качественно подобна слу-



Рис. 6.14. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 2; α = 0°



Рис. 6.15. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 10; α = 0°



Рис. 6.16. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при  $\sigma_2/\sigma_1 = 2$ ;  $\alpha = 90^\circ$ 

чаю изотропного поля напряжений. Отличие состоит лишь в некотором расширении в торцах провала зоны с обратным направлением горизонтальных сдвижений. При  $\sigma_2/\sigma_1 = 2$  площадь с обратным направлением сдвижений составляет около 30 %, а при  $\sigma_2/\sigma_1 = 10$  — около 40 %.

Если максимальное сжатие направлено по большой оси эллипса, то влияние анизотропии более разнообразно. При незначительной анизотропии ( $\sigma_2/\sigma_1 = 2$ ) траектории горизонтальных сдвижений очень близки к радиальным направлениям (рис. 6.16). Видимо, в этом случае взаимно компенсируется влияние анизотропии и формы зоны обрушения. Аналогичные картины траекторий горизонтальных сдвижений сохраняются при отношениях  $\sigma_2/\sigma_1$  до 6, причем по мере увеличения анизотропии происходит постепенное отклонение траекторий от радиального направления на участке, прилегающем к направлению меньшей оси эллипса. При отношении  $\sigma_2/\sigma_1 = 7$ наступает смена направления сдвижений на обратное, в глубь массива (рис. 6.17). На участке между *R* и 2*R* четко выделяется зона смены направления сдвижений.

При дальнейшем увеличении анизотропии до  $\sigma_2/\sigma_1 = 10$  зона смены направления сдвижений исчезает по всей области, прилегающей к продолжению меньшей оси, горизонтальные сдвижения приобретают направленность в глубь массива (рис. 6.18). Область с обратным направлением горизонтальных сдвижений занимает около 30 % всей площади мульды сдвижения.

Если направление главных напряжений в нетронутом массиве горных пород не совпадает с главными осями эллипса провала, картина горизонтальных сдвижений значительно усложняется. Примеры полей горизонтальных сдвижений для  $\alpha = 30^{\circ}$  и  $\alpha = 60^{\circ}$  приведены на рис. 6.19 и 6.20. В них много общего. В обоих случаях горизонтальные сдвижения, направленные непосредственно на провал, присущи небольшой области, прилегающей к провалу и распространяющейся в глубь массива в секторе  $30^{\circ}$ — $60^{\circ}$ . На остальной площади горизонтальные сдвижения имеют либо обратное, либо какие-то промежуточные направления.

Вообще распределение горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала разнообразно и при неизменных свойствах массива горных пород зависит от сочетания следующих факторов: анизотропии горизонтальных напряжений в нетронутом массиве ( $\sigma_2/\sigma_1$ ); направления действия главных напряжений; параметров эллипса, отображающего провал. Детальное изучение влияния каждого из указанных факторов не входит в задачу данной работы и может явиться предметом самостоятельных исследований.



Рис. 6.17. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 7; α = 90°



Рис. 6.18. Траектории горизонтальных сдвижений вокруг эллиптического провала при σ<sub>2</sub>/σ<sub>1</sub> = 10; α = 90°









Рис. 6.21. Картина изолиний вертикальных сдвижений вокруг эллиптического провала (*сплошные* — поднятия, *пунктирные* — оседания)

Таблица 6.4 Вертикальные сдвижения земной поверхности (см) вокруг зоны обрушения

				Popula		
θ, град 354 0 15 30 45 60 75 84				ρ		
ө, град	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	3,0
354 0 15 30 45 60 75	23,2 23,0 16,1 4,6 -5,9 -13,5 -17,4	15,3 15,2 11,1 3,6 -3,7 -9,3 -12,6	$ \begin{array}{c} 11,0\\ 11,0\\ 8,1\\ 3,0\\ -2,6\\ -6,8\\ -9,4 \end{array} $	8,2 8,2 6,2 2,3 1,9 5,2	5,2 5,1 4,0 1,6 -1,1 -3,3 -4,7	2,3 2,2 1,7 0,8 0,4 1,4
84 90 105 120 135 150 165 174	-17,4 -18,8 -18,2 -13,7 -7,4 1,1 11,5 20,6 23,1	$ \begin{array}{c} -12,0\\ -13,1\\ -12,9\\ -10,0\\ -5,0\\ 1,4\\ 8,4\\ 13,9\\ 15,4\\ \end{array} $	-9,9 -9,7 -7,5 -3,8 1,2 6,2 10,1 11,0	-7,7 -7,4 -5,9 -2,9 1,0 4,9 7,6 8,2	-4,9 -4,8 -3,7 -1,8 0,8 3,2 4,9 5,2	$\begin{array}{c} -2,1\\ -2,2\\ -2,2\\ -1,7\\ -0,7\\ 0,3\\ 1,5\\ 2,1\\ 2,3\end{array}$

эплиптической формы

Пока важно отметить, что во многих случаях доля аномальных проявлений горизонтальных сдвижений достаточно представительна.

#### 6.2.2. Распределение вертикальных сдвижений и деформаций

Из анализа расчетного математического аппарата следует, что основная доля вертикальных сдвижений, возникающих вокруг эллиптического провала, определяется разностью главных горизонтальных напряжений. Она составляет в общей их величине 85—95 %, поэтому закономерности формирования поля вертикальных сдвижений и деформаций вокруг эллиптического провала близки к проявлениям сдвижений вокруг провала круглой формы.

Величины вертикальных сдвижений в зоне плавных деформаций мульды сдвижения для условий Северопесчанского месторождения в 1974 г., полученные расчетным путем по разработанным методикам, приведены в табл. 6.4. В этот период геомеханическая модель месторождения определялась следующими параметрами: эллипс зоны обрушения по поверхности:  $a_0 = 330$  м,  $b_0 = 240$  м,  $R_0 =$ = 285 м,  $m_0 = 0.158$ ,  $\alpha_0 = 174^\circ$ ; эллипс подземный по торцу зоны обрушения на глубине h = 450 м:  $a_h = 160$  м,  $b_h = 60$  м,  $R_h = 110$  м,  $m_h =$ 





= 0,455,  $\alpha_h$  = 84°; упругие постоянные массива горных пород  $E = 7.103 \text{ МПа}, \mu = 0,3.$ 

Распределение вертикальных сдвижений в виде изолиний представлено на рис. 6.21. Здесь так же, как и при круглом провале (см. рис. 6.9), четко выделяются области оседаний, примыкающих к направлению действия  $\sigma_2$ , и области поднятий, примыкающих к направлению действия  $\sigma_1$ . Вокруг провала получается последовательное чередование зон поднятий и оседаний. Такое строение картины изолиний является общим и сохраняется при любом соотношении между  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Играет роль только направление действия напряжений по отношению к осям эллипса. В случае, когда большая полуось окажется ближе к направлению действия  $\sigma_2$ , в зоне пересечения с эллипсом возникнут оседания, т. е. области оседаний и поднятий поменяются местами. При промежуточном положении осей эллипса по отношению к направления  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  зона оседаний будет примыкать к  $\sigma_2$ , а поднятий — к  $\sigma_1$ .

Абсолютные значения разности первоначальных напряжений определяют величину вертикальных сдвижений — оседаний и поднятий. В отличие от провала круглой формы вокруг эллиптического провала практически невероятен случай полного отсутствия вертикальных сдвижений по всей площади, хотя локальных участков с нулевыми сдвижениями при стремлении разности  $\sigma_1 - \sigma_2$  к нулю бывает много.

В картине траектории максимальных наклонов, как и при круглом провале, имеются источники траекторий, находящиеся у пересечения эллипса с направлением  $\sigma_1$ , и стоки траекторий, находящиеся у пересечений направления  $\sigma_2$  с эллипсом (рис. 6.22). Источники образуются в областях поднятий, а стоки — в областях оседаний. Все траектории выходят из источников и, описывая плавные кривые, заканчиваются в стоках. Картина траекторий симметрична относительно зоны обрушения. С радиальными направлениями, как и в случае круга, совпадают только траектории, идущие по направлениям действия  $\sigma_1$  (вытекающие) и  $\sigma_2$  (стекающие). Максимальные значения наклонов возникают на участках перехода между поднятиями и оседаниями земной поверхности.

Выводы, сделанные в разделе 6.1.2 относительно интерпретации результатов инструментальных наблюдений по принятой в настоящее время методике, правомерны и при зонах обрушения эллиптической формы.

#### Выводы

1. Закономерности формирования мульды сдвижения вокруг провалов круглой и эллиптической форм, сохраняя определенное подобие, имеют и существенные различия. При провале круглой формы закономерности распределения горизонтальных сдвижений и деформаций зависят только от соотношения главных напряжений в нетронутом массиве. При провале эллиптической формы на распределение горизонтальных сдвижений существенное влияние оказывают модуль эллиптичности и направление осей эллипса относительно направления главных напряжений в нетронутом массиве.

2. Однородное поле горизонтальных сдвижений вокруг провала круглой формы с направлением векторов сдвижения к центру провала формируется в изотропном первоначальном напряженном состоянии. При анизотропном первоначальном напряженном состоянии поле горизонтальных сдвижений приобретает более сложное строение: горизонтальные сдвижения отклоняются от радиальных направлений, и при соотношении  $\sigma_1/\sigma_2 \leq 1/3$  в мульде сдвижений от зоны обрушения в глубь массива.

3. Вокруг провалов эллиптической формы при изотропном первоначальном напряженном состоянии в зависимости от модуля эллиптичности поле горизонтальных сдвижений может иметь сложную структуру, включающую участки с радиальным направлением горизонтальных сдвижений в сторону зоны обрушения, с обратным направлением горизонтальных сдвижений в глубь массива и переходные зоны. В случае анизотропного первоначального напряженного состояния неоднородность строения поля горизонтальных сдвижений усиливается.

4. Исследования тензоров деформаций в точках различных участков мульды сдвижения показывает, что наряду с неоднородностью строения всей мульды сдвижения существует неоднородность деформаций в каждой отдельной точке, где по разным направлениям могут проявляться деформации противоположного знака.

5. По параметрам вертикальных сдвижений площадь мульды сдвижения делится четырьмя лучами, проходящими под углами 45° к направлениям действия первоначальных главных напряжений, на четыре зоны, в которых последовательно чередуются поднятия и оседания. Поднятия происходят в зонах, прилегающих к направле-

6. В картине траекторий максимальных наклонов наблюдаются два источника и два стока траекторий. Источники образуются в областях поднятий, а стоки в областях оседаний.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

## 7.1. Методологический подход к проверке теоретических положений

Теоретические положения и принятая геомеханическая модель для прогноза процесса сдвижения массива горных пород содержат ряд допущений, идеализирующих свойства среды, схематизирующих происходящие явления. В частности, реальный массив горных пород рассматривается в виде однородной изотропной упруго деформирующейся под нагрузкой среды, идеализируются формы зоны обрушения, объемная модель заменяется плоской расчетной схемой, вводятся интегральные характеристики полей первоначальных и вторичных напряжений.

Ответы на вопросы о влиянии схематизации явлений на точность и надежность прогнозируемых параметров и о практической пригодности теоретических решений в настоящее время могут быть получены не через логические оценки принятых положений, а из сравнения с практикой, по соответствию теоретических результатов и экспериментальных данных, по способности по-новому осветить происходящие явления, упорядочить разрозненные факты и использовать их для решения практических задач. Академик В. В. Ржевский считает экспериментальную проверку неотъемлемой частью создания теоретических решений: "...теоретическая петромеханика создает собственные методы расчета и устанавливает зависимости и закономерности, проверяя и уточняя их экспериментальным путем — на уменьшенных моделях в лабораториях либо в естественных условиях с целью получения приближенных решений, имеющих достаточную научную и инженерную строгость" [130].

Процесс сдвижения относится к сложным явлениям, которые на уменьшенных моделях воспроизводятся с большими погрешностями, снижающими надежность и достоверность полученной инфор-

мации для использования ее в качестве критерия истинности теоретических решений. Поэтому результаты инструментальных наблюдений при разработке месторождений с реальными массивами горных пород, обладающими естественными структурой, неоднородностями и деформационными характеристиками, с фактическими контурами зон обрушения и выработанных пространств, с действующими полями естественных напряжений являются в этом случае более надежным средством проверки пригодности теоретических расчетов для решения практических задач.

Практика исследования процесса сдвижения, как отмечалось выше, разнообразна по горно-геологическим условиям и продолжительна по времени. Инструментальные наблюдения, определяющие численные величины различных параметров процесса сдвижения, ведутся с середины прошлого века. На железорудных месторождениях Урала, разрабатываемых подземным способом, инструментальные наблюдения проводятся в течение 40 лет Уральским филиалом ВНИМИ и Институтом горного дела Уральского отделения РАН. Но, к сожалению, не все из них могут быть использованы для экспериментальной проверки теоретических положений из-за отсутствия данных о первоначальном напряженном состоянии массива горных пород, недостаточной продолжительности наблюдений, охватывающей незначительные изменения размеров зоны обрушения и некоторых других причин.

Благоприятные условия для промышленных проверок сложились на Северопесчанском железорудном месторождении. Инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород были начаты на нем в 1967 г. до начала очистных работ и выхода обрушения на земную поверхность и с небольшим перерывом в 1972—1973 гг. продолжаются в настоящее время. Проведение их в период образования зоны обрушения позволило определить интегральные параметры поля горизонтальных тектонических напряжений, необходимые для теоретических расчетов.

Положительное влияние на проведение промышленных проверок оказала анизотропия горизонтальных тектонических напряжений, обусловившая яркое и четкое проявление закономерных взаимосвязей сдвижений с напряжениями. Большое значение имел также объем инструментальных наблюдений, увеличение которого было вызвано выполаживанием углов сдвижения пород лежачего бока до 43° вместо прогнозируемых в проекте 60°.

В сопоставительном статистическом анализе рассматривались горизонтальные и вертикальные сдвижения реперов наблюдательной станции, получаемые теоретическими расчетами и непосредственными инструментальными наблюдениями в промышленных условиях. Профильные линии наблюдательной станции располагаются на земной поверхности и в подземных горных выработках на глубинах 160 и 300 м от поверхности.

Расчетные схемы отображают горизонтальные сечения на земной поверхности и на глубинах, соответствующих глубинам расположения подземных профильных линий. Деформационные характеристики среды модели на всех горизонтах приняты одинаковыми, равными  $E = 7 \cdot 10^3$  МПа,  $\mu = 0,3$ . Граничные условия за пределами зоны влияния горных работ представлены горизонтальными тектоническими напряжениями, действующими на месторождении. Для подземных наблюдательных станций к ним добавляются силы бокового распора, соответствующие этой глубине и, кроме того, на контуре зоны обрушения задается давление обрушенных пород.

Наблюдательная станция обеспечила измерения деформаций на значительной части мульды сдвижения на разных стадиях разработки месторождения. При образовании зоны обрушения в 1971 г. на поверхности было 4 профильные линии с 33 реперами, а в 1974— 1982 гг. на поверхности в эксплуатации было 6 профильных линий с 77 реперами и в подземных условиях 2 профильные линии с 38 реперами. В общей сложности статистическое сравнение теоретических и фактических горизонтальных и вертикальных сдвижений производилось почти по 150 реперам. Отдельно проводились эксперименты по определению взаимных перемещений стволов шахты и опорных реперов, закрепляющих их оси на поверхности.

Таким образом, проведенные промышленные эксперименты представлены значительным числом наблюдений, обеспечивающим получение надежных статистических характеристик, охватывающим широкий диапазон баз измерения и размеров модели, длительные промежутки времени, достигающие 15 лет, с многократными повторениями измерений (2 раза в год и более). Все эти обстоятельства в значительной мере снижают возможность проявления грубых просчетов в эксперименте, повышая его достоверность.

# 7.2. Теоретические и экспериментальные исследования отклонений визирных осей опорных реперов от осей стволов

Центры и оси стволов шахты Северопесчанской, как и других шахт, закреплены на местности системой опорных реперов. В направлении север — юг привязка осей подъемных стволов шахты осуществлена относительно визирной оси, проходящей через опорные реперы III и IV, расположенные к югу от стволов на максимальном удалении 280 м (рис. 7.1). Эта визирная ось — общая для



Рис. 7.1. Система опорных реперов центральных подъемных стволов: 1, 2 — западные визирные оси скипового и клетевого стволов; 3, 4 — расчетный и фактический контуры зоны обрушения; 5 — южная визирная ось стволов обоих стволов. В широтном направлении (запад — восток) привязка оси скипового ствола выполнена к визирной оси реперов XII и XI, а оси клетевого ствола — к визирной оси реперов XXIV и XXI, расположенных к западу от стволов с максимальным удалением 261 м.

Система опорных реперов предоставляет благоприятные возможности для проведения сопоставлений теоретических и экспериментальных отклонений визирных осей от осей стволов, поскольку их взаимное расположение достаточно вымерено и зафиксировано.

С развитием очистных работ, образованием и расширением зоны обрушения опорные реперы и стволы, как и все точки земной поверхности в мульде сдвижения, пришли в движение и изменили свое первоначальное положение. Горизонтальные сдвижения каждого репера и центров стволов (как материальной точки) неодинаковы и зависят от их расположения относительно зоны обрушения. Следовательно, первоначальная система привязки осей или центров стволов в процессе разработки месторождения нарушилась, причем величины нарушений или отклонений для западных и южной визирных осей различны. Описанный в разделе 4 математический аппарата позволяет рассчитать горизонтальные сдвижения опорных реперов, стволов и определить теоретические отклонения визирных осей от центров стволов.

Радиальные и тангенциальные составляющие, а также полная величина вектора горизонтальных сдвижений опорных реперов и стволов определяются по формулам (4.10)—(4.15).

Инструментальные измерения отклонений визирных осей производились в 1974 г. Расчетная схема для определения теоретических отклонений на этот период представлена на рис. 7.1. Горные работы производились на одном, центральном, участке, и зона обрушения на поверхности могла аппроксимироваться кругом с радиусом R = 256 м. Полярные координаты центров подъемных стволов и опорных реперов, их радиальные и тангенциальные сдвижения, а также смещения реперов относительно первоначальных положений визирных осей, определенные из элементарных геометрических построений как проекции радиальных и тангенциальных сдвижений на перпендикуляры к визирным осям, приведены в табл. 7.1 и показаны на рис. 7.2, 7.3, *а* и 7.4, *а* и *б*.

Взаимные отклонения стволов и южной визирной оси рассчитываются по схеме на рис. 7.3, *а* из подобия треугольников IV' AШ', IV' MN и IV' Pa.

$$x_{\kappa\pi} = \frac{A \Pi I' \cdot N'M}{I V' A} = 12,43 \,\mathrm{cm};$$

159

Таблица 7.1

Пункт	Полярные пу	е коордннаты икта	Радяальны альные сдви 1(	Смещення пунк- та относнтельно		
	Ө, град	Г, М	V <sub>r</sub>	V <sub>θ</sub>	- внэнрных осеи, 10 <sup>-2</sup> м	
Скиповой ствол	354	528	13,35	2,60	13.60	
Клетевой ствол	357,0	523,0	13,88	1,32	13.91	
Реперы:			[		,	
Ш	20,0	534,0	7,59	-7,91	9,28	
IV	24,0	546,0	4,75	-8,96	7,28	
XI	356,5	728,0	10,74	1,01	0.78	
XII	357,0	783,0	10,13	0,79	0,80	
XXI	358,5	686,4	11,41	0,47	1,023	
XXIV	359,5	791,0	10,14	0,13	1.018	

Таблица 7.2

Отклонения визирных осей от осей подъемных стволов

Ствол, визирная ось,	Отклонсния визи	Расхождения между	
опорные реперы, дата	теоретические	инструментальные	ниструментальными, см
	Клет	евой	
Южная, IV—III, 07.06.74 г	На запад 5,8	На запад 4,9 ± 0,5	0,9 ± 0,5
07.06.74 г	На север 0,2	На юг 0,1 ± 0,5	$0,3 \pm 0,5$
	Скип	овой	
Южная, IV—III,			J
07.06.74 г	На запад 7,5	На запад 5,9 ± 0,5	1,6 ± 0,5
07.06.74 г	На север 0,5	На север 1,7 ± 0,5	$-1,2 \pm 0,5$
15.09.74 г	На север 0,5	На север 0,4 ± 0,5	$0,1 \pm 0,5$



Рис. 7.2. Схема к расчету теоретических сдвижений опорных реперов и центральных подъемных стволов

$$\Delta_{\kappa\pi} = NK_{\pi}' = x_{\kappa\pi} - (K_{\pi}K_{\pi}' - K_{\pi}M) = 5.8 \text{ cm};$$

$$x_{c\kappa} = \frac{AIII' \cdot IV'P}{IV'A} = 13,83 \text{ cm};$$

$$\Delta_{c\kappa} = \Theta C_{\kappa} = x_{c\kappa}(C_{\kappa}C_{\kappa}' - C_{\kappa}P) = 7.5 \text{ cm}.$$

Таким образом, визирная ось, в соответствии с теоретическими расчетами, отклонилась в результате деформирования массива горных пород на запад от оси клетевого ствола на 5,8 см и от оси скипового ствола на 7,5 см.

Фактические отклонения южной визирной оси и центров стволов определялись 07.06.74 г. с помощью теодолита T = 10, устанав-





ливаемого на репере III (рис. 7. 3, *б*, *в*). Углы между визирной осью IV—III и отвесами на копрах, подвешенных на определенных расстояниях от осей стволов, указанных на схемах, измерялись тремя полными приемами. Фактические расстояния между отвесами и визирной осью (ВО) определялись по измеренным углам из формул

> $BO_{\kappa n} = \Pi IB_{\kappa n} \cdot \text{tg } 13'33'' = 82,9 \text{ см};$  $BO_{c\kappa} = \Pi IB_{c\kappa} \cdot \text{tg } 2'52'' = 19,8 \text{ см}.$



Рис. 7.4. Схема расчета отклонений западных визирных осей: *а* — теоретические и инструментальные отклонения клетевого ствола; *б* — теоретические и инстру ментальные отклонения скилового ствола 07.06.74 г. и 15.09.74 г.

Инструментально измеренные отклонения находятся как разность между конечными и первоначальными расстояниями от отвесов до визирной оси.

$$\Delta_{\kappa\pi} = 82.9 - 78.0 = 4.9$$
 cm;  
 $\Delta_{c\kappa} = 19.8 - 13.9 = 5.9$  cm.

При погрешности измерения угла ±5" максимальная ошибка в измерении отклонений составляет ≈ ±0,5 см.

163

Таким образом, по инструментальным измерениям, южная визирная ось отклонилась от оси клетевого ствола на запад на 4,9  $\pm$  0,5 см, а от оси скипового ствола на 5,9  $\pm$  0,5 см.

Аналогичные сравнительные эксперименты проведены по западным визирным осям 07.06.74 г. и 15.09.74 г. Схемы теоретических расчетов и инструментальных измерений приведены на рис. 7.4. Теоретическое отклонение визирной оси скипового ствола составило 0,5 см на север, а инструментально измеренные были также направлены на север и составляли, соответственно, 1,7 ± 0,5 и 0,4 ± ± 0,5 см. У клетевого ствола теоретическое отклонение визирной оси составило на север 0,2 см, а инструментальное на юг 0,1 ± 0,5 см. Результаты сопоставления теоретических и инструментальных данных о смещении визирных осей опорных реперов от осей стволов сведены в табл. 7.2.

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о высокой степени соответствия теоретической модели сдвижения горных пород реальной действительности. Причем, наиболее благоприятные условия для сопоставлений и проверок создаются у южной визирной оси, у которой проявляются значительные отклонения от первоначального положения, так как векторы горизонтальных сдвижений опорных реперов и стволов направлены поперек оси. У западных визирных осей векторы горизонтальных сдвижений направлены практически вдоль них, поэтому отклонения от первоначальных положений у них находятся в пределах погрешностей измерений.

#### 7.3. Определение теоретическим и инструментальным методами горизонтальных сдвижений земной поверхности при образовании зоны обрушения

В начальный период разработки Северопесчанского месторождения инструментальные наблюдения за деформациями земной поверхности проводились по двум профильным линиям, оборудованным Уральским филиалом ВНИМИ до начала очистных работ и направленным по простиранию и вкрест простирания центрального рудного тела. В 1971 г., после выхода обрушения на земную поверхность, каждая профильная линия разделилась на две самостоятельные ветви (рис. 7.5). Горизонтальные сдвижения реперов профильных линий I, II и III, вызванные образованием провала, использовались ранее для определения параметров первоначального поля напряжений [138, 139].

Сопоставление теоретических и инструментальных горизонтальных сдвижений и деформаций проводилось по всем профильным линиям. Схема расчета теоретических сдвижений показана на





рис. 7.5. Зона обрушения в этот период аппроксимировалась кругом с радиусом R = 105 м. Рассчитанные радиальные и тангенциальные горизонтальные сдвижения реперов, а также их сдвижения вдоль профильных линий, представляющие проекцию радиальных и тангенциальных сдвижений на профильную линию, приведены в табл. 7.3. Горизонтальные сдвижения вдоль профильной линии, полученные инструментальными измерениями, в отличие от теорети-

Таблица 7.3

Профильна линия, опорный	ая № репера	Теорети	ческие полные реперов, 10-2	сдвижения м	Сдвижения р фильной л тельно опо	еперов по про- инии относи- рного, 10-2 м
penep		раднальные <i>V</i> ,	тангенциаль- ные V <sub>в</sub>	по профиль- ной линии	теоретичес- кие ξ <sub>т</sub>	измеренные инструмен- тально Е.
I, 6	1 2	-8,69 -5,27	-12,20 -9,03	0,39 0,24	2,46	3,40
	3 4 5 6	-2,62 -1,40 0,22 1,14	6,87 5,52 4,26 3 39	-0,53 -0,76 -1,59	1,54 1,21 0,48	1,10 0,80 0,30
II, 8	1 2 3 4 5 6	-3,02 -7,02 -11,30 -13,03 -13,70 -13,90	14,30 13,40 10,20 7,82 6,40 5,04	-14,30 15,00 15,10 15,04 14,80 14,50	0,00 1,00 1,80 1,90 1,84 1,60 1,30	0,00 0,90 1,80 1,70 1,20 1,10 0,70
III, 8	8	-13,70 -33,30 -2,76	3,92 3,02	13,80 13,00	0,60 0,00	0,30 0,00
	2 3 4 5 6 7 8	1,57 3,70 4,93 5,11 4,76 4,90 4,59	8,47 5,12 2,96 2,06 1,95 1,12 0,88	-6,83 -5,84 -6,59 -5,68 -5,50 -5,12 -5,01 -4,66	$\begin{array}{c} -2,17\\ -1,18\\ -0,93\\ -1,02\\ -0,84\\ -0,46\\ -0,35\\ 0,00\\ \end{array}$	-0,60 -1,30 -1,10 -1,20 -0,60 -0,20 -0,40 0,00
IV, 11	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	-4,20 -8,55 -10,90 -12,00 -12,30 -12,20 -11,80 -11,30 -10,80 -10,30 -9,90	-10,60 -9,06 -7,04 -5,59 -4,42 -3,46 -2,73 -2,25 -1,79 -1,49 -1,30	11,20 12,40 12,80 12,90 12,70 12,30 11,82 11,20 10,77 10,20 9,73	1,47 2,67 3,07 3,17 2,97 2,57 2,09 1,47 0,94 0,47 0,00	2,60 4,80 3,40 3,40 1,80 1,30 1,00 0,70 1,00 0,00

Горизонтальные сдвижения реперов новерхностной наблюдательной станции на Северопесчанском месторождении в 1971 г.

ческих, представляют собой сдвижения относительно опорного репера, наиболее удаленного от зоны обрушения. Поэтому теоретические сдвижения для сопоставимости с инструментальными приведены к горизонтальным сдвижениям относительно тех же опорных реперов. Идентичные по содержанию теоретические и инструментальные сдвижения приведены в колонках 6 и 7 и графически показаны на рис. 7.5. Из рисунка и таблицы следует, что теоретические сдвижения хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений. Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями составляет 0,897 [96]. В соответствии с критерием Фишера, приемлемым для имеющегося числа измерений, доверительный интервал коэффициента корреляции с вероятностью 0,997 (t = 3) составляет ±0,237, что свидетельствует о наличии надежной линейной корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями [96, 140]. Коэффициент регрессии инструментальных горизонтальных сдвижений на теоретические составляет 0,962, т. е. угол наклона прямой, выражающей корреляционную связь, равен 44°.

В описанном выше сопоставительном эксперименте сравниваются горизонтальные сдвижения относительно опорного репера, измеряемые инструментально на разных базах. Сдвижения репера, соседнего с опорным, измеряются на базе 20-25 м, второго - на базе 40-50 м и так далее, увеличиваясь до 100-200-300 м. Полученный коэффициент корреляции характеризует всю совокупность баз. При минимальной базе измерения, имевшей место в эксперименте, равной длине интервала 20-25 м, коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными данными уменьшается до 0,55 и надежность линейной корреляционной связи обеспечивается лишь с вероятностью 0,683 (t = 1).

Таким образом, с уменьшением базы инструментальных измерений надежность корреляционной связи между теоретическими и инструментальными данными заметно снижается. Для смешанных данных, в которых базы 20-25 м составляли 12 %, вероятность соблюдения корреляционной связи не ниже 0,997, а при средней длине интервала 23,7 м вероятность снижается до 0,683. Эти отличия обусловлены структурными неоднородностями массива горных пород и дискретностью проявления процесса сдвижения на малых базах [141—145].

Из результатов экспериментальной проверки можно сделать вывод, что между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями существует тесная и надежная корреляционная связь (r = 0.90 при вероятности 0.997). Снижение надежности корреляционной связи при уменьшении базы инструментальных измерений закономерно и требует изучения возможных отклонений ожидаемых сдвижений от теоретических за счет дискретности проявления процесса сдвижения по структурным нарушениям реального массива горных пород.

# 7.4. Сопоставительные эксперименты по определению горизонтальных и вертикальных сдвижений земной поверхности при расширении зоны обрушения

Промышленные эксперименты по проверке основных теоретических и модельных предположений продолжаются на Северопесчанском месторождении с 1974 г. до настоящего времени. В 1974 г. в связи с аномальным развитием процесса сдвижения в породах лежачего бока, описанном в разделе 8, на земной поверхности месторождения была оборудована капитальная наблюдательная станция, включавшая более ста реперов четырех профильных линий лежачего и двух линий висячего боков.

Схематически модель промышленного эксперимента представлена на рис. 7.6. Сложность и особенность его, в отличие от предыдущего, состоит в том, что к моменту оборудования наблюдательной станции на месторождении образовалась значительная по своим размерам зона обрушения и исследуемая территория претерпела все виды вертикальных и горизонтальных сдвижений. В дальнейшей, с расширением размеров и изменением формы зоны обрушения, на наблюдательной станции регистрировали лишь изменения сдвижений. Они, как правило, меньше абсолютных сдвижений, поэтому для повышения надежности экспериментальных проверок требовалось увеличение сроков их проведения, обеспечивающих учет достаточных изменений размеров зоны обрушения и приращения сдвижений.

Наряду с экспериментальными трудностями, сопоставление изменений горизонтальных и вертикальных сдвижений, вместо абсолютных их значений, вносит дополнительные погрешности, обусловленные использованием двух моделей — на начальный и конечный период эксперимента. Суммарная ошибка от использования двух моделей составит, как известно,

$$\delta=\sqrt{\delta_1^2+\delta_2^2}$$
 ,

где  $\delta_1, \delta_2$  — ошибки, обусловленные допусками, соответственно, начальной и конечной моделей.



Рис. 7.6. Геомеханическая модель промышленного эксперимента на Северопесчанском месторождении: I — зона обрушения в 1982 г.; 2 — зона обрушения в 1974 г.; 3 — подземные профильные линии на гор. 40 м и -80 м; 6, 12, 15, 16 — поверхностные профильные линии

Граница зоны обрушения в 1974 г. наиболее близко аппроксимировалась эллипсом, вытянутым вкрест простирания, с параметрами: a = 330 м, b = 240 м, R = 285 м, m = 0.158,  $\alpha = 0^{\circ}$  (рис. 7.7). В 1982 г., после разработки барьерного целика, зона обрушения вытянулась по простиранию месторождения и ее границы аппроксимировались эллипсом с параметрами: a = 400 м, b = 320 м, R = 360 м, m = 0,111,  $\alpha = 90^{\circ}$  (рис. 7.7).

Теоретические горизонтальные сдвижения реперов вдоль профильных линий за период между 1974 и 1982 годами и измеренные непосредственно приведены в Приложении 2. При качественном

169



Рис. 7.7. Расчетные схемы промышленного эксперимента на земной поверхности Северопесчанского месторождения: I — расчетная и фактическая границы зоны обрушения в 1974 г.; 2 — то же в 1982 г.; 3 — инструмен-тальные и расчетные горизонтальные сдвижения по профильным линиям

сравнении обращают на себя внимание противоположные знаки теоретических и инструментальных сдвижений на профильной линии б (см. рис. 7.6 и Приложение 2), которые как грубое отклонение из статистической обработки исключены. Причины грубого отклонения пока не известны.

Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями [96] составляет 0,849. При имеющемся числе наблюдений (n = 77) среднее квадратическое отклонение коэффициента корреляции может быть найдено из выражения [146]

$$\sigma(r) \approx \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}} = 0.0318$$

Следовательно, между теоретическими и инструментальными сдвижениями существует надежная линейная корреляционная связь, так как

 $|r| = 0.849 >> 3\sigma(r) = 0.0954.$ 

Коэффициент регрессии инструментальных горизонтальных сдвижений на теоретические составляет рЕ"/Ет = 1,387, т. е. угол наклона прямой, выражающей корреляционную связь, равен 54°.

Как и в предыдущем эксперименте, здесь также коэффициент корреляции между фактическими и теоретическими деформациями и сдвижениями на малых базах измерения, соответствующих одному интервалу профильных линий, уменьшается до 0,34 при среднем квадратическом отклонении 0,106. Поскольку  $3\sigma(r) = 0,318 < |r| =$ = 0,340, то корреляционную связь можно считать установленной и при базах в один интервал, однако ее достоверность и надежность значительно ниже, чем при смешанных базах.

Теоретические вертикальные сдвижения земной поверхности представляют собой абсолютные вертикальные смещения, поэтому для сопоставимости их с инструментальными сдвижениями, измеряемыми нивелировкой относительно опорных реперов, они пересчитаны относительно тех же опорных реперов. Абсолютные вертикальные теоретические сдвижения на начало (1974 г.) и конец (1982 г.) эксперимента, а также теоретические и инструментальные вертикальные сдвижения относительно опорного репера за период эксперимента приведены в Приложении 3. Как и у горизонтальных сдвижений, вертикальные теоретические и инструментальные сдвижения на профильной линии 6 имеют противоположные знаки, поэтому из последующей статистической обработки они также исключены как грубые отклонения. Причины их проявления, видимо, могут быть установлены при продолжении эксперимента после углубления горных работ и расширения зоны обрушения. Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными вертикальными сдвижениями значительно ниже, чем у горизонтальных, и составляет для смешанных баз r = 0,297. При отклонении коэффициента корреляции  $\sigma(r) \approx 0,109$  корреляционная связь довольно ненадежная. Однако, как следует из обобщающего анализа сопоставления инструментальных и теоретических вертикальных и горизонтальных сдвижений, корреляционная связь между ними зависит от базы сопоставления. Низкие коэффициенты корреляции на малых базах в большей мере обусловлены свойствами дискретно деформирующейся среды, чем влиянием принятой схематизации происходящих явлений.

#### 7.5. Теоретические и экспериментальные исследования горизонтальных сдвижений в подземных условиях

Кроме поверхностных наблюдательных станций, для экспериментальной проверки теоретических положений по расчету сдвижений использованы профильные линии, находящиеся в подземных горных выработках. Подземные наблюдательные станции оборудованы в 1974 г. на горизонте 40 м в специальной выработке, пройденной из клетевого ствола к зоне обрушения для изучения деформаций промежуточной толщи пород (рис. 7.6 и 7.8), а на горизонте -80 м в главном квершлаге (рис. 7.9). К моменту оборудования наблюдательных станций над очистными работами существовала зона обрушения диаметром около 400 м, и массив горных пород был соответствующим образом деформирован. Используемые в расчетах результаты инструментальных наблюдений за период в 9 лет представляли приращения сдвижений. В соответствии с этим, теоретические горизонтальные сдвижения за этот же период определялись в виде разности горизонтальных сдвижений конечной (1982 г.) и начальной (1974 г.) расчетных схем.

Граничные условия в расчетных схемах задавались с учетом бокового распора и давления обрушенных пород, действующих на глубинах расположения наблюдательных станций 160 м и 300 м, соответственно,  $\sigma_1 = -3,5$  МПа,  $\sigma_2 = -11,6$  МПа,  $\sigma_{oo} = 1,4$  МПа и  $\sigma_1 =$ = -4,9 МПа,  $\sigma_2$  = -13,0 МПа,  $\sigma_{00}$  = 2,4 МПа. Все остальные параметры, характеризующие свойства массива горных пород, принимались аналогичными параметрам предыдущих схем по этому месторождению.

Граница зоны обрушения на гор. 40 м в 1974 г. аппроксимировалась эллипсом, вытянутым вкрест простирания, с параметрами: a =200 м, b = 170 м, R = 185 м, m = 0.081,  $\alpha = 10^{\circ}$  (см. рис. 7.8). Криволинейные координаты реперов наблюдательной станции и горизонтальные сдвижения U и V по осям x и y, а также сдвижения по профильной линии приведены в Приложении 4.

В 1982 г., после разработки барьерного целика, зона обрушения превратилась в эллипс, вытянутый по простиранию, с параметрами: a = 400 м, b = 170 м, R = 285 м, m = 0,404, α = 96° (см. рис. 7.8). Криволинейные координаты реперов и горизонтальные сдвижения по направлениям, аналогичным первой схеме, приведены в Приложении 5.

Теоретические горизонтальные сдвижения реперов относительно опорного и инструментальные, соответствующие маю и октябрю 1982 г., приведены в Приложении 6. Инструментальные данные по двум сериям наблюдений, приведенные в Приложении 6, хотя и



Рис. 7.8. Расчетные схемы промышленного эксперимента на гор. 40 м Северопесчанского месторождения: I — расчетная и фактическая границы зоны обрушения в 1974 г.; 2 — то же в 1982 г.; 3 — инструментальные и расчетные горизонтальные едвижения по профильной линии; 4 — отрабо-

танная площадь





незначительно, но отличаются друг от друга. Подобные колебания встречаются в практике инструментальных наблюдений на ряде месторождений и, очевидно, связаны с нестабильностью напряженного состояния.

Статистическое сравнение теоретических сдвижений проводилось со средними значениями горизонтальных сдвижений майской и октябрьской серий инструментальных наблюдений. Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями составил 0,98.

При имеющемся числе измерений (n = 20) для оценки надежности коэффициента корреляции целесообразно использовать критерий Фишера [96, 140]

$$z = \frac{1}{2} \{ \ln(1+|r|) - \ln(1-|r|) \} = 2,41.$$

Среднее квадратическое отклонение величины z равно

 $\sigma(z) = \frac{1}{\sqrt{n-3}} = 0, 24.$ 

Selection in AREC CRIMERCIAL DECISION, ICE RATION IS

С вероятностью 0,997 (t = 3) величина z может принять значения 1,69  $\leq z \leq 3,13$ , которым соответствуют табличные значения 0,935  $\leq z \leq 0,996$ . Доверительный интервал коэффициента корреляции, равный 0,996 – 0,935 = 0,061, значительно меньше коэффициента корреляции (0,98), поэтому наличие линейной корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями можно считать надежно установленным.

Коэффициент регрессии инструментальных горизонтальных сдвижений на теоретические составляет  $\rho_{\xi_{M}/\xi_{T}} = 0,854$ , т. е. угол наклона прямой, выражающей корреляционную связь, равен 41°.

Как и в предыдущем случае, на базе одного интервала коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными деформациями интервалов значительно ниже и равен 0,37.

Методическая особенность экспериментальной проверки на гор. –80 м состояла в том, что в 1974 г. наблюдательная станция оборудовалась близко к торцу выработанного пространства: радиус зоны обрушения на уровне горизонта –80 м в начале эксперимента составлял R = 140 м, а расстояние до торца зоны обрушения не превышало 65 м. При таких соотношениях, когда расстояние от торца зоны обрушения вдвое меньше ее радиуса, весьма вероятно проявление влияния торцевой части зоны обрушения. На завершающей стадии эксперимента в 1982 г. горные работы опустились на

гор. –240 м и наблюдательная станция отстояла от торца зоны обрушения более чем на 150 м, что отвечало требованиям, определяющим геомеханическую модель.

Таким образом, условия эксперимента были заведомо недостаточно корректны. Однако результаты его представляли интерес как качественный, с точки зрения подтверждения закономерных взаимосвязей, так и количественный, позволяющий оценить уровень отклонений за счет несоблюдения требований к расчетной модели.

Граница зоны обрушения в 1974 г. аппроксимировалась кругом с радиусом R = 140 м (см. рис. 7.9). Полярные координаты реперов наблюдательной станции, их радиальные и тангенциальные сдвижения ( $V_r$ ,  $V_{\theta}$ ) и сдвижения по профильной линии приведены в Приложении 7. В 1982 г., после разработки барьерного целика, граница зоны обрушения аппроксимировалась эллипсом, вытянутым по простиранию, с параметрами: a = 390 м, b = 160 м, R = 275 м, m == 0,418,  $\alpha = 97^{\circ}$  (см. рис. 7.9). Криволинейные координаты реперов, горизонтальные сдвижения реперов, их направления и сдвижения по профильной линии приведены в Приложении 8. Теоретические и инструментальные горизонтальные сдвижения реперов за период проведения эксперимента с 1974 г. по 1982 г. приведены в Приложении 9.

Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями равен 0,967. Критерий Фишера равен 2,04, а его среднее квадратическое отклонение  $\sigma(z) =$ = 0,25 [96, 140]. С вероятностью 0,997 (t = 3) величина z может принять значения 1,29  $\leq z \leq 2,79$ , которым соответствуют табличные значения 0,859  $\leq r \leq 0,993$ . Доверительный интервал коэффициента корреляции, равный 0,993 – 0,859 = 0,134, значительно меньше абсолютного значения самого коэффициента корреляции (0,967), поэтому наличие линейной корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными сдвижениями можно считать надежно установленной.

Коэффициент регрессии инструментальных горизонтальных сдвижений на теоретические составляет  $\rho_{\xi_{H}/\xi_{T}} = 1,33$ , т. е. угол наклона прямой, выражающей корреляционную связь, равен 53°.

Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными деформациями интервалов профильных линий при их средней длине 20,4 м равен r = 0,43.

Таким образом, результаты экспериментальной проверки по гор. –80 м аналогичны результатам эксперимента на гор. 40 м, несмотря на некоторые отличия в условиях их проведения. На базах более одного интервала теоретические и инструментальные результаты имеют высокий и надежный коэффициент корреляции. На базах, равных интервалу, корреляционная связь заметно ослабляется.

#### 7.6. Обобщенная оценка промышленных экспериментов

В промышленных экспериментах по сопоставлению теоретических и фактических горизонтальных и вертикальных сдвижений теснота корреляционной связи при различных размерах участков неодинакова. На смешанных базах, когда сравнивались сдвижения реперов относительно опорного репера, коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными сдвижениями достигал 0,85—0,98. При сравнении теоретических и инструментальных деформаций интервалов, средние линии которых находились в пределах 17,8—27,8 м, коэффициенты корреляции составляли 0,28— 0,55. Изменения коэффициента корреляции между теоретическими и инструментальными горизонтальными и вертикальными сдвижениями в зависимости от базы измерения представлены в табл. 7.4, 7.5 и на рис. 7.10 [141, 142].

При исследовании горизонтальных сдвижений база сравнений изменяется от 24,4 до 325 м. Коэффициент корреляции между теоретическими и инструментальными данными по мере увеличения базы измерения растет от 0,42 при базе 24,4 м, до 0,93 при базе 324, 5 м, асимптотически стремясь к единице. Закономерность роста в целом достаточно выдержанная. Однако при детальном рассмотрении в ней обнаруживаются неоднородные участки в интервалах до 48 м, до 95 м и до 117 м, относительно которых пока можно лишь предположить, что они связаны с уровнями структурных нарушений, находящихся в пределах сравниваемых объемов. Пологие участки, по-видимому, связаны с нахождением интервалов внутри определенного уровня структурных нарушений, а крутые — с выходом за их пределы. Но подтверждение этого предложения, представляющего особый интерес для формирования основных понятий геомеханики, требует специальных исследований.

В исследуемом диапазоне размеров участков массива горных пород наблюдается четкая тенденция — с увеличением размеров участка поведение массива горных пород приближается к поведению упругой изотропной среды, и корреляционная связь между теоретическими и инструментальными сдвижениями и деформациями становится все теснее, стремясь к единице, И, наоборот, с уменьшением базы все ярче проявляется дискретный характер процесса сдвижения и все слабее корреляционная связь между теоретическими и инструментальными данными. При минимальной базе, ис-

Таблица 7.4

Изменение коэффициента корреляции и отклопений между теоретическими и ипструментальными	
горизоптальными савижениями при различных базах измерения	

База измс-	Число из-	Коэффи- циснит сло из-	Среднее квадратиче-	Среднее	Среднее квадратиче- ское откло-	Абсолютное отклонение	Относительнос	Отклонения, отнесенные к базе измерения, $\delta_{\text{отн}} = \frac{\delta_{a}}{l}$		
рения <i>Ī</i> , м	мерений п	корреля- ции г	скос откло- нснис σ(r)	I∆/I, 10 <sup>-2</sup> м	ское откло- нение σ(g), 10 <sup>-2</sup> м	$\delta_a = \sigma(g) \sqrt{1 - r^2}$ , $10^{-2} \text{ M}$	$\times 100 \ 10^{-2} \ \mathrm{M}$	мм/м (10-3)	% от крити- ческой де- формации	
24,4	137	0,42	0,07	0,55	0,94	0,85	154,5	0,348	17,4	
48,1	125	0,60	0,06	0,99	1,37	1,10	111,1	0,289	11,4	
71,5	113	0,64	0,06	1,44	1,79	1,38	95,8	0,193	9,6	
94,6	101	0,65	0,06	1,88	2,20	I,67	88,8	0,177	8,8	
117,1	89	0,72	0,05	2,33	2,43	1,69	72,5	0,144	7,2	
138,7	78	0,74	0,05	2,78	2,72	1,83	65,8	0,132	6,6	
160,1	67	0,74	0,06	3,27	2,98	2,00	61,2	0,125	6,2	
ι78,4	59	0,75	0,06	3,60	3,07	2,03	56,4	0,114	5,7	
196,8	53	0,78	0,05	3,94	3,21	2,01	51,0	0,102	5,1	
214,9	46	0,80	0,05	4,33	3,39	2,03	46,9	0,094	4,7	
237,6	38	0,83	0,05	4,86	3,40	1,90	39,1	0,080	4,0	
256,5	34	0,86	0,04	5,18	3,36	1,71	33,0	0,067	3,3	
274,9	28	0,88	0,04	5,66	3,21	1,52	26,9	0,055	2,7	
304,1	24	0,90	0,04	6,04	3,17	1,38	22,8	0,045	2,2	
324,5	20	0,93	0,03	6,35	2,80	1,03	16,2	0,032	1,6	
							1 8 300			

#### Таблица 7.5

### Изменение коэффициента корреляции н отклонений между теоретическими и инструментальными вертикальными сдвижениями при различных базах измерения

База изме-	11		Coellace		Среднее квадратиче-	Абсолютнос отклонение	Относительнос	Отклонения, отнесенные к базе измерения, $\delta_{\text{отн}} = \frac{\delta_i}{l}$		
База изме- рения <i>Î</i> , м	Число из- мерений п	Коэффи- циснт корреля- цим г	квадратиче- ское откло- нение $\sigma(r)$	сдвижение ІДІІ, 10 <sup>-2</sup> м	квадратиче- ское откло- нение $\sigma(g)$ , $10^{-2}$ м	$\delta_{\rm a} = \sigma(g) \sqrt{1 - r^2} ,$ $10^{-2}  {\rm M}$	отклонение $\delta_0 = \frac{\sigma_s}{1\Delta T} \times 100 \ 10^{-2} \text{ м}$	$\frac{1000}{100} = \frac{\delta_{a}}{100} + \frac{\delta_{a}}{100}$	% от крити- ческой де- формации	
	66	0.22	0.12	0.28	1,65	1,61	574,8	0,07	1,6	
24,4	00	0,22	0.12	0.48	1.96	1,88	391,2	0,04	1,0	
48,1	60	0,28	0,12	0,10	2.28	2,17	387,1	0,03	0,8	
71,5	54	0,31	0,12	0,50	2,20	1.30	188,7	0,01	0,3	
94,6	51	0,62	0,09	0,09	2,10	1.03	177.4	0,02	0,4	
117,1	47	0,40	0,12	1,09	2,11	1,95	1114	0.01	0,3	
138,7	42	0,39	0,13	1,43	1,73	1,39	00.7	0.01	02	
160,1	37	0,54	0,12	1,62	1,90	1,60	98,7	0,01	0,2	
178.4	32	0,65	0,10	1,78	2,28	1,73	97,3	0,01	0,2	
106.8	28	0.70	0,11	1,72	2,69	1,37	79,8	0,01	0,2	
190,0	24	0.76	0.12	1.75	2,75	1,16	66,4	0,01	0,1	
214,9 237,6	24	0,73	0,12	1,54	2,60	1,21	78,9	0,01	0,1	



Рис. 7.10. Обобщенные взаимосвязи теоретических и измеренных горизонтальных и вертикальных сдвижений:

I и I' — коэффициенты корреляции г между теоретическими и измеренными горизонтальными и вертикальными сдвижениями; 2 и 2' — относительные отклонения  $\delta_{\text{отв}}$  измеренных горизонтальных и вертикальных сдвижений от теоретических з и 3' — относительные отклонения измеренных горизонтальных и тальных и вертикальных сдвижений от теоретических в  $\mathscr{G}$  от критических з начений деформаций  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$  и  $i = 4 \cdot 10^{-3}$ 

пользовавшейся в экспериментах, коэффициент корреляции составляет 0,42. В соответствии с полученными закономерностями, при дальнейшем уменьшении базы измерения корреляционная связь должна быть еще слабее.

В экспериментах с вертикальными сдвижениями база сравнения изменялась от 24,4 м до 237,6 м. Коэффициент корреляции

между теоретическими и инструментальными данными по мере увеличения базы, как и горизонтальных сдвижений, растет от 0,22 до 0,73, также асимптотически стремясь к единице (см. рис. 7.10). Закономерность роста коэффициента корреляции у вертикальных сдвижений и деформаций подобна закономерности у горизонтальных сдвижений, но кривая начинается с меньших значений и к размеру базы 225—250 м отличия между коэффициентами корреляции у вертикальных и горизонтальных сдвижений составляют 0,05—0,10.

Неоднородности роста коэффициента корреляции у вертикальных сдвижений более контрастны, но данных для определения их взаимосвязи со структурными нарушениями пока недостаточно. Пока доказано только закономерное увеличение коэффициента корреляции с увеличением базы сравнения, свидетельствующие о приближении свойств реального массива к свойствам упругой однородной изотропной среды.

Имеющиеся экспериментальные и теоретические данные о горизонтальных и вертикальных сдвижениях по наблюдательной станции, а также полученная корреляционная связь между ними позволяют оценить вероятные границы колебания фактических сдвижений и деформаций от теоретических. В таблицах 7.4, 7.5 и на рис. 7.10 приведены статистические характеристики отклонений фактических горизонтальных сдвижений от расчетных. Для теоретических положений особый интерес представляют абсолютные и относительные отклонения фактических горизонтальных и вертикальных сдвижений. Относительные отклонения в рассматриваемом диапазоне баз при одинарном среднем квадратическом отклонении изменяются у горизонтальных сдвижений от 16,2 % при  $\overline{l}$  = 324,5 м до 154,5 % при  $\overline{l}$  = 24,4 м, у вертикальных сдвижений от 78,9 % при  $\overline{l}$  = 237,6 м, до 574,8 % при  $\overline{l}$  = 24,4 м.

Для практических целей охраны сооружений важно оценить полученные отклонения в виде относительной деформации (мм/м или  $10^{-3}$ ) и в процентах от критических деформаций для объектов первой категории охраны (2 мм/м — горизонтальные деформации, 4 мм/м — наклон). При максимальных базах отклонения горизонтальных деформаций составляют 0,032 мм/м, или 1,6 % от критического значения. На минимальных базах эти же параметры составляют 0,348 мм/м, или 17,4 %. При  $3\sigma(g)$  максимально возможные отклонения с вероятностью 0,997 не превысят 1,05 мм/м, или 52,2 % от критической деформации.

У вертикальных деформаций при максимальной базе 237,6 м отклонения составляют 0,01 мм/м, или 0,13 % от критического наклона, а на минимальной базе 24,4 м отклонения достигают 0,07 мм/м, или 1,65 % от критического. При тройном среднем квадратическом отклонении  $3\sigma(g)$  или с вероятностью 0,997 максимальные отклонения наклона не превысят 0,21 мм/м, или 5 % от критической вертикальной деформации.

Таким образом, в рассмотренных условиях дискретного деформирования реального массива горных пород прогнозирование на основе принятых теоретических и модельных предложений имеет высокую степень достоверности, удовлетворяющую требованиям безопасности для объектов любой категории охраны.

#### Выводы

1. Результаты экспериментальной проверки теоретических положений в промышленных условиях, включавшие сравнительные теоретические и инструментальные определения сдвижений единичных сооружений, массовые определения сдвижений и деформаций реперов и интервалов поверхностных и подземных профильных линий специальной наблюдательной станции за короткие отрезки времени и периоды, достигающие 10—15 лет, показали, что принятые при разработке геомеханических моделей и методов расчета теоретические положения обеспечивают высокий уровень соответствия расчетных и инструментальных данных.

2. Коэффициенты корреляции инструментально измеренных горизонтальных и вертикальных сдвижений с теоретическими, полученными с применением разработанных моделей и методов, составляют в различных экспериментах от 0,85—0,90 по поверхностным профильным линиям, до 0,97—0,98 по подземным. Разница между инструментально измеренными и теоретически рассчитанными смещениями осей подземных стволов шахты не превышала ошибки инструментальных измерений.

3. Коэффициенты корреляции между теоретическими и инструментально измеренными деформациями интервалов зависят от размеров интервалов. С изменением размеров интервалов от 24 м до 325 м коэффициент корреляции изменяется от 0,30 до 0,93, что обусловлено дискретным характером деформирования скального массива.

4. В сравнении с критическими деформациями для объектов первой категории охраны (растяжение — сжатие 2.10<sup>-3</sup> и наклон 4.10<sup>-3</sup>) величины расхождений между инструментальными и теоретическими деформациями в проведенных экспериментах составили:

для горизонтальных деформаций 17,4 % при малых базах (24,4 м) и 1,6 % при максимальных базах (325 м); для наклонов 1,6 % при малых базах (24,4 м) и 0,13 % при максимальных (237 м).

лых базах (24,4 м) и 0,15 % при максимальных (26 ми). 5. Дискретность проявления процесса сдвижения, снижающая тесноту корреляционных связей между теоретическими и инстру-

тесноту корреляционных связей между теороти сороти корреляционных связей между теороти основе истальными данными, требует введения вероятностного подхода к определению ожидаемого уровня деформаций на основе установленных закономерностей корреляционных связей в зависимости от размера рассматриваемого участка и с учетом ответственности решаемой задачи.

8.1. Rostnonpossing mounts a company

и отрана сооружений или раз об отк

Северонссанского мастория имал

a support of assist - paragregue and and it

проста, на странски странски слади стари слади проста, на странски слади странски слад и стратации, на странски избража, услади стра развательных състон – кругок и избража, услад ок. пр 100% изготано 140% и прости, анист с тех код и разк 10–30% и прости, анист с преждани бох щаж. С базга (410–430 с.) и странски странски сладу и прости, анист с продукт, аспрост странски странски и странски странски странски и важлесь бох усладу с усладу слад в висятеля болу усладу с усладу с 10 с. В висятеля болу усладу с усладу с с с 50 с.

#### 8 РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАЛА

#### 8.1. Прогнозирование процесса сдвижения и охрана сооружений при разработке Северопесчанского месторождения

#### 8.1.1. Горно-геологическое строение и геомеханические условия месторождения

Северопесчанская залежь магнетитов представляет собой слепое рудное тело сложной формы с максимальными размерами по простиранию 1500 м и по падению 600 м. По условиям залегания в нем выделяются пологопадающие и крутопадающие участки. Центральная часть — крутопадающая, залегает с глубины 250 м между разведочными линиями 7-16 (рис. 8.1). Залежь имеет мощность около 100 м, на отдельных участках — 150—200 м, падение на восток под углом 70-80° и простирание, близкое к меридиональному. Лежачий бок ниже глубины 410-490 м сложен известняками, выше — порфиритами и их туфами. В верхней части непосредственно к рудному телу в виде оторочки примыкают трещиноватые гранатовые и пироксено-гранатовые скарны, которые в пластообразной форме распространяются от рудного тела до поверхности (рис. 8.2). В висячем боку ниже глубины 410—450 м залегают однородные диориты. Выше диориты рассекаются дайками диабазовых порфиритов, прослойками гранатовых и пироксено-гранатовых скарнов.

Южнее разведочной линии 7 и севернее разведочной линии 16 рудное тело выполаживается и представляет собой пологую залежь сравнительно небольшой мощности — в пределах 20—30 м.

Прочностные свойства руд и вмещающих пород определялись на образцах по принятым методикам в лабораторных условиях. Средние величины упругих и прочностных характеристик основных пород месторождения приведены в табл. 8.1 [147, 148].





Рис. 8.2. Поперечный разрез центрального участка Северопесчанского месторождения (условные обозначения на рис. 8.3)

Модуль упругости массива горных пород, необходимый для расчетов сдвижений и деформаций, определялся по методике института Гидропроект по коэффициенту крепости пород, полученному при испытании образцов [108]. Для центрального участка Северопесчанского месторождения, в соответствии с табл. 8.1, средневзвешенный коэффициент крепости пород с учетом удельной площади, занимаемой каждой разновидностью пород в плане, равен f = 9+10. Модуль упругости массива пород, имеющих крепость 9—10, составляет  $E = 0,7 \cdot 10^4$  МПа.

Позднее, в 1985 г. значение модуля упругости массива горных пород было подтверждено новым экспериментальным методом [149]. Способ натурного определения модуля упругости массива на Таблица 8.1

Упругие и прочностные характеристики руд и пород Северопесчанского месторождения

		При сжати	и	При растяжении			
Наименование горных пород	<i>E</i> ·10 <sup>-5</sup> , МПа	μ	[σ], МПа	<i>E</i> ∙10 <sup>-5</sup> , МПа	μ	σ], МПа	
Порфирит	1,12	0,27	122	_	_	_	
Туф порфирита	0,97	0,30	100	0,89	0,26	14,0	
Диорит	1,05	0,23	75	1,09	_	6,5	
Магнетит	1,10	0,32	85	1,13	0,25	5,0	
Скарн	0,34	0,26	55	0,34	_	3,4	
Карбонатная порода	0,57	0,24	48	-	15	<u> </u>	

больших базах основывается на явлениях изостазии в районе разработки месторождения [127]. В качестве изменяющейся нагрузки на земной поверхности использовались изменения емкости отвала отходов обогащения и склада товарной руды за период с сентября 1977 г. по май 1978 г. Экспериментом охватывался участок размером около 500 м. Из 90 определений установлено, что с вероятностью 0,997 модуль упругости массива пород Северопесчанского месторождения находится в пределах (0,72 ± 0,27)10<sup>4</sup> МПа.

Тектоническое строение Северопесчанского месторождения довольно сложное. Разрывные нарушения представлены, в основном, меридиональными и кососекущими крутопадающими нарушениями (рис. 8.3). Кроме крупных нарушений массив горных пород в районе месторождения разбит многочисленными дайками, имеющими параметры залегания, близкие к основным нарушениям. Следствием активной тектонической деятельности в районе месторождения является ряд крупных зон смятия и зон дробления, представленных трещиноватыми породами, иногда с глинкой трения между обломочным материалом. Наиболее важными являются тектонические зоны дробления I и II, находящиеся в непосредственной близости от основных сооружений промплощадки (см. рис. 8.2, 8.3).

Трещиноватость руд и вмещающих пород представлена системами крутопадающих трещин, элементы залегания которых измерялись тахеометрической съемкой. Многие трещины имеют зеркала скольжения. Основные системы трещин показаны в табл. 8.2.

В целом горно-геологические характеристики массива горных пород Северопесчанского месторождения соответствуют средним



Рис. 8.3. Геологическое строение Северопесчанского месторождения: *I* — тектонические нарушения; 2 — контур рудного тела; 3 — скарны; 4 — диориты; 5 — туфы порфиритов; 6 — дайки

#### Элементы залегания систем трещип

Таблица 8.2

Район съемки (порода)	Азимут простирания, град	Угол падения, град
Лежачий бок (порфириты, туфы	100 101 100 100 100 100 100 100 100 100	The IP
порфиритов)	135	80
A Loss	- 235	85
Рудное тело (магнетит, скарн)	140	75—80
	250	75-80
Висячий бог (диориты)	190	85
	250	75
12 N. 44 (33)	1 1 1 A	a and
	100 - Stor Of	

показателям других железорудных месторождений Урала и Казахстана, поэтому при проектирования большинство вопросов решалось в обычном порядке по аналогии с другими месторождениями без дополнительных исследований.

#### 8.1.2. Проблемы охраны от подработки сооружений промплощадки шахты

Северопесчанское месторождение залегает вне населенных пунктов и каких-либо значительных природных объектов, поэтому проблемы в области сдвижения горных пород ограничивались охраной сооружений шахты.

Промышленная площадка шахты, включающая два подъемных ствола, оборудованных башенными копрами с многоканатными подъемами, и центральный вентиляционный ствол с инспекторским бадьевым подъемом, расположена в лежачем боку залежи. Выбор места заложения стволов и основных сооружений при проектировании производился исходя из угла сдвижения, равного 60° по породам лежачего и висячего боков, принятого по аналогии с практикой других железорудных месторождений Урала с похожими горно-геологическими условиями. По принятым углам сдвижения центральные стволы и их промплощадка были расположены в соответствии с требованиями действующих правил, т. е. не ближе 50 м от ожидаемой на конец разработки месторождения границы опасных сдвижений [16]. Однако анализ конкретных условий залегания месторождения и последующая практика его разработки показали, что принятая дополнительная берма безопасности шириной 50 м не обеспечивает нейтрализации не только аномалий в развитии сдвижения, но и влияния многих случайных величин, вызывающих отклонение фактической границы зоны сдвижения от ожидаемой проектной [150].



Рис. 8.4. Зона обрушения на Северопесчанском месторождении: I — отработанная площадь; 2 — граница зоны обрушения на 1973 г.; 3 — то же на 1974 г.; 4 — то же на 1982 г.; 5 — карьер

На первой стадии эксплуатации Северопесчанского месторождения сдвижение горных пород развивалось в обычной для слепых рудных тел форме. В 1971 г., через три года после начала разработки, обрушение налегающих пород вышло на земную поверхность. Обрушение, по-видимому, распространялось по слабым трещиноватым скарнам, так как воронка обрушения образовалась в районе выхода скарнов на поверхность, отклонившись от контура подработанной площади в сторону лежачего бока. Аномальное развитие процесса сдвижения проявилось в 1973 г. при завершении очистных работ на глубине 370 м и переходе на глубину 450 м. При пролете выработанного пространства по простиранию около 300 м в условиях неполной подработки на земной поверхности лежачего бока образовалась трещина, достигшая границы открытой подстанции (рис. 8.4). Углы сдвижения и разрыва, отстраиваемые по этой трещине, составили 43° вместо проектных 60°.

В случае сохранения углов сдвижения неизменными, дальнейшее углубление горных работ создавало угрозу центральным ство-

лам шахты и требовало принятия мер по охране их от подработки. В соответствии с заключением специальной комиссии, рассматривавшей в 1973 г. причины выполаживания углов сдвижения, Союзрудой МЧМ СССР было решено оставить в осях 7-16 в лежачем боку предохранительный целик под промплощадку, построенный во вмещающих породах под углами  $\beta_1 = 45^\circ$  и  $\delta = 70^\circ$ , а в рудном теле под углами  $\beta_1 = 65^\circ$ ,  $\delta = 70^\circ$ . В нем консервировалось свыше 14 млн т руды. Дополнительно к нему в осях 5-7 оставлялся барьерный целик на всю мощность рудного тела с размером по простиранию 100 м; в задачу входило поддержание пород лежачего бока и разделение выработанного пространства и зоны обрушения на два локальных участка, чтобы не допустить образования условий полной подработки вмещающих пород и дальнейшего выполаживания углов сдвижения. Позднее, в 1975 г., Союзрудой МЧМ СССР по согласованию с указанной комиссией было решено оставить барьерный целик не в осях 5-7, а в осях 8а-10а. Его запасы на всю глубину составляли более 8 млн т.

Таким образом, аномальное развитие процесса сдвижения в лежачем боку и меры, принятые по обеспечению сохранности центральных стволов и промплощадки шахты, привели к консервации в предохранительных целиках более 22 млн т руды, что поставило шахту в тяжелое положение по обеспеченности запасами.

Осложнения с охраной сооружений от подработки инициировали расширение исследовательских работ по изучению закономерностей развития процесса сдвижения. В 1973—1974 гг. на земной поверхности и в подземных выработках была оборудована разветвленная капитальная наблюдательная станция, позволяющая производить инструментальные измерения деформаций и сдвижений на всей территории мульды сдвижения. На основании инструментальных наблюдений определены параметры первоначального напряженного состояния, исследованы закономерности и осуществлен прогноз формирования напряженно-деформированного состояния при различных вариантах разработки месторождения [92, 93, 151].

#### 8.1.3. Определение напряженного состояния массива горных пород

Исходя из теоретических положений, сформулированных в работе, для прогноза развития процесса сдвижения первостепенное значение имеют надежные данные о первоначальном напряженном состоянии массива горных пород. Параметры первоначальных напряжений, полученные методами измерения на малых базах, приведены в табл. 3.2. Отмечавшиеся ранее трудности интерпретации точечных измерений на участки массива горных пород, вовлекаемые в процесс сдвижения при разработке рудных месторождений, вызвали необходимость определения напряжений на базах, сопоставимых с размерами месторождения [83, 92, 138, 139].

Исходными данными для определения напряжений послужили результаты инструментальных наблюдений, выполненных Уральским филиалом ВНИМИ в период с 1967 г. по 1971 г., когда зона обрушения вышла на земную поверхность [70]. Над разрабатываемым участком месторождения находились четыре профильные линии, показанные на расчетной схеме (см. рис. 7.5), имевшей следующие параметры: R = 105 м,  $E = 0,7 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = 0.3$ . Для расчета напряжений использовались относительные горизонтальные смещения реперов вдоль профильных линий I, II, III, приведенные в табл. 7.3.

Программа ЭВМ была составлена так, что по каждому варианту рассчитывались компоненты напряжений по осям x и y ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ). Приведение каждого варианта к одним осям обеспечивало возможность статистической обработки всей выборки, состоящей из 220 вариантов [92].

Средние значения напряжений по всей выборке:  $\bar{\sigma}_x = -9,5$  МПа,  $\bar{\sigma}_y = -1,6$  МПа,  $\bar{\tau}_{xy} = 0,9$  МПа при средних квадратических отклонениях  $\sigma(\sigma_x) = 4,3$  МПа,  $\sigma(\sigma_y) = 1,3$  МПа,  $\sigma(\tau_{xy}) = 0,5$  МПа. Доверительный интервал оценивался по критерию Стьюдента [96]. С надежностью 0,95 искомые значения компонентов напряженного состояния равны  $\sigma_x = -9,5 \pm 0,6$  МПа,  $\sigma_y = -1,6 \pm 0,2$  МПа,  $\tau_{xy} = -0,9 \pm 0,7$  МПа. Главные нормальные напряжения в горизонтальной плоскости и их направления, вычисленные через  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , имеют следующие величины:  $\sigma_1 = -1,5 \pm 0,2$  МПа,  $\sigma_2 = -9,6 \pm 0,6$  МПа,  $\alpha_{a3} = 96^\circ \pm 1,5^\circ$ .

Таким образом, естественное поле напряжений на Северопесчанском месторождении, обусловленное тектоникой, генезисом и другими факторами, в горизонтальной плоскости ориентировано в широтном и меридиональном направлениях. Максимальные сжимающие напряжения ( $\sigma_2$ ) направлены меридионально. Параметры поля напряжений подвергались различным проверкам, описанным в разделе 7, и использовались в качестве граничных условий для расчета сдвижений и деформаций и разработки прогноза развития процесса сдвижения на месторождении.

# 8.1.4. Прогноз развития процесса сдвижения и рекомендации по расконсервации барьерного целика

Прочностные и структурные особенности массива горных пород не объясняют аномалий процесса сдвижения. Самые крутые углы сдвижения ( $\delta = 74^{\circ} \div 76^{\circ}$ ) наблюдались в торцах залежи, где мас-

сив сложен слабыми скарнами с коэффициентом крепости 3—5. Крепость пород висячего и лежачего боков составляют  $f = 8 \div 10$  и  $f = 10 \div 12$ , а углы сдвижения, соответственно, 60° и 46°. Не установлено определенной зависимости величины углов сдвижения от трещиноватости пород висячего и лежачего боков, представленной двумя системами крутопадающих трещин. Некоторое представление о происходящих явлениях вносит рассмотрение предложенной геомеханической модели процесса сдвижения.

Зона обрушения после выхода на земную поверхность до 1973 г. имела в плане очертания, близкие к кругу (см. рис. 8.4). Вторичное поле напряжений, образовавшееся вокруг зоны обрушения, в соотвстствии с известными закономерностями теории упругости характеризовалось концентрацией сжимающих напряжений на участках, примыкающих к лежачему и висячему бокам рудного тела (рис. 8.5). Тангенциальные напряжения вблизи контура достигали -27,3 МПа, в то время как радиальные напряжения, будучи на контуре равными нулю, с углублением в массив достигали лишь своей первоначальной величины, т. е. -1,5 МПа. Поэтому вблизи промплощадки возникла зона с ярко выраженной анизотропией напряжений, способствующей, как известно, развитию деформаций и трещин сдвига. Этому процессу благоприятствует структура массива пород, так как направление простирания обеих систем трещин согласуется с направлением главных площадок сдвига (под углом 45° к меридиональному направлению).

С севера и с юга к зоне обрушения примыкали области растягивающих напряжений, которые, по данным инструментальных наблюдений, в меньшей мере снижают устойчивость массива горных пород. На этих участках весь период разработки месторождения сохранялись самые крутые углы сдвижения.

Концентрация тангенциальных напряжений в лежачем и висячем боках, создавшая благоприятные условия сдвижению горных пород, явилась вероятной причиной образования трещины у открытой подстанции и выполаживания углов сдвижения в лежачем боку до 44—46°. Преимущественное расширение зоны обрушения вкрест простирания рудного тела придало ей эллиптическую форму, вытянутую по направлению  $\sigma_1$ , и способствовало дальнейшему возрастанию концентрации напряжений до –35,0 МПа.

На рисунке 8.6 представлены картины изолиний главных деформаций на 1974 г. при круглой зоне обрушения с радиусом R = 256 м и эллиптической с параметрами a = 306 м, b = 216 м, m = 0,173. При переходе зоны обрушения от круглой формы к эллиптической сжимающие деформации, действующие преимущественно в меридиальном направлении, возросли в 2,0—2,5 раза.







Таким образом, аномальному развитию процесса сдвижения способствовали анизотропия первоначального поля напряжений и особенности формирования вторичного напряженного состояния, определяемые принятой схемой разработки месторождения. Следовательно, в условиях Северопесчанского месторождения для повышения устойчивости массива пород лежачего бока необходимо было придать выработанному пространству и зоне обрушения вытянутую в меридиональном направлении форму. Одновременно с этим



требовалось сместить главное сечение мульды сдвижения с участка промплощадки.

Из мер охраны промплощадки, принятых после выполаживания углов сдвижения, оставление барьерного целика не отвечало указанным условиям. Во-первых, барьерный целик ограничивал развитие горных работ по простиранию и, препятствуя приданию зоне обрушения нужной формы, сохранял неблагоприятное напряженно-деформированное состояние вмещающих пород. Во-вторых, при оставлении барьерного целика положение главного сечения мульды сдвижения совпадало непосредственно с участком центральных стволов.

На основании исследований, выполненных с использованием разработанной геомеханической модели и методик расчетов параметров процесса сдвижения, в целях снижения неблагоприятного воздействия указанных факторов в 1975 году было рекомендовано отработать барьерный целик и интенсивно отрабатывать южный фланг месторождения. На севере горные работы предлагалось ограничить достигнутой границей (линия 16). Из выполненных исследований вытекало, что применение предложенной схемы разработки месторождения имело ряд преимуществ. Развитие очистных работ по простиранию и придание зоне обрушения в плане формы эллипса, вытянутого по направлению действия максимального сжатия, должно было изменить напряженнодеформированное состояние окружающего массива. Концентрация напряжений в породах лежачего бока должна была снизиться с -35,0 МПа до -15,0 МПа, а главное сечение мульды сдвижения сместиться к югу от промплощадки на свободные участки земной поверхности. Промплощадка оставалась на фланге мульды сдвижения (рис. 8.7).

Ожидаемые горизонтальные деформации на промплощадке шахты показаны на рис. 8.8. В районе центральных подъемных стволов они должны составить  $\varepsilon_1 = 0,5$  мм/м,  $\varepsilon_2 = -0,3$  мм/м. В целом по промплощадке возникновения критических деформаций не предвиделось.

Вероятные границы зоны трещин прогнозировали по описанной выше методике путем оценки устойчивости различных вариантов плоскостей скольжения на поперечных сечениях 12 и 15, находящихся в районе стволов (рис. 8.9, 8.10). Результаты расчета приведены в табл. 8.3. Граница зоны трещин оконтуривалась по вариантам с коэффициентом запаса устойчивости менее 1,3. Минимальные углы разрыва в условиях полной подработки должны были составлять 50°. Таким образом, полученные прогнозные углы разры-







Рис. 8.8. Главные нормальные деформации земной поверхности на участке промплощадки при зоне обрушения вытянутой формы (10<sup>-3</sup>)

ва в условиях полной подработки получились круче, чем фактические углы разрыва в условиях неполной подработки при ограниченных размерах зоны обрушения по простиранию.

Прогнозные данные свидетельствовали о возможности и целесообразности внедрения рекомендаций по разработке барьерного целика. Наряду с повышением безопасности объектов шахты внедрение рекомендаций позволяло расконсервировать и вовлечь в нормальную разработку более 8 млн т руды из барьерного целика и упрощало разработку месторождения в целом.

По решению Минчермета СССР, принятого на основе выполненных исследований, разработка барьерного целика была начата в 1981 г. и в 1983 г. 3,2 млн т руды, расположенной выше глубины 450 м, полностью отработаны. Добыча остальных запасов барьерного целика производилась по мере понижения очистных работ. В течение 1984—1998 годов в плановом порядке добыто 3 млн т из части целика, находящейся выше глубины 530 м.

Использованные при расконсервации барьерного целика принципы изменения схемы разработки месторождения послужили ос-



15 Рис. 8.9. Схема к расчету устойчивости вероятных поверхностей скольжения по разведочной линии 12 разведочной линии 8.10. Схема к расчету устойчивости вероятных поверхностей скольжения по PMC.

И	вероятных	плоскостей	скольжения	я
			Таблица	8.3

Разрез	№ варианта	Нижняя от- метка очист-	Сцепление по плоскость	Угол пл сдвиже	поскостей ния, град	Коэффици-	Расчетный
		ных работ, м	МПа	α	α2	вости	жения, град
12	1	240	0,3	0	63	56	
	2	-240	0,3	28	75	1.8	
	3		0,3	40	74		50
	4	-240	0,3	50		1,2	50
	5	-400	0,3	46	75	2.0	
	6	-400	0,3	37		1.6	-
	7	-400	0,3	51		1,0	51
15	1	-240	0,3	0	63	3.8	51
	2	-240	0,3	40	58	12	50
	3	-240	0,3	47	60	11	50
	4	-240	0,3	50		13	50
	5	240	0,3	22	67	1,5	50
3	6	-240	0,3	40	67	1,7	47
	7	-240	0,3	47		1,2	47
	8	-400	0,3	33	65	14	47
ļ	9	-400	0,3	38	66	1.4	
	10	-400	0,3	50		1,4	50
	11	-400	0,3	53		1,1	53
1						· /	

Коэффициенты запаса устойчивост

новой для создания способа управления процессом сдвижения горных пород [152].

#### 8.1.5. Инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород в процессе разработки барьерного целика

Инструментальные наблюдения за процессом сдвижения проводили по наблюдательной станции, содержащей поверхностную и подземную части. Поверхностная часть, показанная на рис. 8.4, состояла из профильных линий 19, 15, 12 и 6, оборудованных в 1974 г., из линий 8а, 9а и продольной профильной линии, заложенных в 1980—1981 гг. перед разработкой барьерного целика. Подземная часть наблюдательной станции включала профильную линию в специальной выработке, пройденной на глубине 160 м от поверхности от клетевого ствола в сторону зоны обрушения, профильную линию по квершлагу на глубине 290 м, оборудованные в 1974—1975 гг., и дополнительные профильные линии по квершлагам на глубинах 370 м и 450 м, оборудованные перед началом разработки барьерного целика (см. рис. 8.2).

С 1973 г., после образования трещин на земной поверхности лежачего бока, очистные работы велись одновременно на двух горизонтах (см. рис. 8.1). На центральном участке в течение 1974— 1976 гг. был отработан гор. –240 м(глубина 450 м) между разведочными линиями 16а—10а с пролетом 320 м. На южном участке, за барьерным целиком, в этот же период был отработан гор. –160 м (глубина 370 м) протяженностью 150 м. Обрушение над ним вышло на поверхность в 1975 г. Разработка гор. –240 м на южном участке началась с панели X в 1977 г., и до 1981 г. на нем отработаны панели от IX до XIV общей протяженностью около 300 м.

Таким образом, к началу разработки барьерного целика выработанное пространство представляло собой два обособленных участка простиранием по 300—320 м, разделенных барьерным целиком шириной 100 м. При глубине 450 м для этих участков сохранялись условия неполной подработки. Зоны обрушения обоих участков на поверхности с 1976 г. соединились. Поверхность над барьерным целиком осела на 6—8 м, но глубина его разрушения осталась неизвестной. В подземных условиях на гор. –80 м, где имелся непосредственный доступ в него по горным выработкам, он сохранялся относительно устойчивым до начала разработки. После разработки барьерного целика и панели XV на гор. –240 м создалось общее выработанное пространство протяженностью по простиранию около 750 м, обеспечивающее условие полной подработки вмещающих пород (*H*/*L*<sub>n</sub> = 450/750 = 0,6).

Значения углов сдвижения на различных этапах разработки месторождения, полученные инструментальными наблюдениями, приведены в табл. 8.4; из нее следует, что переход от условий неполной подработки вмещающих пород к условиям полной подработки, обусловленным соединением обоих участков, не вызвал выполаживания углов сдвижения, хотя отношение  $H/L_{\rm II}$  изменилось от 1,5 в 1973 г. до 0,6 в 1982 г. Более того, границы зоны сдвижения на участке промплощадки практически не изменились и остались в пределах, достигнутых в условиях неполной подработки.

В развитии вертикальных сдвижений выделяются два основных периода. В первый период, охватывающий 1974—1978 гг., вертикальные сдвижения на центральном участке нарастали очень медленно (рис. 8.11). На участке центральных стволов весь этот период сохранялась зона с нулевыми вертикальными сдвижениями, хотя очистные работы производились именно на центральном участке в панелях I—VI гор. –240 м. Увеличение интенсивности вертикальных сдвижений, проявляющихся в форме оседаний, связано с разви-

Таблица 8.4

Углы сдвижения горных пород Северопесчанского месторождения в 1972—1986 гг.

		По лежачему боку					По висячему боку						
Год		Прос	рильная ;	иния		Проф	рильная л	иния	ия				
	15	12	9a	8a	6	15	12	9a	8a	6			
1972	68	58				88	74						
1973	44	46				79	73						
1974	49	46				75	60						
1975	49	50				65	66		60				
1976	49	50				65	66		60				
1977	49	50		l	68	65	66		60				
1978	49	50			68	65	65		60				
1979	49	50		ł	68	63	65		60				
1980	49	50			68	63	65		60				
1981	49	46	44	44	65	63	65	66	66	56			
1982	49	46	46	46	53	63	65	66	66	56			
1983	49	46	46	46	49	63	65	66	66	56			
1984	49	46	46	46	49	63	65	66	66	56			
1985	49	46	46	46	49	63	65	66	66	56			

тием очистных работ и образованием зоны обрушения за барьерным целиком на южном участкс и характерно для всего второго периода (1979—1982 гг.). Развитие зоны обрушения над барьерным целиком и соединение обоих участков привело к снижению концентрации напряжений в висячем и лежачем боках и, как следствие, к проявлению вертикальных сдвижений в виде оседаний. В конфигурации изолиний тенденция максимального перемещения в глубь массива наблюдалась на профильных линиях 12, 9а, 8а. В период разработки барьерного целика приращения вертикальных сдвижений на профильных линиях 8а, 9а происходили особенно активно (рис. 8.12). В это же время появились вертикальные оседания в районе центральных стволов.

Таким образом, процесс развития оседаний начался более чем за 2 года (в 1978 г.) до начала разработки барьерного целика и, по нашему мнению, обусловлен снижением концентрации сжимающих напряжений меридионального направления за счет частичного разрушения массива над барьерным целиком и соединения зон обрушения центрального и южного участков.

В картине горизонтальных сдвижений начального периода изолинии были направлены выпуклостью в сторону зоны обрушения в



-1978 rr. (MM) Рис. 8.11. Изолинии вертикальных сдвижений за 1974



главном сечении. Эта особенность свидетельствует о том, что в центральной части мульды сдвижения, на ее главном сечении, проявляются сдвижения, направленные в глубь массива. Нулевая изолиния в 1977 г. находилась в непосредственной близости от зоны обрушения (рис. 8.13).

В последующий период (1978—1982 гг.), когда происходило соединение зон обрушения сначала за счет частичного разрушения барьерного целика, а затем за счет его разработки, в картине горизонтальных сдвижений наблюдалось постепенное спрямление прогиба изолиний и рост величин положительных сдвижений (рис. 8.14).

Для картины изолиний, отражающей состояние на 1982 г., характерны две особенности. Во-первых, максимальная скорость приращения горизонтальных сдвижений наблюдалась на профильных линиях 8а, 9а в районе барьерного целика, что свидетельствует о смещении главного сечения мульды сдвижения к югу от промплощадки. Во-вторых, несмотря на более высокую скорость развития горизонтальных сдвижений и переход отрицательных значений в положительные, в главном сечении и прилегающих к нему участках наблюдается заметное отставание величин сдвижений от торцевых участков, прилегающих к профильным линиям 19 и 6.

### 8.1.6. Развитие процесса сдвижения при разработке барьерного целика

Исследования, проводившиеся на месторождении, особенно наблюдения в период разработки барьерного целика, показали, что прогноз развития процесса сдвижения, основанный на предложенных теоретических положениях, в главных своих чертах подтвердился: месторождение отработано всплошную без оставления барьерного целика; территория промплощадки и основные ее объекты, в том числе центральные стволы, находятся в удовлетворительном состоянии; главное сечение мульды сдвижения сместилось на 300— 400 м к югу от центральных подъемных стволов; минимальные углы сдвижения не стали более пологими по сравнению с углами сдвижения в 1973 г.

В сущности проявления процесса сдвижения можно выделить следующие основные моменты:

1. Результаты инструментальных измерений и визуальных наблюдений отражают внешние проявления процесса формирования напряженно-деформированного состояния вокруг зоны обрушения в условиях анизотропного поля напряжений с преобладающим сжатием меридионального направления.



Рис. 8.13. Изолинии горизонтальных сдвижений за 1974-1977 гг. (мм)



2. При ограничении по простиранию размеров выработанного пространства и зоны обрушения в лежачем и висячем боках рудного тела возникли области концентрации сжимающих меридиональных напряжений, вызывающих образование трещин. Концентрация сжимающих напряжений проявляла себя направлением горизонтальных сдвижений от зоны обрушения в глубь массива, поднятиями областей, прилегающих к главному сечению мульды, сдвижения, длительными задержками оседаний на этих участках.

3. В первый период ограничения развития очистных работ по простиранию барьерным целиком главное сечение мульды сдвижения четко прослеживалось в районе профильной линии 12 по горизонтальным и вертикальным сдвижениям.

4. Процесс соединения зон обрушения начался за 2—3 года до начала разработки барьерного целика и с нарастающей интенсивностью проявлялся в развитии сдвижений в период разработки барьерного целика в 1981—1982 гг.

5. Соединение выработанных пространств сопровождалось перемещением главного сечения мульды сдвижения в район профильных линий 8а, 9а с образованием трещин и заметным увеличением вертикальных оседаний и горизоптальных сдвижений в сторону обрушения.

6. О снижении уровня концентрации сжимающих напряжений свидетельствовали смена знаков горизонтальных сдвижений и развитие оседаний. Однако концентрация напряжений снялась не полностью, так как значения горизонтальных сдвижений в центральной части мульды остались меньшими, чем на флангах.

7. С достижением условий полной подработки углы сдвижения не стали более пологими по сравнению с углами при неполной подработке. Напротив, на центральном участке границы зоны сдвижения остались неизменными, а углы сдвижения за счет углубления горных работ стали круче.

8. Расконсервация барьерного целика, наряду с обеспечением безопасности объектов промплощадки шахты, дала значительный экономический эффект [94].

#### 8.1.7. Разработка запасов предохранительного целика лежачего бока

В 1983 г., после анализа результатов наблюдения за развитием процесса сдвижения при разработке барьерного целика, на основе прогнозных расчетов было рекомендовано отработать часть запасов предохранительного целика лежачего бока. Разработку предлагалось начать полосой шириной 20 м по границе предохранительного целика с выработанным пространством, заполненным обрушенной породой. Запасы участка предохранительного целика, рекомендованного к разработке, составляли 2,5 млн т. Частичная разработка предохранительного целика лежачего бока стала возможна благодаря созданной к этому времени форме выработанного пространства и образовавшейся зоны обрушения. Размеры выработанного пространства по простиранию к этому времени превысили 800 м при максимальной мощности рудного тела 150 м. Прирезка 20-метровой полосы не вносила существенных изменений в форму выработанного пространства и, как свидетельствовали прогнозные расчеты по предложенным методикам, не вызывала опасных деформаций в охраняемых объектах промплощадки.

К 1998 г. из целика лежачего бока отработано 2,3 млн т руды. Обрушение над отработанными панелями развивается по старой зоне обрушения под углами 85—90°. В зоне плавных сдвижений и на промплощадке опасных проявлений сдвижений и деформаций не наблюдается.

#### 8.1.8. Изменения нормативных углов сдвижения на Северопесчанском месторождении

Действующими "Правилами охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на железорудных месторождениях Урала", утвержденными в 1974 г., на Северопесчанском месторождении предусмотрены следующие значения углов сдвижения разрывов и обрушения:

По породам висячего бока	$\beta = 65^{\circ}, \beta'' = 70^{\circ}$
В ториах залежи	$\delta = 70^\circ,  \delta'' = 70^\circ$
По породам лежачего бока	$\beta_1 = 45^\circ, \ \beta_1'' = 45^\circ$
	$\beta_1 = 65^\circ$

Углы сдвижения по породам лежачего бока рекомендовалось использовать до глубины разработки 450 м (гор. –240 м). Для нижележащих горизонтов они подлежали уточнению.

Результаты наблюдения за процессом сдвижения, проведенные в период разработки верхних горизонтов с 1968 г. по 1986 г. в интервале глубины 250—450 м, показали, что уточнению подлежат параметры процесса сдвижения по всем направлениям.

Прогноз развития процесса сдвижения при разработке нижележащих горизонтов, выполненный с применением предложенных методик на основе инструментальных наблюдений, позволил рекомендовать следующие значения углов сдвижения, разрывов и обрушения:

По породам висячего бока	$\beta = 60^{\circ}, \beta'' = 60^{\circ}, \beta''' = 65^{\circ}$
По породам лежачего бока	$\beta_1 = 50^\circ, \beta_1'' = 55^\circ, \beta_1''' = 60^\circ$
В торцах залежи	$\delta = 55^{\circ}, \delta'' = 60^{\circ}, \delta''' = 75^{\circ}$

Предложенные параметры процесса сдвижения согласованы Госгортехнадзором СССР и введены в действие Минчерметом СССР. Внедрение их позволило расконсервировать из предохранительного целика лежачего бока дополнительно 4,5 млн т руды, разработка которых начата в 1986 г. и в настоящее время завершена.

В дальнейшем обоснованные проведенными исследованиями нормативные значения углов сдвижения при разработке Северопесчанского месторождения вошли в действующие "Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных мсталлов Урала и Казахстана" (согласованы Госпроматомнадзором СССР 21.06.90 г., утверждены Минметом СССР 02.08.90 г.) [16].

#### 8.2. Прогноз процесса сдвижения и охрана сооружений в условиях застроенной территории Высокогорского месторождения

#### 8.2.1. Горно-геологическая характеристика месторождения

На Высокогорском месторождении выделяются два пояса оруденения: Западный и Восточный, имеющие северно-западное простирание, согласное с вмещающими породами, северо-восточное падение под углами 45—75°. Наиболее серьезные проблемы охраны сооружений на месторождении в последний период его эксплуатации возникли при разработке Восточного рудного пояса, подразделяемого на три обособленных участка: Восточно-Ревдинский (ВРЗ), Западно-Ревдинский (ЗРЗ) и Ново-Меднорудянский (НМР) (рис. 8.15). В качестве границ участков приняты крупные тектонические нарушения.

Геологическое строение участков в главных чертах одинаково. В лежачем боку рудно-скарновой зоны Восточного пояса залегают роговики ( $f = 13 \div 14$ ), а в висячем боку порфириты и их туфы ( $f = 11 \div 12$ ). Непосредственная рудно-скарновая зона представлена чередованием роговиков, магнетитовых руд и скарнов ( $f = 9 \div 11$ ). В рудоносной зоне залегает серия пластообразных рудных тел небольшой мощности — от 3 до 19 м — с углами падения 55—70° (рис. 8.16). Руды и вмещающие породы, как правило, устойчивы. Мощность рыхлых образований, представленных суглинками и продуктами выветривания, колеблется от 2 до 15 м.







Рис. 8.16. Поперечный разрез залежей Восточно-Ревдинского участка

В массиве горных пород Высокогорского месторождения прослеживается большое число дизъюнктивных нарушений различных размеров и значимости. Сбросо-сдвиги Главный, Средний и Диагональный разбивают массив на блоки размером 800 м и более с амплитудами смещения до 250-350 м. Мощность их швов, заполненных, как правило, глинкой трения, составляет 2-20 см. Многочисленные нарушения с буквенными обозначениями А, Б, В и т. д. расчленяют крупные блоки на более мелкие, размером от 50 до 300-350 м, со смещениями от 25 до 70 м. Их швы имеют мощности, не превышающие нескольких сантиметров. Наиболее распространены тектонические нарушения, обозначаемые арабскими цифрами 1, 2, 3 и т. д., имеющие амплитуды смещения, обычно, не более 15-25 м и мощность швов в несколько миллиметров.

Трещины, разбивающие массив на структурные блоки, обычно не имеют видимых смещений.

Вся совокупность структурных нарушений массива горных пород придает ему квазиоднородное строение.

# 8.2.2. Основные проблемы охраны сооружений от подработки

На земной поверхности в висячем боку залежей Восточного рудного пояса расположены подъездные железнодорожные пути металлургического завода, линия электропередачи, комплекс зданий городской больницы и большое число индивидуальных одноэтажных деревянных жилых домов (см. рис. 8.15). С переходом очистных работ на более глубокие горизонты в зону сдвижения попалают 2-3-этажные жилые дома. Железнодорожный путь комбинированный (широкая и узкая колеи), имеет местное значение и, в соответствии с грузооборотом (менее 3 млн ткм в год менее трех пар пассажирских узкоколейных поездов в сутки) относится к объектам второй категории охраны. Для железнодорожных путей такого типа [16] допустимые горизонтальные деформации равны 7 10-3, а наклон 10-10-3. Линия электропередачи и здания городской больницы относятся к объектам третьей категории охраны, а одноэтажные жилые дома — к внекатегорийным объектам.

Меры охраны подрабатываемых объектов проектировались исходя из нормативных углов сдвижения  $\beta = 60^{\circ}$  для BP3 и  $\beta = 70^{\circ}$  для 3P3.

В лежачем боку залежей Восточного рудного пояса находятся сооружения промышленной площадки шахты Магнетитовая. Нормативные углы сдвижения по лежачему боку приняты равными углами падения рудных тел.

В условиях застроенной поверхности развитие и углубление очистных работ на месторождении сопряжено с необходимостью сноса большого объема указанных поверхностных объектов, не обеспеченного строительными мощностями. В то же время прогнозные теоретические разработки и инструментальные наблюдения в натурных условиях, выполненные в процессе разработки гор. -50 м и, частично, гор. –130 м, выявили возможность увеличения нормативных углов сдвижения, внедрение которых при разработке гор. -130 м и -210 м давало возможность продлить сроки эксплуатации подрабатываемых объектов без консервации рудных запасов. Оптимизация нормативных углов сдвижения в этих условиях оказывала непосредственное влияние на поддержание производственной мощности шахты за счет сохранения площадей разработки в рудных телах.

#### 8.2.3. Определение первоначального напряженного состояния нетронутого массива горных пород

Исследования первоначального напряженного состояния массива горных пород на Высокогорском месторождении проводились ранее методами разгрузки на малых базах Институтом горного дела МЧМ СССР и Уральским филиалом ВНИМИ [80, 81, 82, 153]. Из результатов исследований ИГД МЧМ СССР, приведенных в табл. 3.2, следует, что в нетронутом массиве горных пород действуют горизонтальные тектонические напряжения  $\sigma_1 = 10,6$  МПа,  $\sigma_2 =$ = 6,2 МПа,  $\alpha_{a3}$  = 54°. По данным Уральского филиала ВНИМИ, величины горизонтальных тектонических напряжений одинаковы и находятся в пределах — (2,0÷5,0) МПа. Противоречивость результатов измерения, отличающихся по величине и знаку, обусловлен-



Рис. 8.17. Расчетная схема к определению напряжений на Восточно-Ревдинском участке

ная, по-видимому, неоднородностью структуры поля напряжений на применявшихся базах измерения и необоснованностью интерпретации точечных результатов измерения на весь участок месторождения, затрудняет их практическое использование.

Для решения практических задач по прогнозированию развития процесса сдвижения позднее было проведено определение горизонтальных напряжений на больших базах, результаты которого приведены в табл. 3.3 [84]. В качестве исходных данных для определения напряжений были использованы инструментальные измерения деформаций при выходе обрушения на поверхность на Восточно-Ревдинском участке месторождения [70]. Наблюдательная станция, состоявшая из трех профильных линий, и расчетная схема показаны на рис. 8.17. Исходное наблюдение по профильным линиям было проведено в 1957 г. до начала очистных работ, повторное, рабо-

Относительные горизоптальные слвижения реперов по профильным линиям	
относительные горизонтальные сдыжених реперов по профильным иннима	
I—III Восточно-Ревлинского участка Высокогорского месторожления	
······································	

Таблица 8 5

I		II		III	
№ репера	Горизонтальные сдвижения, 10 <sup>-2</sup> м	№ репера	Горизонтальные сдвижения, 10 <sup>-2</sup> м	№ репера	Горизонтальные сдвижения, 10-2 м
24	0,00	42	0,00	66	0,00
23	0,40	41	0,30	65	0,40
22	0,70	40	1,70	64	1,20
21	0,90	26	0,00	63	0,50
20	1,10	27	0,10	62	1,30
19	1,30			61	0,60
18	1,80			60	0,50
				59	1,80
				58	3,20

чее, — в 1963 г., когда на поверхности образовалась зона обрушения. Величины смещений реперов относительно опорных реперов (дальних от провала) приведены в табл. 8.5.

Граница зоны обрушения в расчетной схеме отображалась эллипсом с параметрами: a = 152 м, b = 92 м, R = 122 м, m = 0,247.

Модуль упругости массива по средневзвешенной крепости пород ( $f_{cp} = 12$ ) был принят равным 10<sup>4</sup> МПа, а коэффициент Пуассона 0,3.

Средние значения компонентов напряженного состояния по выборке из 168 результатов (вариантов) с надежностью t = 0,95 равны:  $\sigma_x = -12.4 \pm 0.8$  МПа,  $\sigma_y = -6.7 \pm 0.6$  МПа,  $\tau_{xy} = 0.1 \pm 0.2$  МПа при среднеквадратических отклонениях  $\sigma(\sigma_x) = 5.4$  МПа,  $\sigma(\sigma_y) = 3.7$  МПа,  $\sigma(\tau_{xy}) = 1.6$  МПа.

Главные нормальные напряжения в горизонтальной плоскости и их направления имеют следующие значения:  $\sigma_1 = -6.7 \pm 0.6$  МПа,  $\sigma_2 = -12.4 \pm 0.8$  МПа,  $\alpha_{a3} = 66^\circ$ .

Полученные параметры напряженного состояния массива горных пород при прогнозировании процесса сдвижения распространялись в качестве граничных условий на весь участок Восточного рудного пояса.

#### 8.2.4. Прогноз деформаций земной поверхности

Прогноз деформаций земной поверхности на Высокогорском месторождении производился для оценки влияния горных работ гор. –210 м на промышленные, жилые и общественные объекты, расположенные в висячем и лежачем боках рудных залежей.
Зона обрушения в расчетной схеме представлялась общей для рудных тел Восточного рудного пояса и аппроксимировалась эллипсом с параметрами: a = 370 м, b = 180 м, R = 275 м, m = 0,345,  $\alpha = 81,5^{\circ}$ . Расчетные точки, общее число которых составляло 62, располагались вблизи охраняемых объектов равномерно по площади мульды сдвижения. В каждой точке определялся тензор горизонтальных деформаций. Результаты расчетов представлены в виде круговых диаграмм деформаций и изолиний главных нормальных деформаций на рис. 8.18, 8.19 и 8.20. Круговые диаграммы дают наглядное представление о характере деформирования каждого участка земной поверхности и дают возможность определить численную величину деформации по любому направлению.

В рассматриваемой части мульды сдвижения деформации растяжения и сжатия распространены примерно одинаково, и их максимальные значения не превысят +0,15 мм/м, т. е. в 10—15 раз меньше допустимых деформаций для объектов первой категории охраны.

Растягивающие деформации, изолинии которых приведены на рис. 8.19, будут иметь максимальные значения, достигающие 0,15 мм/м, во второй и четвертой четвертях координатной плоскости, а в первой и третьей четвертях их величины не превысят 0,03— 0,04 мм/м. Территория промышленной площадки шахты Магнетитовой попадает в зону умеренных деформаций, изменяющихся от 0,03 до 0,07 мм/м. Территория городской больницы в висячем боку залежей будет находиться в зоне относительно повышенных растяжений, достигающих 0,13—0,14 мм/м.

Сжимающие деформации концентрируются у оси у, смещаясь в первую и третью четверти (см. рис. 8.20). Юго-западная часть промышленной площадки шахты будет находиться в весьма благоприятных условиях по сжимающим деформациям, а в северо-восточном направлении они возрастут постепенно до 0,07—0,09 мм/м. На территории городской больницы сжимающие деформации будут минимальными и не превысят 0,02 мм/м.

Железная дорогая проходит через зоны с различными уровнями сжимающих и растягивающих деформаций, максимальные значения которых не превысят 0,15 мм/м.

Таким образом, вокруг зоны обрушения возникает обширная область плавных сдвижений, но критические деформации, опасные для объектов первой категории охраны, в ней будут отсутствовать. Это положение подтвердилось впоследствии инструментальными наблюдениями, в соответствии с которыми критические деформации наблюдались только в зоне трещин.



Рис. 8.18. Круговые диаграммы деформаций вокруг прогнозируемой зоны обрушения Восточного рудного пояса



Рис. 8.19. Изолинии главных деформаций є<sub>1</sub> (10<sup>-5</sup>) вокруг прогнозируемой зоны обрушения Восточного рудного пояса





Сохранение неизменными прогнозных границ опасных деформаций послужило предпосылкой увеличения нормативных углов сдвижения при разработке горизонтов –210 м и глубже.

#### 8.2.5. Прогноз границы зоны трещин

Ожидаемые границы зоны трещин устанавливали путем оценки устойчивости структурных нарушений по методике, описанной в разделе 4.4. В качестве структурных нарушений на расчетной схеме выступали следы тектонических трещин различных порядков, контакты напластований и другие неоднородности массива горных пород (рис. 8.21). Параметры эллипса, аппроксимирующего границы зоны обрушения, и граничные условия аналогичны принятым в разделе 8.2.4.

Оценка устойчивости структурных нарушений проводилась по 120 расчетным точкам, располагавшимся по основным плоскостям ослабления. Как следует из рис. 8.21, на котором точки с неустойчивым состоянием заштрихованы, при эллиптической форме провала, действующих горизонтальных напряжениях и направлениях основных ослаблений сплошные зоны подвижек и образования трещин не должны возникнуть. Смещения ожидаются лишь по отдельным участкам нарушений, имеющим юго-западное и северо-восточное направление. В районе промплощадки шахты к ним относятся нарушения № 20 (точки 23, 24) и № 46 (точки 25, 26, 27), а в висячем боку Восточного рудного пояса — нарушения A<sub>3</sub> и A<sub>4</sub> (точки 55, 59 и 60) и нарушения Д<sub>2</sub> и Д<sub>4</sub> (точки 70, 71, 80, 81). Таким образом, расчетная граница зоны трещин при углублении горных работ будет находиться в пределах прогнозируемых границ провала без заметного расширения. Интересно отметить, что прогнозируемые подвижки по нарушениям № 20 и № 46 подтвердились инструментальными наблюдениями в 1981—1982 гг. На профильных линиях, пересекающих нарушение № 20 в районе стволов Магнетитового, Магнетитового-бис, Вентиляционного ствола 15, зафиксированы дискретные проявления вертикальных и горизонтальных сдвижений.

## 8.2.6. Изменеция нормативных углов сдвижения пород висячего бока по результатам проведенных исследований

На Восточно-Ревдинском и Западно-Ревдинском участках процесс сдвижения изучен достаточно полно. Инструментальные наблюдения при разработке горизонтов 150 м, 90 м и 30 м в интервале глубины от 60 м до 180 м выполнялись Уральским филиалом ВНИМИ. Сдвижение горных пород на этих глубинах развивалось преимущественно со стороны висячего бока без заметного отстава-





I — прогнозирусмая зона обрушения; 2 — расчетный контур зоны обрушения

ния от горных работ. С понижением очистной выемки на горизонты –50 м, –130 м и –210 м, находящиеся на глубине 260—420 м, на развитие процесса сдвижения все большее влияние стали оказывать породные пропластки между рудными телами, пережимы, смещения рудных тел по тектоническим нарушениям, разделяющие рудоносную зону на обособленные участки.

В результате изменения параметров геомеханической модели углы сдвижения горных пород при разработке нижних горизонтов увеличились по сравнению с нормативными, определенными на верхних горизонтах, на 10—15°. Кроме того, с углублением горных работ заметно расширилась зона плавных деформаций, граница которой стала отстоять от границы зоны разрывов на 150—200 м. Углы сдвижения по-прежнему в большинстве случаев совпадают с углами разрыва, но стали значительно круче. Изменения углов сдвижения на разных глубинах прослеживаются на рис. 8.16 и в табл. 8.6.

Таким образом, при выемке нижних горизонтов за счет изменения условий подработки пород висячего бока фактические углы сдвижения оказались значительно выше нормативных, предусмотренных "Правилами..." [40]. Во избежание неоправданной консервации рудных запасов или преждевременного сноса сооружений при разработке гор. –130 м и –210 м на основе выполненного комплекса теоретических и инструментальных исследований проводилась корректировка углов сдвижения пород висячего бока. Поправки к нормативному углу определяли на основе проведенных расчетов по разработанной методике и известной методике ВНИМИ [4, 44]. На Восточно-Ревдинском участке углы сдвижения для проектирования мер охраны увеличивались с 60° до 81—85°, а на Западно-Ревдинском с 70° до 72—85° в зависимости от степени подработанности пород на конкретном участке.

Применение уточненных значений углов сдвижения для построения предохранительных целиков позволило полностью отработать запасы руды на гор. –130 м в объеме 2,9 млн т. Запасы руды на гор. –210 м почти полностью попадали в предохранительный целик железнодорожных путей, ЛЭП и городской больницы. В связи с неопределенностью сроков переноса указанных объектов и дефицитом подготовленных запасов руды очистные работы в пределах предохранительного целика вели в камерах с временным оставлением междукамерных целиков и потолочин. К моменту завершения выемки камерных запасов, составивших около 2 млн т, железная дорога и ЛЭП были снесены. На участке пока осталась и охраняется только городская больница.

Изменения углов сдвижения с углублением горных работ на 1	Восточном
рудном поясе	

Горизонт, м	Глубина разра- ботки <i>Н</i> , м	Пролет участ- ка L, м	H/L	Площадь пород- ных пропласт- ков, %	Угол сдвижения β, град
		осточно-Ревд	инские за	лежи	
20	180	380	0.5	50	55
50	260	300	0.9	60	62
-30	200	380	0,9	60	78
-130 -210	420	240	1,8	80	75
		Западно-Ревди	инские за	лежи	
20	1 180	1 300 L	0.6	80	73
50	260	460	0.6	70	75
-30	340	485	0.7	70	91
-130 -210	420	260	1,6	60	87

Результаты прогнозирования деформаций земной поверхности, развития зоны трещин и данные инструментальных наблюдений позволили обосновать новые значения нормативных углов сдвижения. В 1982 г. Госгортехнадзором СССР были согласованы уточненные значения нормативных углов сдвижения:

Восточно-Ревдинский участок В Западно-Ревдинский участок	$\beta = 80^{\circ}, \beta'' = 85^{\circ} (вместо 70^{\circ})$
--	--

Впоследствии, в 1990 г., уточненные значения угловых параметров сдвижения горных пород вошли в действующие "Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана" [16].

# 8.2.7. Эффективность внедрения результатов исследования процесса сдвижения на Высокогорском месторождении

Внедрение результатов исследования процесса сдвижения горных пород на Высокогорском месторождении имеет социальное и экономическое значение. Социальная значимость результатов исследования выражается в обеспечении безопасности эксплуатации объектов, попадающих в зону влияния подземных разработок. Экономическая эффективность была обусловлена продлением срока службы подрабатываемых объектов и предотвращением неоправданной консервации рудных запасов в предохранительных целиках, что давало возможность поддерживать производственную мощность шахты Магнетитовой.

Учет конкретных условий разработки и уточнение углов сдвижения позволило отработать без сноса ЛЭП, железнодорожных путей и больницы запасы горизонта –130 м, составляющие около 2,9 млн т, и произвести частичную выемку запасов гор. –240 м в объеме около 2 млн т.

Внедрение уточненных углов сдвижения при разработке нижележащих горизонтов продлит сроки сноса подрабатываемых объектов на период, соответствующий времени разработки одного горизонта (7—10 лет).

### 8.3. Прогнозирование процесса сдвижения при совмещении открытых и подземных разработок на Гороблагодатском месторождении

#### 8.3.1. Горно-геологические условия разработки месторождения

Гороблагодатское железорудное месторождение находится в комплексе метаморфизованных слоистых вулканогенно-осадочных образований и представлено серией пластообразных рудных тел мощностью от 2 до 50 м, залегающих согласно со слоистостью рудоносной зоны под углами падения в пределах 35—45° (рис. 8.22). Рудные тела выходят непосредственно под наносы и на верхних горизонтах делятся на висячую и лежачую пачки. Мощность обеих пачек колеблется в пределах 90—120 м. Расстояние между ними на юге не превышает 20 м, а на севере увеличивается до 70—90 м. На глубине 300—350 м обе пачки соединяются в общую рудоносную промышленную зону.

Висячий бог месторождения сложен диабазовыми порфиритами и их туфами ( $f = 10 \div 12$ ); в рудоносной толще наиболее распространены гранатовые скарны (f = 10) и сиениты (f = 12). Зона выветренных пород распространяется до глубины 20—30 м. Мощность наносов составляет 5—7 м.

Лежачий бок представлен, в основном, авгитовыми порфиритами и эпидот-гранатовыми скарнами ( $f = 10 \div 12$ ).

Месторождение разрабатывается комбинированным способом: северная часть — Центральным карьером, южный фланг — шахтой Южной (рис. 8.23). В настоящее время карьер достиг предельной отметки 50 м (220 м от поверхности), очистные работы в шахте ведутся на горизонте –80 м (глубина 350 м). Для сохранения южного борта карьера от подработки подземными очистными работами был оставлен подкарьерный предохранительный целик, разделяю-



Рис. 8.22. Поперечный разрез Гороблагодатского месторождения





щий карьерное и шахтное поля. Запасы предохранительного целика, составляющие более 4 млн. т, предусматривалось отработать после погашения карьера. Однако, учитывая постоянно возрастающий дефицит сырья на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате, было принято решение о продлении срока службы Центрального карьера за счст привлечения к отработке запасов предохранительного подкарьерного целика. В соответствии с проектом расширения карьера, выполненным институтом Уралгипроруда, открытые горные работы производятся в районе погашенного выработанного пространства верхних горизонтов и в зоне обрушения нижних горизонтов шахты. Совмещение открытых и подземных разработок потребовало применсния специальных мер по обеспечению безопасности ведения горных работ в зоне взаимного влияния карьера и шахты.

Горные работы на шахте ведутся от центра к флангам рудного поля с применением безэтажной выемки и системы этажного принудительного обрушения с отбойкой руды в зажатой среде. Порядок разработки пачек в этаже нисходящий: сначала отрабатывается висячая пачка, затем лежачая. На верхних горизонтах протяженность рудных тел, разрабатываемых подземным способом была незначительной и до глубины 220 м (гор. 60 м) не превышала 360 м. С глубины 280 м (гор. 0 м) пролет подземных разработок увеличился до 600 м.

В процессе разработки Гороблагодатского месторождения шахтой Южной в зону влияния горных работ попал ряд промышленных объектов различного назначения. Наиболее важными среди них являются здания и сооружения промплощадки шахты Южной, расположенные в лежачем боку залежей, железнодорожные пути, соединяющие по южному флангу месторождения промплощадку шахты с аглофабрикой, вагонное депо в висячем боку (см. рис. 8.23). На ссверном фланге шахтного поля, как отмечалось выше, в зону влияния подземной разработки попадает Южный борт Центрального карьера, сохранность которого обеспечивалась оставлением подкарьерного предохранительного целика.

Инструментальные наблюдения за процессом сдвижения на Гороблагодатском месторождении в настоящее время проводятся в ограниченном объеме по трем профильным линиям, не дающим полного представления о деформациях земной поверхности мульды сдвижения (см. рис. 8.23), поэтому оценка уровня деформаций на территории, подверженной влиянию горных работ, производилась по приведенной выше методике с использованием в качестве граничных условий данных о напряженном состоянии на больших участках массива горных пород.

# 8.3.2. Определение напряженного состояния массива горных пород

В качестве исходных данных для определения напряжений в массиве горных пород использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных Уральским филиалом ВНИМИ в 1957—1958 гг. [70]. Наблюдательная станция на рассматриваемом участке была оборудована в 1957 г. Самообрушение налегающей толщи над выработанным пространством произошло в 1958 г. Контур зоны обрушения аппроксимируется эллипсом с параметрами a = 135 м, b = 97 м, R = 116 м, m = 0,164 (рис. 8.24). Горизонтальные сдвижения реперов, вызванные образованием зоны обрушения, приведены в табл. 8.7.

Приведены в гаол. о.г. Модуль деформации массива горных пород расчетной модели был принят равным 0,875·10<sup>4</sup> МПа по средневзвешенному коэффициенту крепости пород  $f_{ep} = 11$ . Коэффициент Пуассона, как и для других месторождений, принимался равным  $\mu = 0,3$ .

Имсвшиеся инструментальные данные позволили получить 85 вариантов определения напряженного состояния. Статистическая обработка всей совокупности результатов дает с надежностью 0,95



Рис. 8.24. Расчетная схема к определению напряжений на Гороблагодатском месторождении

226

#### Таблица 8.7

	I	П		11 111	
№ ренера	Горизонтальные сдвижения, 10 <sup>-2</sup> м	№ ренера	Горизонтальные сдвижения, 10-2 м	№ ренсра	Горизонтальные сдвижения, 10 <sup>-2</sup> м
4	0,00	6	0,00	8	0,00
5	0,50	7	0,20	9	0,30
6	0,30	8	0,20	10	0,50
7	0,30	9	0,80	11	1,40
8	0,70	10	0,90		
9	0,80	11	0,80		
10	0,80				
11	0,80				
12	0,90				

Относительные горизонтальные сдвижения реперов по профильным линиям I—III Гороблагодатского месторождения

следующие параметры напряжений:  $\sigma_1 = -5.3 \pm 0.7 \text{ MIIa}$ ,  $\sigma_2 = -17.9 \pm 2.3 \text{ MIIa}$ ,  $\alpha_{a_3} = 124^\circ$ . Эти значения напряжений использовались в качестве граничных условий для исследования деформаций в мульде сдвижения.

#### 8.3.3. Оценка деформаций земной поверхности в мульде сдвижения

Оценка деформаций земной поверхности проводилась по методике расчета тензоров деформаций, приведенной в разделе 3.3.2. Расчетная модель отображала состояние горных работ на завершающей стадии разработки гор. –80 м, расположенного на глубине 350—360 м от поверхности. Зона обрушения отображалась эллипсом с параметрами: a = 340 м, b = 180 м, R = 260 м, m = 0,31 (рис. 8.25).

Относительные деформации земной поверхности рассчитывались в точках, равномерно распределенных по территории мульды сдвижения. Результаты расчетов представлены на рис. 8.25 в виде изолиний главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , проведенных через 0,5·10<sup>-3</sup> (0,5 мм/м). В мульде сдвижения формируется сложная картина деформирования земной поверхности. На контуре зоны обрушения максимальная величина горизонтальных деформаций достигает 7 мм/м. С удалением от зоны обрушения деформации быстро убывают и на расстоянии, большем половины радиуса, не превышают критических значений для объектов первой категории охраны (2 мм/м).

Промплощадка шахты Южной находится в зоне умеренных растяжений, не превышающих 1,8·10<sup>-3</sup>. В районе железнодорожного



пути деформации достигают 5·10<sup>-3</sup>. Для подъездных железнодорожных путей критические деформации составляют 7·10<sup>-3</sup> [16]. В районе вагонного депо, расположенного в висячем боку месторождения, возникшие деформации имеют разные знаки и по величине не превышают  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ .

Углы сдвижения горных пород, отстраиваемые от фактических контуров горных работ к границам горизонтальных деформаций  $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ , составляют  $\gamma = \beta = 70^{\circ}$ ,  $\delta = 75^{\circ}$  и соответствуют нормативным, принятым по результатам инструментальных наблюдений.

Таким образом, расчетные данные свидетельствуют, что основные охраняемые объекты находятся в зонах с умеренными деформациями и не требуют дополнительных мер для обеспечения их сохранности.

# 8.3.4. Проблемы сдвижения горных пород в зоне совмещения открытых и подземных разработок и результатов внедрения исследований

В связи с принятым вариантом открытой разработки подкарьерного целика Южный борт Центрального карьера разносится в зону обрушения шахты Южной. Перекрытие областей ведения открытых и подземных работ создает специфические проблемы обеспечения безопасности открытых разработок [154]. В область совмещения открытых и подземных разработок попадают зоны влияния от современных подземных работ и от горных работ прошлых лет. Правилами допускается эксплуатация карьеров и ведение технологического комплекса открытых горных работ за пределами десятиметровой бермы от границы зоны обрушения и образования воронок.

Развитие Южного участка Центрального карьера, разрабатывающего подкарьерный целик, первоначально происходило за пределами зоны обрушения от горных работ на гор. +0 м (глубина 270 м). После завершения разработки на гор. 0 м открытые горные работы переместились до границ зоны обрушения гор. -80 м (см. рис. 8.23).

Кроме опасности образования воронок от современных подземных горных работ, открытая разработка в старой зоне обрушения сопряжена с опасностью встречи сохранившихся пустот. Нарушение равновесия вмещающих пород при выполнении работ в карьере может привести к образованию воронок и провалов. Для своевременного обнаружения и ликвидации пустот потенциально опасные участки на трех верхних горизонтах, где предполагалось наличие пустот, разбуривались разведочными скважинами. Особое внимание этим работам уделялось в районе выработанного пространства блоков лежачей пачки, находящегося под прослоями пустых пород, сохранивших устойчивость. Прогноз развития сдвижения над обнаруженными пустотами проводился по методике, приведенной в разделе 4.4. Приведенный комплекс мероприятий позволил безопасно провести разноску верхних уступов по потенциально опасным участкам.

Развитие Южного участка Центрального карьера и выход открытых работ в зону обрушения шахты создали благоприятные условия для сокращения затрат на транспортировку вскрыши за счет размещения ее в воронках зоны обрушения. Наблюдения за образованием первичных и, особенно, вторичных воронок обрушения показали, что угол воронкообразования составляет 85°. Установление и использование этого параметра позволило расширить зону отсыпки отвалов пустых пород в зону обрушения современных подземных горных работ с учетом состояния разработки в действующих очистных блоках.

Расчет деформаций земной поверхности, выполненный с использованием разработанных методик и привлечением данных о напряженном состоянии, позволил при незначительном объеме инструментальных наблюдений на месторождении оценить уровень деформаций в районах основных охраняемых объектов рудника. Внедрение мероприятий по безопасному ведению открытых горных работ в зоне обрушения шахты Южной продлило срок эксплуатации карьера не менее чем на 15 лет с годовой производительностью 1 млн т сырой руды. Одновременно разработанные мероприятия позволили производить отсыпку отвалов пустых пород в зоне обрушения шахты, что исключило отвод новых территорий под внешние отвалы и сократило транспортные расходы на перевозку вскрыши. Ежегодный объем отсыпки вскрыши в зону обрушения составил около 2 млн т.

#### Выводы

1. Длительное применение разработанных геомеханических моделей и методов расчета сдвижений горных пород на рудниках Урала подтвердило практическую ценность теоретических положений.

1.1. Доказана возможность и целесообразность разработки предохранительного барьерного целика и целика промплощадки с запасами, соответственно, 8,0 и 2,3 млн т руды, оставленных на шахте Северопесчанской в связи с аномальным выполаживанием углов сдвижения в районе промплощадки шахты. В настоящее время разработка их завершается. 1.2. Обоснована возможность продления срока службы железнодорожных путей, ЛЭП и городской больницы на Высокогорском РУ за счет обоснования изменений нормативных углов сдвижения, согласованных с Госгортехнадзором. Внедрение их в практику проектирования мер охраны указанных сооружений позволило предотвратить консервацию запасов в предохранительных целиках и поддержать производственную мощность шахты.

1.3. Установлена возможность и разработаны рекомендации по совместной разработке Гороблагодатского месторождения открытым и подземным способами на участке подкарьерного целика. Внедрение рекомендаций продлило срок работы карьера не менее чем на 15 лет при годовой производительности 1 млн т руды со складированием ежегодно до 2 млн т вскрыши карьера в зону обрушения шахты.

2. Обоснованные на ряде месторождений с применением теоретических положений значения угловых параметров процесса сдвижения вошли в действующие "Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана" (Утв. 2.08.90 г. Минметом СССР, согл. 21.06.90 г. Госпроматомнадзором СССР и 19.04.90 г. Госгортехнадзором КазССР).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Читателю, добравшемуся до заключительных страниц, автор, в знак признательности за внимание к изложенным выше взглядам на процесс сдвижения горных пород, намерен изложить в сжатой форме обобщающие соображения о роли и месте данной работы в процессе развития научных основ важнейшей проблемы горного дела.

Научную дисциплину сдвижения горных пород развивали крупнейшие ученые горных наук и выдающиеся специалисты горного дела в течение 150-летнего периода. На первой стадии это была плеяда европейских ученых — Туайе, Гоно, Шпарре, Дюмон, Гауссе, Ржиха и других, создавших целую серию теорий сдвижения горных пород. Все они в разной мере сохранили свои позиции в современных представлениях о закономерностях деформирования массива горных пород в области влияния горных разработок.

Основу отечественной школы сдвижения горных пород заложили П. М. Леонтовский, И. М. Бахурин, С. Г. Авершин, Д. А. Казаковский, создавшие капитальные работы по сдвижению горных пород, занимающие достойное место в ряду с аналогичными работами Г. Кратча и других зарубежных ученых. Это те титаны, на плечи которых вставали многие последователи, чтобы взглянуть дальше титанов, чтобы сделать очередной шаг в развитии важнейшей горной науки. К числу этих последователей относит себя и автор, опершийся на плечи Бригса, подчинившего "явления сдвижения горных пород теории сопротивления материалов"; И. М. Бахурина, усмотревшего "остатки тектонических напряжений в земной коре", которые "теоретически должны оказывать большое влияние на процесс сдвижения горных пород, возникающий под влиянием горных разработок"; С. Г. Авершина и Д. А. Казаковского, наделивших массив горных пород свойствами сплошной среды и увидевшими аналогию в развитии сдвижения горных пород на месторождениях со сходными условиями разработки. Критерием реальности теоретических положений во всех случаях выступали многочисленные результаты инструментальных наблюдений, ставшие нормой на многих предприятиях благодаря усилиям П. М. Леонтовского и И. М. Бахурина.

В этом аспекте данная работа представляет собой очередной закономерный шаг в развитии теории сдвижения горных пород, связывающий процесс сдвижения с формированием вторичного поля напряжений в области влияния подземной разработки. При этом автор реально оценивает многочисленные упрощения геомеханической модели процесса сдвижения в части наделения среды модели упругими однородными изотропными свойствами, в части отображения сложных реальных форм выработанных пространств и зон обрушения геометрически правильными фигурами и ряда других. Но это вопросы сегодняшнего и завтрашнего дней.

Сейчас в практику геомеханических исследований активно внедряются методы численного моделирования, методы конечных элементов, позволяющие в сочетании с компьютерными технологиями рассматривать массив горных пород как структурно неоднородную среду, наделенную разными характеристиками структурных блоков и их границ и другими особенностями, имеющими место в реальном горном массиве. Разработка и освоение этих методов повысит реальность прогнозных расчетов. Однако разработка и внедрение всего этого становится возможной и приобретает смысл лишь при обоснованном положительном ответе на главный вопрос - сущсствует ли однозначная взаимосвязь параметров процесса сдвижения с первоначальным напряженным состоянием и закономерностями формирования вторичного поля напряжений в области влияния подземных разработок? Утвердительный ответ о наличии этой взаимосвязи дает рассматриваемая работа. Насколько убедительно удалось представить этот ответ, будет судить читатель-коллега.

В связи с изложенным автор посчитал необходимым выпустить эту работу, несмотря на то, что в настоящее время вместе с Ю. А. Кашниковым готовится к изданию другая работа, включающая методы численного моделирования, новые способы инструментальных измерений параметров процесса сдвижения с применснием комплекса спутниковой геодезии GPS, позволяющие по-новому взглянуть на закономерности деформирования земной ловерхности и массива горных пород. Тем не менее, взаимосвязь процесса сдвижения с "остатками тектонических напряжений", с "положениями теории сопротивления материалов" должна быть закреплена вехами, и автор надеется, что одной из них послужит данная работа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Указиная для воршах ная на предната на п

1. Бахурин И. М. Сдвижение горных пород под влиянием горных разработок. — М. — Л.: Гостопиздат, 1946. — 229 с.

2. Леонтовский П. М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность. — Екатеринослав, 1912. — 320 с.

3. Stope cave and resulting of the Josephine mine // — Canadian mining J. — 1947. — V. 68. — N 1. — P. 10—12.

4. Сдвижение горных пород на рудных месторождениях / Кузнецов М. А., Акимов А. Г., Кузьмин В. И. и др. — М.: Недра, 1971. — 224 с.

5. Михеев Г. Ф. Прорывы глины в действующие выработки на шахтах Кузнецкого бассейна. — М. Углетехиздат, 1951. — 135 с.

6. Мельников Н. В. Горные инженеры — выдающиеся деятели горной науки и техники. — М.: Наука, 1970. — 170 с.

уки и Техники. — И... Паука, 1970. — 170. Котлов Ф. В. Оседание земной по-7. Тармонов И. В., Коноплянцев А. А., Котлов Ф. В. Оседание земной поверхности в связи с интенсивной откачкой подземных вод, эксплуатацией месторождений нефти и газа. Некоторые вопросы теории прогноза оседания. М.: ВИЭМС, 1965. — 61 с.

8. Напряженное состояние Юго-восточной части Германской Демократической Республики по результатам натурных исследований и данным о современных движениях земной коры / Кноль П., Банквитц П., Турм Х. и др. // Физ.техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. — 1978. — № 4. — С. 3—8.

9. Буланже Ю. Д., Певнев А. К. О состоянии и перспективах исследований современных движений земной коры на геодинамических полигонах СССР // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). — Новосибирск: Наука, СО, 1978. — С. 4—7.

 Корешков Н. А., Пискулин В. А., Райзман А. П. О состоянии и некоторых результатах геодезических работ на геодинамических полигонах Средней Азии // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). — Новосибирск: Наука, СО, 1978. — С. 4—7.

11. Острошко П. А., Антоненко Э. М., Атрушкевич П. А. Опыт изучения современных движений земной коры в Приалмаатинском сейсмическом районе // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). — Новосибирск: Наука, СО, 1978. — С. 4—7.

12. Певзиер М. Е., Дарыкина Т. А., Кононов В. В. Сдвижение горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых геотехнологическими способами // Горн. журн. — 1977. — № 4. — С. 61—63.

13. Авершин С. Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках. — М.: Углетехиздат, 1947. — 245 с.

14. Кратч Г. Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. — М.: Недра, 1978. — 494 с. 15. *Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.* Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1977. — 503 с.

16. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана: Утв. Минмет СССР 02.08.90. — Свердловск: ИГД Минмета СССР. — 1990. — 64 с.

17. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ при разработке меднорудных месторождений Урала: Утв. Минцветмет СССР 28.02.77. — М., 1978. — 43 с.

18. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне: Утв. Минчермет СССР 08.07.75. — Л.: ВНИМИ, 1975. — 67 с.

19. Методические указания по определению процесса сдвижения горных пород, охране сооружений и горных выработок на месторождениях цветных металлов. — Л.: ВНИМИ, 1974. — 66 с.

20. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород: Утв. Минцветметом СССР 30.06.86 г. Л.: ВНИМИ, 1986. — 74 с.

21. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной повсрхности при подземной разработке рудных месторождений: Утв. Госгортехнадзор СССР, 1986. — М.: Недра, 1988. — 113 с.

22. Shadbolt C. H. Mining subsidence — histirical review and state of the art. Large ground movements and structures // Proc. Conf., Cardiff, 1977. — London: Plymonth: Pentech Press, 1978. — P. 705—748.

23. Бахурин И. М. Состояние изученности сдвижений горных пород под влиянием подземных выработок // Труды совещания по управлению горным давлением. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1938. — С. 67—102.

24. Леонтовский П. М. Проект организации программы, плана и сметы работ по систематическому исследованию рудничных обрушений и оседаний пород и дневной поверхности и их последствий в Донецком и Криворожском бассейнах. — Харьков: Совет Съезда горнопромышленников Юга России, 1912. — 12 с.

25. Briggs H. Mining subsidence. London: Edvard Arnold and Co. 1929. – 215 p.

26. Казаковский Д. А. Сдвижение земной поверхности под влиянием горных разработок. — Москва—Харьков: Углетехиздат, 1953. — 228 с.

27. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях: Утв. Минуглепром СССР 29.12.79. — М.: Недра, 1981. — 288 с.

28. Шадрин А. Г. Теория и расчет сдвижений горных пород и земной поверхности. — Красноярск: Изд-во ун-та, 1990. — 199 с.

29. Руководство по расчету и проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. — М.: Стройиздат, 1977. — 141 с.

30. Subsidence engineers handbook. London: S. n., 1966. — 130 p. (National Coal Board — Production Department).

31. Вопросы расчета сдвижения поверхности под влиянием горных разработок / Будрих В., Литвиншин Е., Кноте С., Салустович А. — М.: Углетехиздат, 1956. — 64 с.

32. *Chrzanowski A., Faig W.* Ground subsidence determination in mining areas // Indian Mining and Engineering J. — 1982. — V. 21. — N 2—3. — P. 7—12.

33. *Авершин С. Г.* Расчет сдвижений горных пород. — Л. — М.: Металлургиздат, 1950. — 60 с.

34. Авершин С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. — М.: Углетехиздат, 1956. — 324 с.

35. Авершин С. Г. Новые вопросы сдвижения горных пород: Дис. ... д-ра техн. наук / ЛГИ. — Л., 1944. — 508 с.

36. Муллер Р. А. О некоторых дифференциальных и интегральных свойствах кривых оседаний и горизонтальных сдвижений мульды сдвижения // Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 20—23.

37. Шалгинов Н. Ф. Фигура выпуска сыпучей среды и сдвижение земной поверхности // Строительная механика и расчет сооружений. — 1982. — № 1. — С. 36—39.

38. Jstvan T. A Kozetmozgosmeres regresszios kiertekelese // Banjaszabies Kohaszabi Lapok. Banjaszat, — 1981. — T. 114. — N 7. — C. 455—463.

39. Временные правила охраны сооружений от вредного влияния подземных горных разработок на железорудных месторождениях Урала: Утв. Минчермет СССР 29.05.62. — Л.: ВНИМИ, 1962. — 31 с.

40. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на железорудных месторождениях Урала: Утв. Минчермет СССР 05.04.74. — Свердловск: Уральский филиал ВНИМИ, 1974. — 44 с.

41. Временные правила охраны зданий, сооружений, природных объектов и горных выработок от вредного влияния подземных горных разработок на золоторудных месторождениях: Утв. Роскомдрагмет 28.12.93. — Иркутск: ИРГИРЕДМЕТ, 1996. — 76 с.

42. Временные правила охраны сооружений от вредного влияния подземных горных разработок на железорудных месторождениях Горной Шории: Утв. Минчермет СССР 18.06.74. — Новокузнецк: ВостНИГРИ, Сибирский филиал ВНИМИ, 1974. — 45 с.

43. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне: Утв. Минчермет СССР 08.07.75. — Л.: ВНИМИ, 1965. — 67 с.

44. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород: Утв. Минмет СССР 30.06.86. — Л.: ВНИМИ, 1986. — 74 с.

45. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудных месторождениях с неизученным процессом сдвижения горных пород: Утв. Госгортехнадзор РСФСР 15.10.65. — Л.: ВНИМИ, 1966. — 61 с.

46. Кузнецов М. А. Прогнозирование углов сдвижения горных пород при подземной разработке рудных месторождений: Дис. ... канд. техн. наук. / ВНИ-МИ. — Л., 1970. — 218 с.

47. Общие методические положения комплексного исследования проблем горной геомеханики. Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ // Сборник трудов / ВНИМИ. — Л., 1970. — Вып. 81. — 333 с.

48. Кузнецов М. А., Громов В. В. Определение границ зон опасных сдвижений при разработке слепых залежей ограниченных размеров // Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 39—43. 49. Кузнецов М. А., Громов В. В. Условия разрушения свода естественного равновесия в толще пород и возникновения сдвижений земной поверхности // Охрана сооружений от вредного влияния горных работ и расчет устойчивости бортов угольных разрезов, — Л.: ВНИМИ, 1983. — С. 40—48.

50. Акимов А. Г., Смирнов А. Ф. Влияние трещиноватости массива на сдвижение горных пород при подземной разработке рудных месторождений // Сборник трудов / ВНИМИ. — Л., 1961. — Вып. 43. — С. 32—45.

51. Балелос Б. И., Генкин В. Н. Определение зон разрывов висячего бока при разработке рудных залежей в Криворожском бассейне // Горн. журн. — 1962. — № 12. — С. 25—27.

52. *Смирнов А.* Ф. Об углах разрывов при сдвижении горных пород на рудных месторождениях // Горн. журн. — 1976. — № 5. — С. 58—61.

53. Смирнов А. Ф. Предрасчет углов разрывов для условий Кривбасса // Горн. журн. — 1980. — № 1. — С. 52—54.

54. Кашников Ю. А. Сдвижение горных пород при подземной разработке мощных крутопадающих рудных тел сложной формы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / СГИ. — Свердловск, 1982. — 18 с.

55. Кашников Ю. А., Квочин В. А., Овчаренко В. Ф. О степени подработанности земной поверхности горными работами на рудных месторождениях // Изв. вузов. Горн. журн. — 1980. — № 9. — С. 42—46.

56. Кашников Ю. А., Квочин В. А., овчаренко В. Ф. Исследование влияния формы и размеров отработанных рудных тел на параметрах процесса сдвижения земной поверхности // Физ.-техн. пробл. разраб. полезных ископаемых. — 1982. — № 3. — С. 67—70.

57. *Palmer R. E.* Observation on ground movement and subsidence at Rio Tinto Mines, Spain // Transactions of the American institute of mining and metallurgical engineers: Year Book. — 1930. — P. 168—185.

58. Взаимосвязь сдвижений и деформаций земной поверхности с естественными напряжениями массива горных пород на Северопесчанском месторождении / Сашурин А. Д., Беркутов В. А., Бекселеев А. Ш. и др. // Горное давление, методы управления и контроля: Материалы Всесоюз. конф. по механике горных пород, Фрунзе, 3—5 октября 1978. — Фрунзе: Илим, 1979. — С. 255—261.

59. О мерах по охране центральных стволов шахты Северопесчанская от подработки / Сашурин А. Д., Беркутов В. А., Храмцов В. А., Бессольников П. Н. // Горн. журн. — 1979. — № 5. — С. 34—36.

60. *Сашурин А. Д.* Особенности сдвижения горных пород в условиях тектонических полей напряжений жслезорудных месторождений // Горн. журн. — 1980. — № 4. — С. 47—49.

61. Сишурин А. Д. Роль тектонических напряжений в развитии горизонтальных сдвижений горных пород // Диагностика напряженного состояния и свойств горных пород в массиве. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. — С. 105—108.

62. Сдвижение горных пород и земной поверхности при подземных разработках / Борщ-Компаниец В. А., Батугина И. М., Варлашкин В. М. и др. — М.: Недра, 1984. — 247 с.

63. Сашурин А. Д., Казиков А. М. Метод прогнозирования процесса сдвижения на железорудных месторождениях // Черная металлургия: Бюл. НТИ. — 1984. — № 6. — С. 44—46.

64. *Храмцов Б. А.* Сдвижение горных пород под влиянием подземных разработок рудных месторождений при выходе зоны обрушения на земную поверхность: Дис. ... канд. техн. наук / СГИ. — Свердловск, 1981. — 184 с. 65. Храмцов Б. А. Определение деформаций массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений // Вопросы рационализации маркшейдерской службы на горных предприятиях. — Свердловск: СГИ, 1983. — С. 3—6.

66. Исследование взаимосвязи процессов сдвижения горных пород с возникновением горных ударов на Таштагольском руднике / Квочин В. А., Шрепп Б. В., Бояркин В. И. и др. // Горн. журн. — 1981. — № 12. — С. 45—48.

67. Курленя М. В., Миренков В. Е. Методы расчета подземных сооружений. — Новосибирск.: Наука, 1986. — С. 232.

68. Кашников Ю. А. Анализ распределения напряжений и деформаций в подрабатываемых породах на основе расчетов по программе "FEST-03" // Горн. журн. — 1993. — № 12. — С. 45—48.

69. Курленя М. В., Миренков В. Е., Хан Г. Н., Шутов В. А. Метод расчета напряженно-деформированного состояния около очистных выработок // Физ.техн. проблемы разработки полезных ископаемых. — 1992. — № 6.

70. Обоснования к проекту правил охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на железорудных месторождениях Урала: Отчет о НИР / Уральский филиал ВНИМИ. Рук. Дьяковский В. Б. — Свердловск, 1971. — 43 с.

71. Исследовать сдвижение земной поверхности, вызываемое подземной добычей железных руд, и выдать рекомендации проектным организациям для обоснования построения охранных целиков охраняемых поверхностных сооружений по рудникам Северного Урала: Отчет о НИР/ИГД Минчермета СССР. Рук. Сащурин А. Д. № ГР 007021. Инв. № Б225659. — Свердловск, 1972. — 83 с.

72. Исследование сдвижения земной поверхности, вызываемого подземной добычей железных руд по рудникам Среднего и Южного Урала: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 73016204, Инв. № Б287557. — Свердловск, 1973. — 107 с.

73. Исследование сдвижения земной поверхности, вызываемого подземной добычей железных руд и выдача рекомендаций проектным организациям для обоснования построения охранных целиков охраняемых поверхностных сооружений (по рудникам Казахстана): Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 74006176, Инв. № БЗ64910. — Свердловск, 1974. — 61 с.

74. Анализ эффективности мер охраны промышленных и природных объектов и разработка рекомендаций по сокращению законсервированных запасов руд в предохранительных целиках на подземных предприятиях Минчермета СССР (Урало-Казахстанский регион): Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 018400400742, Инв. № 02850066399. — Свердловск, 1985. — 72 с.

75. Обоснование и разработка правил охраны земельных ресурсов и сооружений от вредного влияния горных разработок на предприятиях Урала и Казахстана: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 01860074778. Инв. № 02880073954. — Свердловск. — 1988. — 84 с.

76. Авершин С. Г. Расчет сдвижений горных пород. — Л. — М.: Металлургиздат: 1950. — 60 с.

77. Авершин С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. — М.: Углетехиздат, 1956. — 324 с.

78. Акимов А Г. Определение величин угловых параметров сдвижения на рудных месторождениях // Горн. журн. — 1965. — № 2. — С. 57—62.

79. Акимов А. Г., Смирнов А. Ф. Влияние трещиноватости массива на сдвижение горных пород при подземной разработке рудных месторождений // Сборник трудов / ВНИМИ. — Л., 1961. — Вып. 43. — С. 32—45. 80. *Влох Н. П., Сашурин А. Д.* Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. — М.: Недра, 1970. — 124 с.

81. Влох Н. П., Сашурин А. Д. Управление горным давлением на железных рудниках. — М.: Недра, 1974. — 184 с.

82. Влох Н. П., Сашурин А. Д., Зубков А. В. Напряженное состояние горных пород рудных месторождений Урала // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). — М.: Наука, 1973. — С. 87—106.

83. Сашурин А. Д. Измерение напряженного состояния массива крепких горных пород на больших базах // Измерение напряжений в массиве горных пород: Ч. І. — Новосибирск; ИГД СО АН СССР, 1976. — С. 106—111.

84. Сашурин А. Д., Храмцов Б. А., Саин В. А. Напряженное состояние массива горных пород некоторых рудных месторождений Урало-Казахстанского региона // Напряженное состояние породных массивов. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. — С. 71—75.

85. Исследование структуры поля напряжений в крепких горных породах и ее влияние на результаты натурных измерений / Сашурин А. Д., Влох Н. П., Зубков А. В. и др. // Измерение напряжений в массиве горных пород (Материалы III семинара, Новосибирск, 27 сентября — 2 октября 1971 г.). — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972. — С. 136—140.

86. Марков Г. А., Козырев А. А., Иванов В. И. Об оценке изменчивости величин и направлсний напряжений в массиве горных пород // Измерение напряжений в массиве горных пород (Материалы III семинара, Новосибирск, 27 сентября — 2 октября 1971 г.). — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972. — С. 103—107.

87. Распределение напряжений в породных массивах / Крупенников Г. А., Филатов Н. А., Амусин Б. З., Барковский В. М. — М.: Недра, 1972. — 144 с.

88. *Казикаев Д. М.* Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. — М.: Недра, 1981. — 288 с.

89. Ржевский В. В. Методические указания по расчетам давления горных пород. — М.: МГИ, 1981. — 23 с.

90. Штофф В. А. Моделирование философии. — М. — Л.: Наука, 1966. — 301 с.

91. Whittaker B. N. Pye J. H. Ground movements associated with the near — surface construction operations of a mine drift in coal meassures strata // international J. of Rock Mechanics and Mining sciences and Geomechanies Abstracts. — 1977. — V. 14. — N 2. — P. 67—75.

92. Исследование сдвижения горных пород на шахте Северопесчанская: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 74059573, Инв. № Б546386. — Свердловск, 1976. — 158 с.

93. Исследование закономерностей процесса сдвижения горных пород и разработка мероприятий по охране основных подземных и поверхностных объектов на рудниках НТМК: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 75034697, Инв. № Б625816. — Свердловск, 1977. — 73 с.

94. Исследование возможности извлечения и выбор системы для разработки барьерного целика на шахте Северопесчанская: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Зубрилов Л. Е., Сашурин А. Д. № ГР 77011791, Инв, № Б763524. — Свердловск, 1979. — 94 с.

95. Исследование закономерностей сдвижения массива горных пород на Лебяжинском, Естюнинском, Гороблагодатском и Валуевском железорудных месторождениях: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Сашурин А. Д. № ГР 78006200, Инв. № Б891778. — Свердловск, 1980. — 91 с.

96. Большаков В. Д., Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений. — М.: Недра, 1977. — 367 с.

97. Лехницкий С. Г. Теория Упругости анизотропного тела. — М.: Наука, 1977. — 416 с.

98. Сашурин А. Д., Храмцов Б. А. Экспериментально-аналитический метод измерения напряжений больших участков горного массива // Подземная добыча руд черных металлов. — Кривой Рог: НИГРИ, 1978. — С. 40—44.

99. Сашурин А. Д. Явления изостазии при разработке месторождений полезных ископаемых // Приложение результатов исследований полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. — Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1985. — С. 27—31.

100. Ржевский В. В. К проблеме расчета давления горных пород // Горн. журн. — 1982. — № 5. — С. 49—52.

101. Ржевский В. В. О научных основах расчетов давления горных пород: Ч. 1—11 // Изв. вузов. Горн. журн. — 1982. — № 6. — С. 1—9. — № 7. — С. 1— 10.

102. Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород. — М.: Наука, 1975. — 212 с.

103. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1978. — 390 с.

104. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. — М.: Наука, 1967. — 106 с.

105. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. — М.: Недра, 1970. — 160 с.

106. Anderson D. T. Semi-quantitative geological intepretation of photolineaments // Canadian Mining J. — 1977. — V. 98. — N 6. — P. 50—52.

107. Тер-Микаэлян К. Л. Некоторые методы и результаты статических исследований деформационных свойств скальных оснований // Труды / Гидропроект. — М. — Л., 1966. — Вып. 14. — С. 218—238.

108. Тер-Микаэлян К. Л. О связи удельного коэффициента отпора и модуля деформации горных пород с коэффициентом крепости по Протодьяконову // Труды / Гидропроект. — М., 1974. — Вып. 33. — С. 118—122.

109. Роза С. А. Механика грунтов. — М.: Знание, 1962. — 434 с.

110. Островский А. Е. Деформации земной коры по наблюдениям наклонов. — М.: Наука, 1978. — 184 с.

111. Динник А. Н. Применение теории упругости к решению задач, относящихся к проблеме управления кровлей // Материалы к совещ. по проблеме управления кровлей. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1937. — С. 11—24.

112. Авершин С. Г. Возможность аналитических исследований проявлений горного давления и область их целесообразного применения // Математические методы в горном деле. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1963. — С. 3—15.

113. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. — М.: Углетехиздат, 1952. — 384 с.

114. Руппенейт К. В. Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов. — М.: Углетехиздат, 1957. — 288 с.

115. Руппенейт К. В., Либерман Ю. М. Введение в механику горных пород. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 356 с.

116. Докукин А. В., Чирков С. Е., Норель Б. К. Моделирование предельнонапряженного состояния угольных пластов. — М.: Наука, 1981. — 149 с. 117. Гупта X, Растоги Б. Плотины и землетрясения. — М.: Мир, 1979. — 251 с.

118. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1979. — 388 с. 119. Руппенейт К. В. Деформируемость массивов трещиноватых пород. — М.: Недра, 1975. — 223 с.

120. Исследование характера деформаций обводненной толщи пород и разработка мероприятий по обеспечению сохранности стволов и сооружений подъемного комплекса Соколовского подземного рудника: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Беркутов В. А. № ГР 79016520, Инв. № 02812000950. — Свердловск, 1981. — 111 с.

121. Brown E. T., Hoek. Trends in relationships between measured in situ stresses and derth // International J. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. — 1978. — V. 15. — N 4. — P. 211—215.

122. Напряженное состояние земной коры по данным измерений в горных выработках и тектонофизического анализа / Гзовский М. В., турчанинов И. А., Марков Г. А. и др. // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). — М.: Наука, 1973. — С. 32—49.

123. Булин Н. К. Некоторые выводы из анализа измерений естественных напряжений в подземных горных выработках // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). — М.: Наука, 1973. — С. 168—178.

124. Сашурин А. Д., Силаева О. И., Сашурин А. А. Флуктуация естественного поля напряжений верхней части земной коры // Х Международная конференция по механике горных пород 27.09—01.10.1993. — М.: — 1993. — С. 27.

125. Сашурии А. Д. Напряженное состояние верхней части земной коры // Всероссийская конференция "Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых" 23.05—25.05.1994. — Новосибирск — Екатеринбург, 1994. — С. 43—44.

126. Сашурин А. Д. О параметрах первого инварианта напряженного состояния верхней части земной коры // Первый международный семинар "Напряжения в литосфере" (глобальные, региональные, локальные). — М., 1994. — С. 162.

127. Сашурин А. Д. Явления изостазии при разработке месторождений полезных ископаемых // Приложение результатов исследований полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. — Апатиты: Кольский филиал А. СССР, 1985. — С. 27—31.

128. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. — М.: Высшая школа, 1961. — 437 с.

129. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные уравнения. Плоская теория упругости. Кручение и изгиб. — М.: Наука, 1966. — 707 с.

130. *Ржевский В. В.* Методические указания по расчетам давления горных пород. — М.: МГИ, 1981. — 23 с.

131. Сашурин А. Д., Беркутов В. А. Определение границ зоны трещин при подземной разработке месторождений с крепкими вмещающими породами // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. — 1979. — № 1. — С. 9—15.

132. Газиев Э. Г., Эльварес Майораль С. Методы расчета устойчивости скальных откосов // Труды / Гидропроект. — М., 1974. — Вып. 33. — С. 31—41.

133. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. — Л.: ВНИ-МИ, 1972. — 165 с.

134. Сашурин А. Д., Казаков А. М. Сдвижение горных пород в условиях тектонических полей напряжений на рудных месторождениях // Изменение напряженно-деформированного состояния и свойств пород в массиве при отработке месторождений полезных ископаемых. — Апатиты: Кольский филиал А. СССР, 1985. — С. 31—35.

135. Сашурин А. Д. Управление сдвижением массива горных пород на основе экспериментальных данных о первоначальных напряжениях // Геомеханическая интерпретация результатов натурного эксперимента. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. — С. 17—21.

136. Сашурин А. Д., Казаков А. М. Проявления тектонического поля напряжений на Сарановском хромитовом месторождении // Геомеханическая интерпретация результатов натурного эксперимента. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. — С. 50—54.

137. Сашурин А. Д. Особенности сдвижения горных пород в условиях тектонических полей напряжений железорудных месторождений // Горн. журн. — 1980. — № 4, — С. 47—49.

138. Сашурил А. Д., Храмцов Б. А., Саин В. А. Напряженное состояние массива горных пород некоторых рудных месторождений Урало-Казахетанского региона // Напряженное состояние породных массивов. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. — С. 71—75.

139. Сашурин А. Д., Храмцов Б. А. Результаты применения мстода измерения напряжений массива крепких горных пород на больших базах // Измерение напряжений в массиве горных пород: Ч. П. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976. — М.: — Статистика, 1975. — 328 с.

141. Sashourin A. D., Bahayanz G. M. Diskrete nature of rock mass deformation // Rock at great depth. international simposium. — Pau. 1989. — Balkema / Rotterdam. — 1989. — P. 495—496.

142. Sashourin A. D. Estimation of untergraund mining effects on mine structures in case of a discrete deformation of rock mass // Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering. International Simposium. Istanbul. 1993. — Balkema Rotterdam / Brookfield. — 1993. — P. 849—851.

143. Петухов И. А., Чепенко А. П. Учет дискретности процесса сдвижения при прогнозировании деформаций земной поверхности // Сдвижение земной поверхности и устойчивости откосов. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 10—17.

144. Абельсеитов К. Б. Определение оптимальной длины интервала наблюдений при дискретном характере процесса сдвижения // Сдвижение земной поверхности и устойчивости откосов. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 18—19.

145. Абельсентов К. Б. Методика оценки неравномерностей в распределении деформаций земной поверхности при подземной разработке угольных месторождений // Сдвижение горных пород и охрана сооружений при открытой и подземной разработках месторождений полезных ископаемых Центрального Казахстана. — Караганда: КазПТИ, 1981. — С. 78—82.

146. Романовский В. И. Применение математической статистики в опытном деле. — М. — Л.: Гостехиздат, 1947. — 247 с.

147. Основные вопросы горного давления при разработке слепых рудных тел и методика их исследования: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Влох Н. П. № ГР 79010316, Инв. № Б113074. — Свердловск, 1970. — 159 с. 148. Исследование напряженности горного массива и изыскание методов ликвидации пустот на гор. –80 м Северопесчанского месторождения: Отчет о НИР / ИГД Минчермета СССР. Рук. Влох Н. П. № 69010316, Инв. № Б033936. — Свердловск, 1969. — 77 с.

149. Обоснование и внедрение нормативных углов сдвижения для глубоких горизонтов Северо-Песчанского месторождения: Отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР: в 2 т. Рук. Сашурин А. Д. № ГР01850059773, Инв. № 02850059074. — Свердловск, 1985. — 176 с.

150. Бессольников П. Н., Сашурин А. Д. Выбор места заложения стволов и других сооружений при разработке мощных крутопадающих железорудных месторождений // Горн. журн. — 1978. — № 11. — С. 45—46.

151. Силаева О. И., Пономарев А. В., Сашурин А. Д. Геофизический мониторинг массива горных пород на Северопесчанской шахте // Горная геофизика, Ч. I V Международный семинар, 1993. — Тбилиси: 1989. — С. 39—42.

152. А. с. 1190040 СССР, МКИ<sup>4</sup> Е 21 С 41/06. Способ управления процессом сдвижения горных пород под охраняемыми объектами / Сашурин А. Д., Беркутов В. А., Драсков В. П. (СССР). — № 3721558/22-03; заявлено 27.12.83; опубл. 07.11.85, Бюл. № 41 // Открытия. Изобретения. 1985. — № 41. — С. 57.

153. Дьяковский В. Б., Чернышев М. Ф., Паздников Н. В. Экспериментальные исследования напряженности горного массива на Высокогорском и Кочкарском месторождениях // Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). — М.: Наука, 1973. — С. 107—119.

154. Казикаев Д. М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. — М.: Недра, 1981. — 288 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

.

#### Измеренные напряже-Расчетные напряжения, МПа ния, МПа Глубина Литерагоризон-Рсгион, рудник измерегоризонтурный всртивертитальные ния *Н*, м источник тальные кальные кальные (боковой средние σ, $\gamma_{\rm M}H$ pacnop) $1/2(\sigma_1 + \sigma_2)$ $\eta \gamma_{\mu} \dot{H}$ Австралия -9.7 CSA mine, Cobar 360 -16.6-24,2-4.0[121]-8,0 -9.7-4.0360 -10.4То же 540 -15,2-25.8-14.6-5.9" " 330 -10.0-14.0-8,9-3.6" -5,0455 -11,0 -20,9 -12,3" 245 -8.4-17.6-2.7-6.6" -7,0 633 -13.7-27.4-17,1" NBHC mine, Broken Hill 1022 -6.2-10.3-27.1-11.2" -13.8-16.1 -18.0-7.3688 ٤, -18.0-7.3 668 -4.8 -13.1٤٢ -15.4570 -15,9 -21.0-6,3ZC mine, Broken Hill -20.0-22.1-9.0" 818 -21.4" 818 -26.9-31.5-22,1-9.0" NBHC mine, Broken Hill 915 -13.1-16.9-24.7-10.044 915 -21,4-20,8-24.7-10,0766 " -9.7-18.0-20.7-8.4٤، 570 -14.7-21,0-15,4-6.3٤4 570 -12,7-26,5-15,4-6,3٤٢ -20.3-34.9 -22.1-9.0 818 " -31,2 -18,1-7,4670 -13,0" 1277 -19.2-30.7-34.5-14.0" -6.9-30.8-12,21140 -16.644 -25.5-29.6-12.01094 -20.9" 1094 -15.9 -28.8-29.6-12.0" -18.6-30.1-29,6 -12.01094 " -26.9-36.0-29.6-12.01094 1140 -29.7-42.5-30.8-12.2" " 1423 -24.2-36.5-38,5-15,4" Mount Isa mine 664 -19.0-15.8-17.9-7.2-29.5" 1089 -16.5-20.8-12.044 -24.81025 -28.5-27.7-11,3" 970 -25.4-21,6-26,2-10,6Warrego Mine, Tennant " Creek 245 -7.0-16.8-6.6-2.7" 245 -6.8-12,2-6.6-2.7

## Эмпирические и расчетные данные о напряженном состоянии массива горных пород

Продолжение приложения I

		Измеренные напряже- ния, МПа		Расчетные напряже- ния, МПа		
Регион, рудник	Глубина измере- ния <i>Н</i> , м	верти- калыные σ <sub>z</sub>	горизон- тальные средние 1/2 ( $\sigma_1 + \sigma_2$ )	верти- кальные ү <sub>м</sub> Н	горизон- тальные (боковой распор) цү <sub>м</sub> Н	Литера- турный источник
Kanmantoo	322	-11,5	-14,9	8,7	-3,5	"
Mount Charlotte Mine	58 92 152 152	-2,5 -11,2 -10,4 -7,9	-8,3 -16,2 -14,7 -11,3	-1,6 -2,5 -4,1 -4,1	0,6 1,0 1,6 1,6	66 66 66
Durkin mine, Kambalda	87	-7,4	-16,3	-2,4	-1,0	"
Dolphin mine, Kings ls.	75	-1,8	-3,2	-2,0	-0,8	
Poatina	160	8,5	-14,5	-4,3	-1,7	
Cethana	90	-14,0	-18,9	-2,4	-1,0	**
Gordon Riever	200	-11,0	-23,1	5,4	-3,1	
Mount Lyell	105	-11,3	-33,3	-2,8	-1,2	
Windy Creek, Snowy Mts	300	-12,4	-13,2	-8,1	-3,3	"
Tumut 1 Power Station, Snowy Mts.	335	-11,0	-13,2	-9,1	-3,7	
Tumut 2 Power Station, Snowy Mts.	215	-18,4	-22,1	-5,8	-2,3	"'
Eucumbene Tunnel, Snowy Mts.	365	-9,5	-24,7	-8,8	-4,0	"
		Кана	да			
GW Mac Leod Mine, Wawa	370 370 575 575 480 575	-16,6 -15,1 -21,5 -14,6 -18,7 -26,6	-20,7 -38,4 -26,4 -18,3 -28,8 -40,4	-10,0 -10,0 -15,5 -15,5 -13,0 -15,5	-4,1 -4,1 -6,3 -6,3 -5,3 -6,3	66 66 66 66 66
Wawa	345	-20,0	-50,0	-9,3	-3,8	"
Elliot Lake	310 705 400	-11,0 -17,2 -17,2	-28,1 -29,2 -32,7	8,4 19,0 10,8	-3,4 -7,8 -4,1	دد دد

Расчетные напряже-Измеренные напряжения, МПа ния, МПа Глубина Литерагоризонтурный горизон-Регион, рудник измеревертитальные вертиния *Н*. м тальные источник калывые (боковой . кальные средние  $\gamma_{M}H$ pacnop) ηγ<sub>ν</sub>Η  $\sigma_z$  $1/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$ " -7,8 Churchill Falls 300 -13,2-8,1-3,3 -9,7 -1,5 " -6,8 Portage Mountain 137 -3,7" 220 -6,9 -10.4-5,9 -2,4Mica Dam США -21,0 " 1910 -43,5 -45,2 -51,5 Randeley " 380 -7,0-10,2-4,1 Nevada Test Site -6,3" -8,2-7,4 -8,3-3,3Fresno 300 " 230 -6,2-19,3 -6,2 -2,5Bad Creek " -1,5 Montello 136 -3.5-11.5-3,7-5,5 -12,7 " 500 -7.9 -13.5Alma -21,9-8.9 " 810 -14.1-17,6 Falls Township " -7,3 Winnfield 270 -5,5 -5,2 -3,044 Barbeton 830 -24,0 -46,5 -22.4-9,1 Silver Summit Mine, " 1670 -56,7 -71,4 -40.0-18.4Osburn " 1720 -37.9 -22.7 -46,4 -18,9Star minc, Burke " Crescent mine 1620 -40,3 -47,2 -43,7 -17.8" -6,9 625 -18.1 -10.1-16,9Red Mountain -8,7 " -24,2 -21,3-29,7 Henderson mine 790 " -30,5 -12,41130 -29,6 -29,0 " 400 -9.8-7.8 -10,8Piccance Basin -4,4 " -30,8 -49,2 Gratiot County 2806 -63,1-76,0 Скандинавия " -6,0 -2,2 Bleikvassli mine 200 -11.5-5,4 ... --2,8 250 -7.0 -6,3-14.0 -0,8 " " 70 -2,8-13.0 -2,1Bidjovagge mine " -2,7 -2,7 Bjornevann 100 -15,0-1,1

Продолжение приложения I

#### Продолжение приложения І

Продолжение приложения 1

		Измерсиные напряже- ния, МПа		Расчетные напряже- ния, МПа		
Регион, рудник	Глубина измере- ния <i>Н</i> , м	всрти- кальные σ <sub>z</sub>	горизон- тальные средние 1/2 (σ <sub>1</sub> + σ <sub>2</sub> )	верти- кальные ү <sub>м</sub> Н	горизон- тальныс (боковой раснор) ηү <sub>м</sub> Н	Литера- турный источник
Sulitjelma	850 900	-10,0 -11,0	-9,9 -6,1	-23,0 -24,0	9,4 9,9	••
Ställberg	915	-24,7	-38,5	-24,7	-10,0	**
Vingesbacke	400	-10,8	-53,9	-10,8	4,4	"
Laisvall	220	-5,9	-21,9	-5,9	-2,4	"
Malmberget	500	-13,4	-32,3	-13,5	-5,5	
Grangesberg	400	-10,8	-24,9	-10,8	-4,4	"
Kiruna	680	-18,4	-34,9	-18,4	-7,5	**
Stalldalen	690 900	-18,6 -24,3	-27,3 -49,0	-18,6 -24,3	-7,6 -9,9	
Hofors	470 650	-12,7 -17,6	-34,8 -39,6	-12,7 -17,6	-5,2 -7,2	••
	н	Ожная А	фрика			
Shabani mine	350	-10,7	-15,6	-9,4	-3,9	"
Kafue Gorge	160 400	-7,5 -12,5	-11,8 -20,0	-3,3 -10,8	-1,7 -4,4	"
Ruacana	215	-4,0	-7,8	-5,8	-2,3	
Drakensberg	110	-3,0	7,5	-2,9	-0,8	"
Braken mine	508	-13,9	-13,7	-13,7	-5,6	"
Winkelhaak mine	1226	-38,4	-31,4	-33,1	-13,1	"
Kinross mine	1577	-49,5	-31,6	-42,5	-17,3	"
Doornfontein mine	1320	-39,0	-18,7	-35,6	-14,5	
Harmony mine	1500	-33,1	-16,2	-40,5	-16,5	
Durban Roodeport Deep mine	2300 2500	68,5 59,0	45,9 60,2	-62,0 -67,5	-25,3 -27,5	در در
East Rand mine	2400	-37,4	-26,9	-64,8	-26,4	"
Prieska Copper mine	279 410	-8,8 -9,6	12,4 9,7	7,5 -11,1	-3,0 -4,5	

PERSONAL PROPERTY AND INCOMENTS Измеренные напряже-Расчетные напряжения, МПа ння, МПа Литера-Глубина горизонтурный измерегоризон-Регион, рудник тальные вертивертиния *Й*, м тальные источник кальные (боковой кальные средние  $\gamma_{\mu}H$ pacuop) σ,  $1/2(\sigma_1 + \sigma_2)$  $\eta \gamma_{\mu} H$ " Westwm Deep Levels mine 1770 -45.6 -28.7-47,7 -19,42320 -58,5 -62,6 " Doornfontein mine -31,6 -25,5 Другие районы Dinorwic, Великобрита--11,5 -6,8 -2,8 44 250 -9,0 ния 44 1800 -48,6 -48,6 -19,8 -48,6 Mont Blanc, Франция 64 360 -8,3 -16,2-9.7 -3.9 ldikki, Индия Woh, Камерун, Малай-٤6 296 -10,6 -10.9-8,0-3.3зия 203 -5,4 -5,2-5.5-2,2 44 Reykjavik, Исландия " 285 -7,7 -3.1-7.6 -5,7 \_\_\_\_\_\_ -7.0 44 350 -9.3 -3,8-9,4 375 " -4,1 -10,0-6,4-10,1CCCP Росвумчорский рудник, [122] 100 -40,0 -3,0-1,3-23.0Хнбины Росвумчорский рудник, 600 -18,0 -46,5 -18,0 -7.8То же Хибины Кировский рудник, " Хибины 100 -3.0-23,0-3.0-1.3Кировский рудник, 44 Хибины 300 -9.0 -25.5-9,0-3,9 Таштагол, Горная Шо-" 410 -12,0 -20,0-12,0-5,2 рия " -28,5 -15,0-6,5То же 550 -15.0" -20,5-3,9 То же 340 -9.0-9,0-7,5 --3,2 56 Джезказган, Казахстан -7.0-34,5240 Зыряновский рудник, -3.5 ... 150 -8.5-2.0-1.5Алтай Шахта им. Губкина,

250

KMA

-6.2

-10.5

44

-6.5

-2,8

I INFILL CONTINUES

#### Окончание приложения 1

		Измеренные напряже- ния, МПа		Расчетные напряже- ния, МПа			
Регион, рудник	Глубина измере- ния <i>Н</i> , м	верти- кальные σ <sub>z</sub>	горизон- тальные средние 1/2 (σ <sub>1</sub> + σ <sub>2</sub> )	верти- кальные ү <sub>м</sub> Н	горизон- тальные (боковой распор) ηү <sub>м</sub> Н	Литера- турный источник	
Шахта Северопесчанс- кая, Урал	300	-7,0	-8,9	-8,1	-3,5	[81, 82]	
Шахта Южная, Урал	170	-14,6	-20,6	-4,6	-2,0	То же	
Шахта Валуевская, Урал	60	-2,9	-3,5	-1,6	-0,7	٠.	
Шахта Магнетитовая, Урал	370	-1,0	-4,3	-10,0	-4,3		
Шахта Эксплуатацион- ная, Урал	300	-6,9	-11,6	-8,1	-3,5		
Березовский рудник, Урал	300	-16,1	-23,6	-8,I	3,5	**	
Дегтярский рудник, Урал	430	6,0	-20,0	-11,6	-5,0		
Карабашский рудник, Урал	700	-16,0	-10,1	-18,9	-8,1		
Вишнегорский рудник, Урал	135	-12,5	-18,3	-3,6	-1,5	"	
Миндякский рудник, Урал	250	-0,9	-5,5	-6,8	-2,9	"	
Кочкарский рудник, Урал	300	-9,5	-28,3	-8,1	-3,5	"	

#### THE REPORT AND A CONTRACT OF THE

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 2

#### Теоретические и инструментально измеренные горизонтальные сдвижения реперов паблюдательной станции па земной поверхности шахты Северопесчанская за 1974—1982 гг.

Профильная	Теоретически	Теоретические полные сдвижения реперов по профильной линии, 10 <sup>-2</sup> м Сдвижения реперов профильно нии относительно опорного, 1			ров профильной ли- но опорного, 10 <sup>-2</sup> м
ренер	$\Delta_{82}$	$\Delta_{74}$	Δ <sub>82-74</sub>	теоретические <sub> ст</sub>	инструментальные, октябрь 1982 г., ζ <sub>и</sub>
6, III IV 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	-9,86 -9,82 -9,76 -9,43 -9,77 -9,71' -9,68 -9,56 -9,32 -8,97 -8,89 -8,51 -8,10 -7,70 -7,52	$\begin{array}{c} -5,21\\ -4,83\\ -4,04\\ -3,60\\ -3,12\\ -2,31\\ -1,80\\ -1,25\\ -0,40\\ 0,47\\ 1,32\\ 2,48\\ 3,53\\ 4,52\\ 5,22\end{array}$	-4,65 -4,99 -5,72 -5,83 -6,65 -7,40 -7,88 -8,31 -8,92 -9,44 -10,21 -10,99 -11,63 -12,22 -12,74	$\begin{array}{c} 0,00\\ -0,34\\ -1,07\\ -1,18\\ -2,00\\ -2,75\\ -3,23\\ -3,66\\ -4,27\\ -4,79\\ -5,56\\ -6,34\\ -6,98\\ -7,57\\ -8,09 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,00\\ 0,40\\ 2,10\\ 2,30\\ 2,70\\ 3,70\\ 4,70\\ 5,40\\ 7,10\\ 8,60\\ 9,20\\ 11,40\\ 12,40\\ 14,30\\ 15,90 \end{array}$
6 13 21 22 23 24 25 26 27 28	-22,36 -24,12 -25,50 -26,91 -29,20 -30,66 -32,36 -34,72 -35,99	-19,99 -21,17 -22,33 -23,42 -24,41 -26,65 -26,56 -27,34 -28,46	-2,37 -2,95 -3,17 -3,49 -4,79 -4,01 -5,80 -7,38 -7,53	$\begin{array}{r} 0,00\\ -0,58\\ -0,80\\ -1,12\\ -2,42\\ -1,64\\ -3,43\\ -5,01\\ -5,16\end{array}$	$\begin{array}{c} 0,00\\ -0,60\\ 0,60\\ 0,60\\ 0,30\\ -1,60\\ -4,00\\ -4,20\\ -7,10\\ \end{array}$
15, 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16 17 17 18 19	-14,11 -14,31 -14,43 -14,68 -14,52 -14,66 -14,53 -14,45 -14,55 -14,60 -14,44 -16,13 14,27 -15,48 -15,32 -15,39	-16,87 -17,28 -17,69 -18,21 -18,50 -18,84 -18,96 -19,29 -19,20 -19,20 -19,21 -19,26 12,81 10,03 -21,24 -21,22 -21,28	2,76 2,97 3,26 3,53 3,98 4,18 4,43 4,65 4,71 4,82 3,32 4,24 5,76 5,90 5,89	0,00 0,21 0,50 0,77 1,22 1,42 1,67 2,08 1,89 1,85 2,06 2,06 2,98 2,98 2,98 3,12 3,11	$\begin{array}{c} 0,00\\ 1,80\\ 2,20\\ 3,40\\ 4,70\\ 4,80\\ 7,40\\ 7,80\\ 7,80\\ 7,80\\ 7,90\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,70\\ 9,40\\ 10,60\\ \end{array}$

253

.

.

Профильная	Теоретические	е полные сдвиже	Сдвижения реперов профильной ли-		
линия.	прос	рильной линии, 1	нии относительно опорного, 10 <sup>-2</sup> м		
репер	$\Delta_{82}$	$\Delta_{74}$	$\Delta_{82-74}$	теорстические <sub> ζτ</sub>	инструментальные, октябрь 1982 г., ζ <sub>и</sub>
15,IX	-8,87	-11,89	3,02	0,00	0,00
X	-8,70	-12,09	3,39	0,37	1,10
39	-8,12	-11,87	3,75	0,73	1,60
38	-7,75	-11,65	3,90	0,88	2,10
37	-7,34	-11,45	4,11	1,09	4,60
36	-6,94	-11,19	4,25	1,23	5,30
35	-6,28	-10,62	4,34	1,32	7,00
34	-5,45	-9,37	3,92	0,90	8,10
12,VIII VII 42 41 40 39 38 37 36 35 34 33	-13,41 -13,91 -14,08 -14,39 -14,60 -14,81 -14,75 -14,78 -14,78 -14,70 -14,19 -13,69 -11,62	-14,80 -15,68 -16,36 -16,86 -17,82 -18,66 -19,44 -20,15 -21,05 -21,84 -22,48 -22,98	1,39 1,77 2,28 2,47 3,22 4,15 4,69 5,37 6,35 7,65 8,79 11,36	$\begin{array}{c} 0,00\\ 0,38\\ 0,89\\ 1,08\\ 1,83\\ 2,76\\ 3,30\\ 3,98\\ 4,96\\ 6,26\\ 7,40\\ 10,97\end{array}$	$\begin{array}{c} 0,00\\ 1,10\\ 1,60\\ 3,70\\ 4,60\\ 5,20\\ 6,70\\ 7,20\\ 8,80\\ 9,90\\ 10,10\\ 12,00\\ \end{array}$
12, 5	-15,78	-15,98	0,20	0,00	0,00
6	-16,06	-16,31	0,25	0,05	0,90
7	-16,34	-16,78	0,44	0,24	2,60
8	-16,73	-17,48	0,75	0,55	3,10
9	-17,09	-18,05	0,96	0,76	3,20
10	-17,41	-18,73	1,32	1,12	4,30
11	-17,71	-19,30	1,59	1,39	4,40
12	-17,93	-20,05	2,13	1,93	6,10
13	-18,02	-20,62	2,60	2,40	7,10
19, 0 1 2 2 3 4 4 5 6 7 7	-9,64 -9,48 5,40 5,22 -9,71 -9,75 -5,70 -6,12 -9,32 -9,18 -8,97 -9,00 8,44	$\begin{array}{c} -10,85\\ -10,77\\ 3,43\\ 3,27\\ -11,05\\ -11,21\\ -3,69\\ -4,10\\ -10,74\\ -10,63\\ -10,28\\ -10,05\\ 6,64\end{array}$	1,21 1,29 1,97 1,95 2,34 2,46 -2,01 -2,02 1,42 1,45 1,31 1,05 1,80	0,00 0,08 0,08 0,06 0,06 0,18 0,18 0,17 0,17 0,17 0,20 0,06 -0,20 -0,20	$\begin{array}{c} 0,00\\ 1,20\\ 1,20\\ 1,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,20\\ 2,80\\ 3,40\\ 4,00\\ 4,00\\ 4,00\\ \end{array}$

### Продолжение приложения 2

#### ANNEWGRAD

### Окончание приложения 2

Профильная	Теоретически	е полные сдвиже	Сдвижения реперов профильной ли-		
	про	фильной линии, 1	нии относительно опориого, 10 <sup>-2</sup> м		
penep	Δ <sub>82</sub>	Δ <sub>74</sub>	Δ <sub>82-74</sub>	теоретические ζт	инструментальные, октябрь 1982 г., ζ <sub>и</sub>
8 8 9 10 11 12 12 13 13 13 14 14 14 14 15 15 16 16 17	$\begin{array}{r} \Delta_{\$2} \\ \hline 8,30 \\ -9,30 \\ -9,13 \\ -8,71 \\ -8,41 \\ -8,27 \\ -13,84 \\ -13,96 \\ -7,94 \\ -7,59 \\ -15,86 \\ -16,87 \\ -6,48 \\ -6,03 \\ 18,65 \\ 18,19 \\ \end{array}$	$\Delta_{74}$ 6,16 -10,62 -10,04 -9,92 -9,32 -9,10 -12,32 -12,93 -8,47 -7,79 -15,36 -16,86 -6,21 -5,54 19,47 18,31	$\begin{array}{c} \Delta_{82-74} \\ \hline \\ 2,14 \\ 1,32 \\ 0,91 \\ 1,21 \\ 0,91 \\ 0,83 \\ -1,52 \\ -1,03 \\ 0,53 \\ 0,20 \\ -0,50 \\ -0,01 \\ -0,27 \\ -0,49 \\ -0,82 \\ -0,12 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,14\\ 0,14\\ -0,27\\ 0,03\\ -0,27\\ -0,35\\ -0,35\\ 0,14\\ 0,14\\ -0,19\\ -0,19\\ -0,19\\ 0,30\\ 0,08\\ 0,08\\ 0,08\\ 0,78\end{array}$	октябрь 1982 г., <u><u></u> 4,00 4,00 2,70 0,00 -0,80 0,40 0,40 0,40 0,40 1,10 1,10 1,10 1,1</u>
17	-6,63	-7,36	0,73	$\begin{array}{c} 0,78\\ 0,02\\ -0,20\\ -0,41\\ -0,32\\ -0,82\\ -0,78\\ -0,96\end{array}$	0,50
18	-7,00	-6,97	-0,03		0,70
19	-6,76	-6,51	-0,25		0,80
20	-6,40	-5,94	-0,46		1,70
21	-5,63	-5,26	-0,37		2,70
22	-5,80	-4,93	-0,87		2,20
23	-5,41	-4,58	-0,83		3,20
24	-5,38	-4,37	-1,01		3,40

254

.

255

#### Продолжение приложения 3

#### Теоретические и инструментально измеренные вертикальные сдвижения ренеров наблюдательной станции на земной поверхности шахты Северопесчанская за 1974—1982 гг.

Профильная	Теорстические по. сдвиже	лные вертикальные ения, см	Вертикальные сдвижения реперов отно- сительно опорного за 1974—1982 гг.		
линия, репер	β <sub>82</sub>	β <sub>74</sub>	теоретические β <sub>r</sub>	инструментальные β <sub>0</sub>	
$\begin{array}{c} 39\\ 38\\ 37\\ 36\\ 35\\ 34\\ 33\\ 15, 6\\ 7\\ 8\\ 9\\ 10\\ 11\\ 12\\ 13\\ 14\\ 15\\ 16\\ 17\\ 18\\ 19\\ 20\\ 15, 1X\\ X\\ 39\\ 38\\ 37\\ 36\\ 36\\ 34\\ 19, XX111\\ 0\\ 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\\ 7\\ 8\\ 9\\ 10\\ 11\\ 12\end{array}$	$\begin{array}{c} 5,4\\ 5,8\\ 6,3\\ 7,4\\ 8,4\\ 9,9\\ 11,7\\ 3,3\\ 3,4\\ 3,5\\ 4,0\\ 4,5\\ 4,6\\ 4,7\\ 4,9\\ 5,1\\ 5,5\\ 6,0\\ 6,8\\ 6,8\\ 6,9\\ 7,4\\ 3,2\\ 3,3\\ 3,7\\ 4,1\\ 4,4\\ 4,7\\ 5,2\\ 2,0\\ 2,0\\ 2,0\\ 2,0\\ 2,0\\ 2,0\\ 2,0\\ 2$	5,2 5,7 6,7 7,6 8,4 10,1 14,2 4,2 4,6 5,0 5,6 6,2 6,9 7,6 8,4 9,2 9,4 9,6 12,1 12,3 13,5 15,2 2,3 3,1 3,4 3,5 3,5 3,7 3,8 2,0 2,1 2,3 3,4 3,5 3,5 3,7 3,8 2,0 2,1 2,3 3,4 3,5 3,5 3,7 3,8 2,0 2,1 2,3 3,4 2,7 2,5 2,7 2,9 3,0 3,1 3,25 3,3 3,5 3,3 3,5 3,5 3,7 3,8 2,0 2,1 2,3 2,4 2,7 2,9 3,0 3,1 3,2,5 3,3 3,5 3,5 3,5 3,7 3,8 2,0 3,1 3,25 3,3 3,5 3,5 3,5 3,7 3,8 2,7 2,9 3,00 3,1 3,2 3,3 3,5	$\begin{array}{c} -0.2 \\ -0.3 \\ -0.8 \\ -0.6 \\ -0.4 \\ -0.6 \\ -2.9 \\ 0.0 \\ -2.9 \\ 0.0 \\ -0.3 \\ -0.6 \\ -0.7 \\ -0.8 \\ -1.4 \\ -2.0 \\ -2.6 \\ -3.2 \\ -3.0 \\ -2.7 \\ -4.4 \\ -4.6 \\ -5.7 \\ -6.9 \\ 0.0 \\ -0.7 \\ -0.6 \\ -0.3 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.6 \\ 0.5 \\ 0.0 \\ -0.1 \\ -0.3 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.5 \\ -0.6 \\ -0.8 \\ -0.9 \\ -0.9 \\ -0.9 \\ -1.0 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} -2.5 \\ -3,0 \\ -4,3 \\ -3,4 \\ -3,3 \\ -4,4 \\ -4,4 \\ 0,0 \\ -0,8 \\ -0,6 \\ 3,9 \\ 3,8 \\ 3,6 \\ -0,3 \\ -2,0 \\ -3,3 \\ -1,0 \\ -0,5 \\ -1,5 \\ -1,5 \\ -1,5 \\ -1,5 \\ -1,5 \\ -1,7 \\ -6,5 \\ 0,0 \\ -0,9 \\ -1,5 \\ -1,1 \\ -0,8 \\ -0,6 \\ -3,2 \\ -3,3 \\ 0,0 \\ 0,7 \\ 0,7 \\ 0,5 \\ 0,4 \\ 1,3 \\ -3,0 \\ -0,4 \\ -1,3 \\ 0,2 \\ -0,5 \\ -1,9 \\ \end{array}$	

256

•

Окончание приложения 3

Профильная	Теоретические пол сдвиже	ные вертикальные ния, см	Вертикальные сдвижения реперов отно- сительно опориого за 1974—1982 гг.		
линия, репер	β <sub>82</sub>	β <sub>74</sub>	теоретические β <sub>r</sub>	инструментальные β <sub>n</sub>	
13	2,5	3,4	-0,9	-0,5	
14	2,3	3,2	-0,9	-1,2	
15	1,8	2,4	-0,6	-0,4	
16	1,9	2,0	-0,1	0,7	
17	2,2	3,1	0,9	-1,8	
18	1.9	2,7	-0,8	-1,2	
19	1.7	2.4	_0,7	-0,7	
20	1.5	2.1	-0.6	-1,2	
21	1.3	1.7	-0.4	-1.8	
22	1.2	1.0	0.2	-2.8	
23	0.8	16	-0.8	-1.8	
24	0.5	1.9	-1.4	-0.6	
24	0,5	1,2	1,4	0,0	

2.

Теоретические горизонтальные сдвижения точек установки реперов к моменту оборудования наблюдательной станции (1974 г.) на гор. 40 м шахты Северопесчанская

№ репера	Криволинейные коор- динаты		Сдвижени <i>х</i> и у,	ия по осям 10 <sup>-2</sup> м	Направление профильной ли-	Сдвижение по профильной ли-
	ρ	Ө, град	U	V	нии у, град	нии, 10-2 м
Опорный	2,98	188,5	-2,21	24,47	1,5	-1,57
1	2,93	189,0	-2,01	23,94	1,5	-1,38
2	2,83	189,5	-2,17	22,98	1,5	-1,57
3	2,71	189,5	-2,53	21,77	1,5	-1,96
4	2,61	190,0	-2,64	20,77	1,5	-2,10
5	2,52	190,0	-3,02	19,84	1,5	-2,50
6	2,43	190,5	-3,06	18,97	1,5	-2,56
7	2,34	191,0	-3,30	18,10	1,5	-2,83
8	2,28	191,0	-3,53	17,50	1,5	-3,07
9	2,19	191,5	-3,71	16,66	1,5	-3,27
9	2,19	191,5	-3,71	16,6	14,5	0,58
10	2,13	191,5	-4,00	16,07	14,5	0,15
10	2,13	191,5	-4,00	16,07	27,5	3,87
11	2,07	191,0	-4,42	15,39	27,5	3,19
12	1,96	190,0	-5,49	14,06	27,5	1,62
13	1,84	189,0	-6,62	12,57	27,5	-0,06
14	1,73	187,5	-7,76	11,08	27,5	-1,68
15	1,63	186,5	-8,47	9,74	27,5	-3,02
16	1,53	185,0	-9,43	8,23	27,5	-4,56
17	1,43	183,5	-10,10	6,47	27,5	-5,85
18	1,35	181,5	-10,73	4,90	27,5	-7,26
19	1,27	180,0	-10,92	3,24	27,5	-8,19

٠

#### Теоретические горизоптальные сдвижения точек установки реперов к моменту завершения эксперимента (1982 г.) на гор. 40 м шахты Северопссчанская

№ репера	Криволинейные коор- динаты		Сдвижения по осям <i>х</i> и у, 10 <sup>-2</sup> м		Направление профильной ли-	Сдвижение по профильной ли-
	р	Ө, град	U	V	нии у, град	нии, 10 <sup>-2</sup> м
Опорный	2,24	80,5	-6,82	-0,13	267,0	0,49
1	2,21	80,0	-7,00	-0,30	267,0	0,66
2	2,15	80,0	-7,l8	-0,34	267,0	0,72
3	2,08	80,0	7,40	-0,32	267,0	0,71
4	2,02	79,5	-7,70	-0,56	267,0	0,95
5	1,87	79,5	-7.90	-0,67	267,0	1,08
6	1,92	79,0	-8,17	-0,03	267,0	0,46
7	1,88	79,0	-8,37	-0,31	267,0	0,75
8	1,84	79,0	8,77	-0,44	277,0	0,89
9	1,78	78,5	-8.94	-1,29	277,0	1,76
9	1,78	78,5	- 8.94	-1,29	280,5	-0,36
10	1,74	78,0	-8,79	-1,48	280,5	-0,15
10	1,74	78,0	-8,79	-1,48	294,0	-2,22
11	1,72	77,5	9,46	-1,55	294,0	-2,43
12	1,66	76,0	-10,14	-1,88	294,0	-2,41
13	1,61	75,0	-10,74	-2,41	294,0	-2,17
14	1,56	74,0	-11,39	-2,84	294,0	-2,04
15	1,51	72,5	-12,19	-3,25	294,0	-1,99
16	1,46	71,0	-13,09	-3,74	294,0	-1,90
17	1,42	69,5	-13,94	-4,21	294,0	-1,82
18	1,38	68,0	-14,47	-5,02	294,0	-1,30
19	1,34	66,5	-15,90	-5,56	294,0	-1,39

10

260

Теоретические и инструментально измеренные горизонтальные сдвижения реперов наблюдательной станции гор. 40 м шахты Северонесчанская за 1974—1982 гг.

	Теоретические по прос	з полище сдвиж рильной линии	кения реперов , 10 <sup>-2</sup> м	Сдвижения реперов по профильной лин относительно опорного, 10 <sup>-2</sup> м				
№ репера		10 M		теоретичес- кие ζ <sub>г</sub>	инструм	инструментальные ζ		
	$\Delta_{x_2}$	$\Delta_{74}$	$\Delta_{82-74}$		май 1982 г.	октябрь 1982 г.		
Опорный	0,49	-1,57	2,06	0,00	0,00	0,00		
J	0,66	-1,38	2,04	-0,02	0,50	0,20		
2	0,72	-1,58	2,29	0,23	1,50	0,80		
3	0,71	-1,96	2,67	0,61	2,20	1,10		
4	0,95	-2,10	3,06	1,00	3,00	1,60		
5	1,08	2,50	3,58	1,52	2,90	1,30		
6	0,46	-2,56	3,02	0,96	3,10	1,76		
7	0,75	-2,83	- 3,58	1,52	3,30	1,80		
8	0,89	-3,07	3,96	1,90	5,90	4,30		
9	1,76	-3,27	5,03	2,97	6,50	4,60		
10	-0,36	0,58	-0,94	2,97	6,50	4,60		
10	-0,15	0,15	-0,30	3,61	6,60	4,50		
10	-2,22	3,87	6,09	3,61	6,60	4,50		
11	-2,43	3,19	-5,62	4,08	6,70	4,70		
12	-2,47	1,62	-4,03	5,67	8,50	6,00		
13	-2,17	-0,06	-2,11	7,59	9,10	6,40		
14	-2,04	-1,68	-0,36	9,34	11,10	8,30		
15	-1,99	-3,02	1,03	10,73	12,00	8,90		
16	-1,90	-4,56	2,66	12,36	12,80	9,70		
17	-1,82	-5,85	4,03	13,73	15,10	11,80		
18	-1,30	-7,26	5,96	15,66	16,30	12,70		
19	-1,39	-8,19	6,80	16,50	17,40	13,70		

.

`

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 6

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Теоретические горизоптальные сдвижения точек установки реперов к моменту оборудования наблюдательной станции (1974 г.) на гор. –80 м шахты Северопесчанская

№ ренера	Полярные координаты		Радиальные и тангенциаль- ные сдвижения, 10 <sup>-2</sup> м		Направление профильной	Сдвижение по профильной	
	ľМ	ө, град	V <sub>r</sub>	V <sub>e</sub>	линни α, град	линии, 10-2 м	
1	540	179,0	3,47	0,17	185,5	-3,77	
2	510	179,0	3,98	0,18	186,0	-3,98	
3	494	178,5	4,08	0,25	186,5	-4,08	
4	482	178,0	4,16	0,31	187,0	-4,17	
5	458	178,0	4,34	0,33	187,0	-4,35	
6	438	177,5	4,50	0,42	187,0	-4,52	
7	418	177,0	4,65	0,52	187,5	-4,68	
8	398	176,5	4,82	0,62	188,0	-4,86	
9	378	176,0	4,99	0,74	188,5	-5,04	
10	360	176,0	5,19	9,79	189,0	-5,25	
10	360	176,0	5,19	0,79	178,5	-5,17	
11	336	176,0	5,46	0,86	178,0	-5,43	
12	316	176,0	5,71	0,93	178,0	-5,67	
13	298	176,0	5,93	1,01	178,0	5,89	
14	276	176,0	6,21	1,12	178,0	-6,17	
15	256	176,0	6,46	1,25	178,0	-6,41	
16	232	176,0	6,75	1,44	178,0	-6,70	
17	216	176,5	8,89	1,43	177,5	-6,82	
18	190	176,5	6,89	1,76	177,0	-6,79	
19	176	176,5	6,70	2,01	176,5	-6,56	

#### Теоретические горизонтальные сдвижения точек установки реперов к моменту завершения эксперимента (1982 г.) на гор. –80 м шахты Северонесчанская

№ рецера	Криволинейные координаты		Векторы гор сдвих	оизонтальных кений	Направление вектора отно- сительно про-	Сдвижение по профильной
• - p••••p•	ρ	Ө, град	<i>W</i> , м	δ, град	фильной ли- нии ү, град	линии, 10 <sup>-2</sup> м
1	2,25	77,5	0,2493	336,59	54,59	14,45
2	2,16	76,0	0,2369	334,78	52,78	14,33
3	2,12	74,5	0,2268	334,25	52,25	13,89
4	2,08	74,0	0,2223	333,08	51,08	13,97
5	2,01	73,0	0,2141	330,85	48,85	14,09
6	1,95	72,0	0,2066	328,69	46,69	14,17
7	1,89	71,0	0,1994	326,19	44,19	14,30
8	1,83	70,0	0,1929	323,34	41,34	14,48
9	1,77	69,0	0,1870	320,09	38,09	14,72
10	1,72	68,0	0,1817	317,02	35,02	14,88
10	1,72	68,0	0,1817	317,02	45,02	12,84
11	1,65	67,0	0,1780	322,32	40,12	13,61
12	1,59	66,5	0,1785	308,14	36,14	14,42
13	1,53	65,5	0,1774	303,35	31,35	15,15
14	1,47	65,0	0,1811	298,81	26,81	16,16
15	1,40	64,0	0,1855	292,95	20,95	17,32
16	1,34	63,0	0,1910	287,69	15,69	18,39
17	1,29	62,5	0,1993	283,84	11,84	19,51
18	1,22	61,0	0,2105	277,42	5,42	20,96
19	1,17	60,5	0,2236	273,97	1,97	22,35

Теоретические и инструментально измеренные горизонтальные сдвижения реперов наблюдательной станции гор. –80 м шахты Северонесчанская за 1974—1982 гг.

M. pogopo	Теоретические проф	полные сдвиже ильной линии, 1	Сдвижения реперов профильной ли нии относительно опорного, 10-2 м		
™ penepa	$\Delta_{82}$	$\Delta_{74}$	Δ <sub>82-74</sub>	теоретические	инструментальные 21.10.82 г., ζ <sub>н</sub>
1	14,45	-3,37	18,22	0,00	0,00
2	14,33	3,98	18,31	0,09	0,90
3	13,89	-4,08	17,97	-0,25	1,80
4	13,97	-4,17	18,14	-0,08	3,20
5	14,09	-4,35	18,44	0,22	4,10
6	14,17	-4,52	18,69	0,47	4,70
7	14,30	-4,68	18,98	0,76	5,30
8	14,48	-4,86	19,34	1,12	6,30
9	14,72	-5,04	19,76	1,54	7,50
10	14,88	-5,25	20,13	1,91	8,30
10	12,84	-5,17	18,01	1,91	8,30
11	13,61	5,43	19,04	2,94	9,30
12	14,42	-5,67	20,09	3,99	10,20
13	15,15	-5,89	21,04	4,97	11,10
14	16,16	6,17	22,33	6,23	12,20
15	17,32	-6,4 l	23,73	7,63	12,40
16	18,39	-6,70	25,09	8,99	14,80
17	19,51	-6,82	26,33	10,23	16,90
18	20,96	-6,79	27,74	11,63	19,00
19	22,35	-6,56	28,91	12,81	20,50

### оглавление

Введение	3
1. Проблемы сдвижения горных пород при подземной разра- ботке рудных месторождений	8
1.1. Проявления сдвижений горных пород от подземных разработок рудных месторождений 1.2. Развитие научных исследований сдвижения горных пород 1.3. Современные методы прогнозирования сдвижений горных пород на рудных месторождениях 1.4. Основные проблемы в области расчета и прогнози- рования сдвижений горных пород и задачи исследований	8 13 22 29
2. Маркшейдерские паблюдения за сдвижениями горпых пород на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана	33
<ul> <li>2.1. Характеристика маркшейдерских наблюдений</li> <li>2.2. Основные положения теории процесса сдвижения горных работ</li> <li>2.3. "Аномалии" в развитии горизонтальных сдвижений</li> <li>2.4. "Аномалии" в развитии вертикальных сдвижений</li> <li>2.5. Взаимосвязь между "аномальными" проявлениями горизонтальных и вертикальных сдвижений</li> <li>2.6. Обобщающие выводы об "аномалиях" в сдвижении горных пород и причинах их проявления.</li> </ul>	33 35 40 43 46 48
3. Обоснование геомеханической модели процесса сдвижения горпых пород на месторождениях руд черных металлов	53
3.1. Горно-геологические условия, свойства и напряжен- ное состояние массива горных пород рудных месторож- дений 3.2. Факторы, определяющие геомеханическую модель	53
процесса сдвижения разраоатываемого рудного место- рождения	59
ных пород 3.4. Деформационные свойства среды модели 3.5. Граничные условия в массиве горных пород и зада-	62 71
ние их на модели	75 87

4. Методика расчета основных параметров горизоптальных сдвижений и деформаций	89
4.1. Напряженно-деформированнос состояние массива горных пород в горизонтальном сечении мульды сдвиже-	20
ния 4.2. Расчет горизонтальных сдвижений и деформаций во-	89
4.3. Расчет горизонтальных сдвижений и деформаций во- круг элинитического порада	104
4.4. Методика расчета границ зоны трещин	116
5. Методика расчета основных параметров вертикальных сдви- жений и деформаций	124
5.1. Вертикальные сдвижения и деформации земной по- верхности и горных пород в мульде сдвижения 5.2. Математический аппарат для расчета вертикальных	124
сдвижений вокруг провалов круглой формы 5.3. Математический аппарата для расчета вертикальных сдвижений и леформаций вокруг эллиптического про-	126
вала	128
6. Закопомерности формирования мульды сдвижения	132
6.1. Формирование мульды сдвижения вокруг провала круглой формы	132
ческого провала	145
7. Экспериментальная проверка теоретических положений в промышленных условиях	155
<ul> <li>7.1. Методологический подход к проверке теоретических положений</li> <li>7.2. Теоретические и экспериментальные исследования</li> </ul>	155
стволовении визирных осеи опорных реперов от осеи стволов	157
ти при образовании зоны обрушения земной поверхнос- ти при образовании зоны обрушения	164
верхности при расширении зоны обрушения	168
горизонтальных сдвижений в подземных условиях 7.6. Обобщенная оценка промышленных экспериментов	172 177
8. Решение практических вопросов сдвижения горных пород на железорудных месторождениях Урала	184
8.1. Прогнозирование процесса сдвижения и охрана со- оружений при разработке Северопесчанского месторож- дения	184
266	

8.2. Прогноз процесса сдвижения и охрана сооружений в условиях застроенной территории Высокогорского месторождения в.З. Прогнозирование процесса сдвижения при соямещении открытых и подземных разработок на Гороблагодат- СКОМ мосторолизации.	210
Заключение	233
Саясок литературы	235
Приложения	245

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

#### Сашурин Анатолий Дмитриевич

#### СДВИЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД НА РУДНИКАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

•

Рекомендовано к печати Ученым советом Института горного дела и НИСО УрО РАН

ЛР № 020764 от 24.04.98

Редактор Н. У. Макарова

НИСО УрО РАН № 165(98). Подписано в печать2.03.99. Формат 60×84 1/16 Усл. печ. л. 16,75. Уч. изд. л. 18,0. Тираж 200. Заказ № 28.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук 620219. г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58

Типография УрО РАН 620219, г. Екатеринбург, ГСП-169, ул. С. Ковалевской, 18