

На правах рукописи

УДК 622.83:[528.2:629.78]



Панжин Андрей Алексеевич

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА
ПЛОЩАДНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СДВИЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2007

**Работа выполнена в Институте горного дела
Уральского отделения Российской академии наук**

Научный руководитель – доктор технических наук
Сашурин Анатолий Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гордеев Виктор Александрович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Липин Яков Иванович

Ведущая организация – ОАО Институт «Уралгипроруда»

Защита состоится «14» ноября 2007 г. в 14:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 004.010.01 при Институте горного дела УрО РАН по адресу: 620219, г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института горного дела УрО РАН.

Просьба направлять отзывы почтой в 2 экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному выше адресу.

Автореферат диссертации разослан «13» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор  – В.М. Аленичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Разработка месторождений полезных ископаемых неизбежно вызывает преобразования геологической среды: от незначительных деформаций земной поверхности до значительных подвижек по границам структурных блоков и техногенных землетрясений. В области влияния горных работ зачастую оказываются жилые и промышленные объекты, разрушение которых может привести к тяжелым последствиям, причем последствия техногенной деятельности проявляются не только в период эксплуатации горного предприятия, но и в период, следующий за его ликвидацией.

Параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород относятся к основным факторам, определяющим закономерности развития процесса сдвижения и деформирования горных пород и земной поверхности в областях влияния разработки месторождений полезных ископаемых. На основании этих данных делаются прогнозные оценки развития процесса сдвижения и принимаются решения о безопасной эксплуатации объектов, попадающих в область влияния горных разработок. Основным, а зачастую и единственным способом определения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород являются натурные инструментальные измерения смещений в пространстве и во времени специально оборудованных точек земной поверхности – реперов наблюдательных станций.

Существующие методики по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых не полно отражают реальные геомеханические процессы, происходящие при формировании вторичного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, поскольку измерения смещений реперов производятся по неравномерной измерительной сетке только в двух плоскостях – в вертикальной и в направлении профильной линии. К тому же не охваченной геодезическими измерениями остается обширная область техногенного влияния горных разработок – зона, в которой имеют место деформации, вызванные перераспределением техногенных нагрузок.

Упрощенный подход к оценке деформационных процессов в двухмерном пространстве влечет за собой ошибочные представления о состоянии охраняемых объектов, что нередко приводит к аварийным ситуациям. Для решения современных задач геомеханики и принятия решений по охране объектов от влияния горных разработок необходима достоверная информация о распределении деформаций в трехмерном пространстве, которую, в свою очередь, не-

возможно получить без знания величин и направлений полного вектора смещений точек, распределенных по всей области влияния горных разработок.

Таким образом, исследования, направленные на получение новых знаний о закономерностях формирования вторичного напряженно-деформированного состояния и совершенствование методов изучения его параметров на качественно новом уровне актуальны для науки и практики современного горного дела.

Объект исследований – процессы деформирования земной поверхности и массива горных пород, подверженных техногенному воздействию от ведения горных работ.

Предмет исследований – закономерности формирования параметров вторичного напряженно-деформированного состояния породного массива и методы их изучения.

Цель работы – исследование закономерностей деформирования массива горных пород и земной поверхности в области влияния горных разработок в условиях анизотропного начального поля напряжений и иерархически блочной структуры массива горных пород для создания метода инструментальных исследований сдвижений горных пород, обеспечивающего повышение надежности прогнозных оценок состояния охраняемых объектов.

Идея работы заключается в применении площадного принципа построения наблюдательной станции за счет использования GPS-технологий, что позволяет получить полные трехмерные вектора смещения точек земной поверхности и пространственные компоненты поля деформаций.

Защищаемые научные положения:

1. В области влияния горных разработок формируются внутренняя зона деформирования, образуемая непосредственно вокруг выработанного пространства под воздействием уравновешенной системы сил, и внешняя, возникающая за счет нарушения изостазии при перемещении полезного ископаемого и вскрышных пород. Размеры внутренней зоны, в соответствии с принципом Сен-Венана, составляют 2-3 средних радиусов выработанного пространства, а у внешней зоны, в соответствии с решением Бусинеска, практически заметные деформации могут распространяться на 20-30 средних радиусов.

2. Получение объемного тензора деформаций, характеризующего напряженно-деформированное состояние массива, достигается за счет измерения параметров полных векторов смещений реперов наблюдательной станции, образующих базовые треугольные элементы, с использованием математического аппарата механики сплошной среды.

3. Плотность сети реперов наблюдательной станции зависит от расположения охраняемых объектов, ожидаемых градиентов деформирования, структуры массива горных пород и расстояния между реперами определяются во внутренней области деформирования размерами охраняемых сооружений, а во внешней области деформирования возрастают от 1 до 5 радиусов зоны техногенного возмущения в направлении ее внешней границы.

Научная новизна работы:

1. Установлены закономерности формирования вторичного напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области влияния горных разработок, выделяющие внутреннюю и внешнюю зоны деформирования, особенности и источники развития деформаций.

2. Выявлены зависимости объемного тензора деформаций массива горных пород и земной поверхности от параметров области возмущения, анизотропии первоначального напряженного состояния и ориентации их главных осей.

3. Разработана экспериментальная методика определения параметров объемного тензора деформаций, основанная на измерении полных векторов смещений реперов наблюдательной станции, построенной по площадному принципу с использованием треугольных базовых элементов.

Практическое значение работы:

1. Разработана новая методика исследования процесса сдвижения, обеспечивающая надежный контроль за состоянием массива горных пород и безопасную эксплуатацию объектов, находящихся в зоне техногенного влияния горных разработок, за счет учета объемного характера деформирования.

2. Обоснована конструкция наблюдательной станции, обеспечивающая надежный контроль за развитием процесса сдвижения на исследуемом участке за счет определения всего комплекса компонентов объемного деформирования.

3. Разработан регламент проведения измерений параметров поля деформаций, камеральной обработки результатов измерений, обеспечивающие реализацию теоретических положений диссертации, рекомендованы необходимые приборы и инструменты.

Методы исследований. В работе использованы методы аналитического обобщения научного и практического опыта по проблеме, теоретические методы механики сплошной среды, натурные измерения деформаций массива горных пород в полевых условиях с применением GPS-технологий, математический аппарат высшей геодезии для камеральной обработки экспериментальных

данных, численное сопоставление модельных представлений с результатами натуральных измерений, промышленные эксперименты.

Достоверность научных положений подтверждается большим объемом экспериментальных работ в полевых условиях, использованием апробированных методов исследования сдвижений горных пород, основанных на положениях классической теории упругости и механики сплошной среды, обоснованием основных параметров геомеханической модели разрабатываемого месторождения для исследования процессов сдвижения земной поверхности, численным сопоставлением результатов промышленных экспериментов с модельными представлениями.

Личный вклад автора состоит в анализе и обобщении опубликованных в специальной литературе сведений по исследуемому вопросу, установлении закономерностей формирования вторичного напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области техногенного влияния горных разработок, обосновании геомеханической модели разрабатываемого месторождения, разработке и исследовании методики определения параметров процесса сдвижения с применением GPS-технологии, практической проверке разработанной методики в промышленных условиях на горных предприятиях.

Реализация работы осуществлена при исследованиях процесса сдвижения и решении вопросов охраны объектов, находящихся в области влияния горных разработок на шахте «Сарановская-Рудная», шахтах Высокогорского ГОКа, карьерах Коршуновского ГОКа, ОАО «Оренбургские Минералы» (Киембаевский ГОК) и других горных предприятий.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, 1996, 1998, 2000, 2002, 2005 и 2007 гг.), Международных конференциях «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2001, 2003 и 2007 гг.), Уральской молодежной школе по геофизике (Екатеринбург – Пермь, 2002-2005 гг.); на технических совещаниях по утверждению мер охраны объектов от вредного влияния горных разработок (Высокогорский ГОК, Донской ГОК, ОАО «Оренбургские Минералы» (Киембаевский ГОК), шахта Сарановская-Рудная, 2000-2006 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 15 печатных работах, в том числе в специальном разделе учебного пособия.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 175 страниц машинописного текста, в т.ч.

12 таблиц и 57 рисунков. Список использованных источников включает в себя 136 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. А.Д. Сашурину, высокопрофессиональное руководство, постоянное внимание и помощь которого способствовали выполнению работы, профессору, д.т.н. С.В. Корнилкову и чл.-корр. РАН В.Л. Яковлеву за содействие, поддержку и консультации по важнейшим вопросам диссертации, сотрудникам лаборатории сдвига горных пород и предотвращения техногенных катастроф ИГД УрО РАН за сотрудничество и поддержку, оказанные в период выполнения исследований и подготовки данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы.

В первой главе диссертации представлено современное состояние методов исследований сдвижений земной поверхности.

Начало научных исследований в области сдвига горных пород было положено Туайе и Гоно в середине 19 века в связи с попыткой объяснить повреждение жилых домов в городе Льеже. Выдвинутые ими теории, усовершенствованные Шпарре и Г.Дюном встречались в литературе до первой половины XX века. Позже получили развитие теории Гауссе, Ржиха и Файоля. Недостатком ранних теоретических исследований процесса сдвига являлся их созерцательный характер – теории не подтверждались инструментальными измерениями и не согласовывались друг с другом.

Инструментальные наблюдения за проявлениями процесса сдвига были начаты в середине XIX века Гудвином, и получили развитие в нормативных документах Дортмудского горного управления и работах О'Денэгу. С этого времени развитие теоретических представлений о процессе сдвига неразрывно связано с инструментальными измерениями.

В нашей стране исследования процесса сдвига связаны с именами П.Н. Леонтовского, О.Л. Кульбаха, И.М. Бахурина, С.Г. Авершина, Д.А. Казаковского, В.В. Соколовского и других, заложивших фундамент советской школы исследования сдвижений горных пород. Более поздние исследования, выполненные М.А. Кузнецовым, С.П. Колбенковым, Е.В. Куняевым, П.Ф. Гартнером, И.А.Петуховым, А.Н. Медянцевым, Г.П. Фисенко, И.И. Поповым, А.И.Ильиным, В.Г. Зотеевым, А.Д. Сашуриным и др. позволили разработать более 30 нормативных документов – «Правил...» и «Указаний...» по охране со-

оружений от вредного влияния горных разработок и «Инструкций...» по наблюдениям за процессом сдвижения. Были разработаны и утверждены конструкции наблюдательных станций, которые закладываются по профильным линиям в главных сечениях месторождениях и методики инструментальных измерений и камеральной обработки, позволяющие получить угловые параметры процесса сдвижения. Методики инструментального контроля, обеспечивающие оценку текущего состояния подработанного массива, корректировку теоретических исследований и основанных на них прогнозах развития процесса сдвижения, долгое время удовлетворяли потребности науки и горного производства.

Начиная с середины-второй половины XX века, в связи с увеличением глубины отработки месторождений и масштабов горных работ, разрабатываются новые теоретические методы расчета параметров процесса сдвижения. Эти теории базировались на геомеханических моделях среды и учитывали нелинейный характер ее деформирования и анизотропию поля начальных напряжений. Широкое распространение получили теории, основанные численных методах решения задач механики сплошных сред, которыми плодотворно занимались В.И. Борщ-Компониец, М.В. Курленя, А.Б. Фадеев, В.Г. Зотеев, В. Витке, Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин и др. а также теории, основанные на моделях сплошной упругой среды, разработанные А.Д. Сашуриным и Б.А. Храпцовым и развитые в работах В.Е. Боликова, В.А. Квочина, А.Б. Макарова, А.И. Ильина и др.

Эти теории позволяют определить полные пространственные компоненты тензора деформаций в любой точке подработанного породного массива, они позволяют оценить текущее геомеханическое состояние массива и выполнить прогноз развития процесса сдвижения при различных вариантах ведения горных работ. В связи с тем, что при моделировании используются идеализированные модели геологической среды со многими упрощениями, нормативные документы требуют проведение обязательного инструментального контроля за развитием процесса сдвижения для корректировки мер охраны объектов.

Практика инструментального контроля результатов теоретических исследований процесса сдвижения традиционными геодезическими методами свидетельствует о том, что недостаточно выполнить измерения деформаций породного массива по профильным линиям, заложенным в главных сечениях месторождения, поскольку в условиях действия анизотропного поля напряжений, а также при несовпадении направления главных напряжений с осями мульды сдвижения, измеренные по профильной линии деформации в одной и той же точке будут изменяться от максимальных до минимальных значений зависеть

от направления профильной линии и разворота осей полярной эпюры деформаций (рис. 1). Это связано с несоответствием современным теоретическим представлениям о закономерностях деформирования породного массива информации, получаемой традиционными методами инструментального контроля.

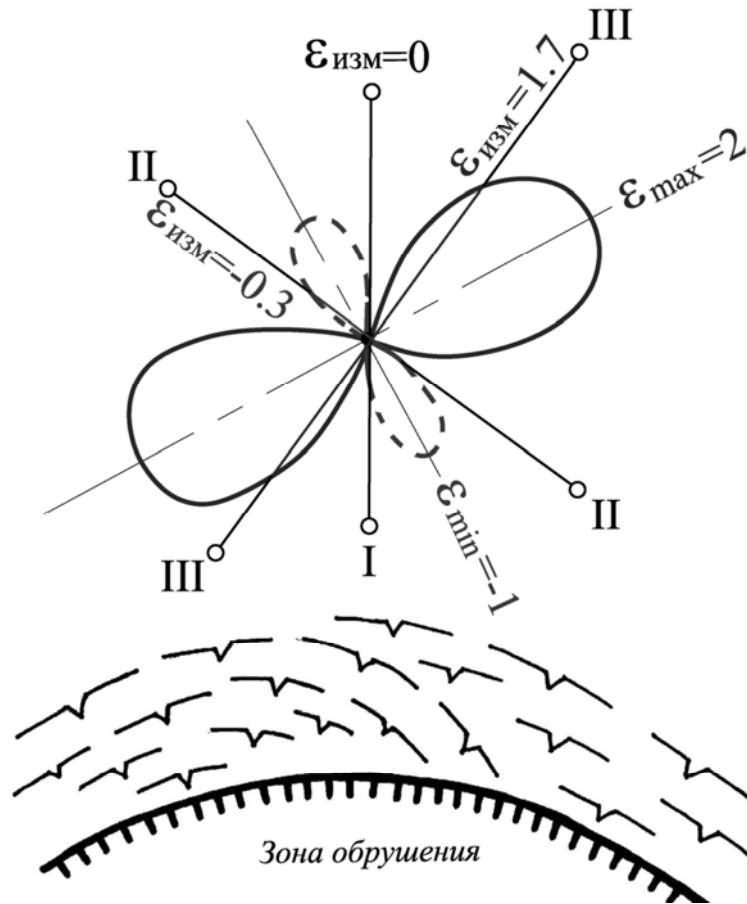


Рисунок 1 – Взаимосвязь измеренных деформаций $\epsilon_{\text{изм}}$ породного массива с направлениями профильных линий I, II и III

Данное несоответствие приводит к тому, что в результате инструментальных наблюдений, выполненных по линейной схеме измерений (рис. 2), контролируется не полный трехмерный вектор смещений $[v \ v \ \omega]$, а его проекции на вертикальную и горизонтальную плоскости ξ и η , в общем случае не совпадающие с направлениями осей главных деформаций. Таким образом, необходимо привести в соответствие методы инструментального исследования процесса сдвижения современным теоретическим представлениям. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- обоснована геомеханическая модель исследуемой области деформирования;
- разработаны и сформулированы геомеханические принципы построения площадной наблюдательной станции;

- разработана экспериментальная методика измерений смещений реперов наблюдательной станции, исследованы погрешности и условия применения;
- проведены промышленные эксперименты по проверке основных положений разработанной методики.

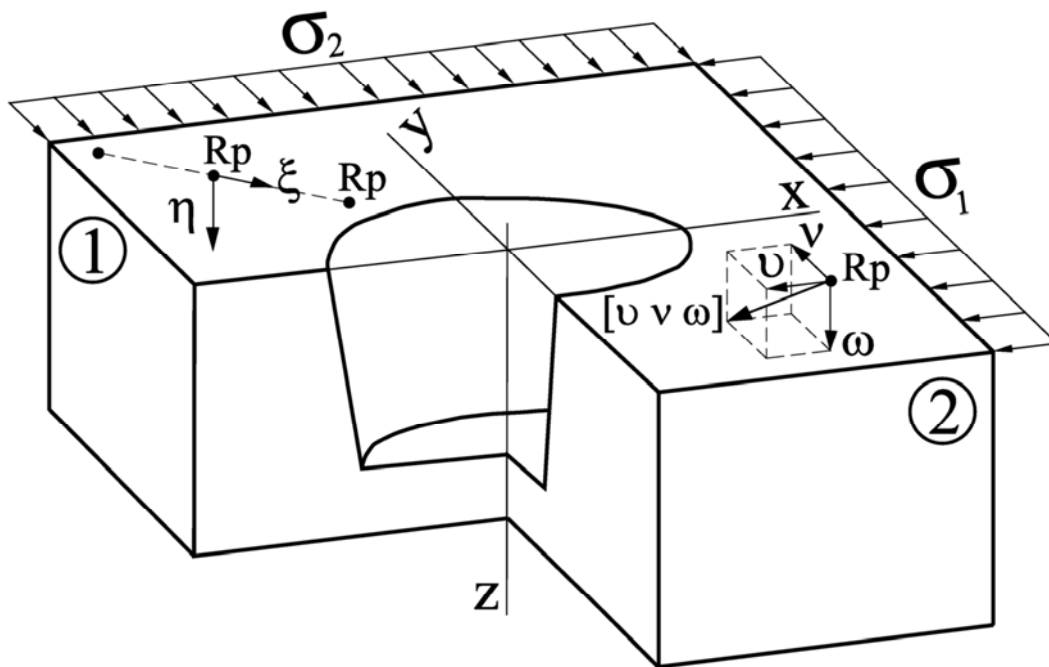


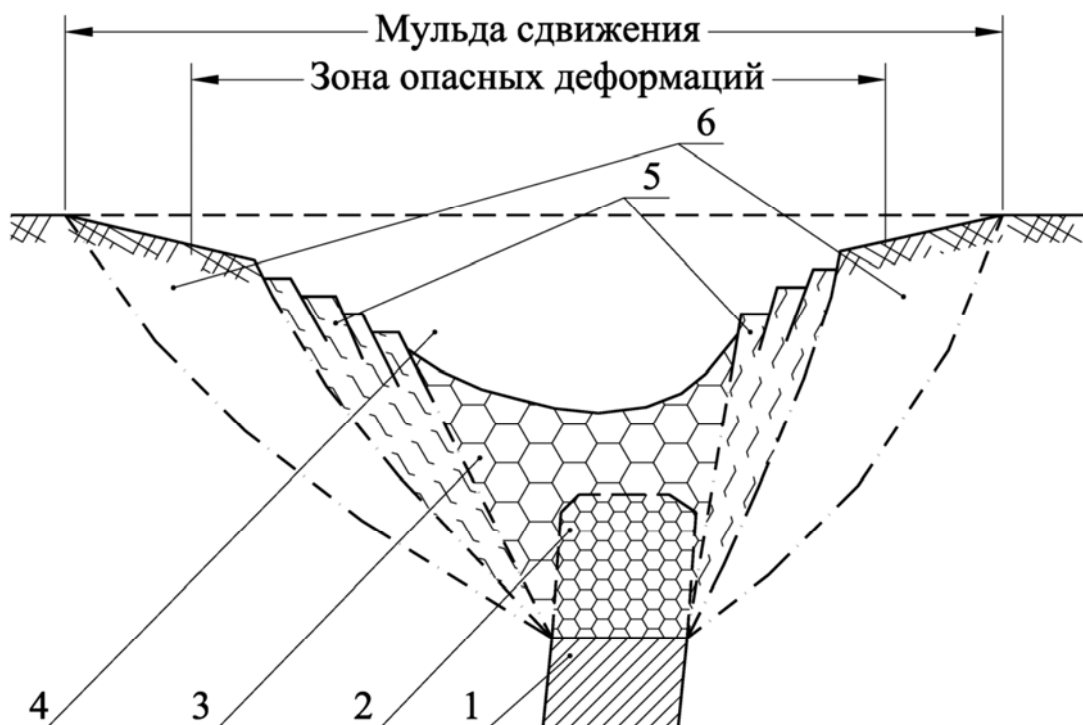
Рисунок 2 – Измеряемые сдвигения при традиционной линейной схеме измерений (1) и при измерении полного вектора сдвижения (2)

Во второй главе проведено обоснование геомеханической модели исследуемой области деформирования, выделены внутренняя и внешняя области деформирования, установлены основные параметры геомеханической модели и граничные условия в массиве горных пород.

Процесс сдвижения горных пород и земной поверхности, сопровождающий разработку месторождения, зарождается непосредственно у места производства горных работ. Для открытых горных работ это выработанное пространство карьера, ограниченное его бортами. Для подземных работ это выработанное пространство, образованное в результате проведения очистных работ.

В зависимости от параметров разрабатываемого месторождения, процесс сдвижения от подземных работ может локализоваться в налегающей породной толще или выйти на земную поверхность. Схематично общепринятая модель процесса сдвижения представлена на рис. 3. Мульда сдвижения имеет три основные зоны: зону обрушения, зону трещин и зону плавных деформаций.

В случае разработки месторождения открытым способом вместо зоны обрушения в геомеханической модели используется карьерное пространство.



- 1 – рудное тело; 2 – выработанное пространство; 3 – зона обрушения; 4 – провал;
5 – зоны террас и трещин; 6 – зона плавных деформаций.

Рисунок 3 – Схематичная модель процесса сдвижения

Совершенствование методов инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения актуально лишь для зоны плавных деформаций, где охраняемые объекты сохраняются в эксплуатации и для обеспечения их безопасности необходима надежная и полная информация о процессе деформирования земной поверхности. Кроме этой области, в массиве горных пород и на земной поверхности формируется обширная область деформирования, распространяющаяся на несколько километров, в которой проявляются сдвиги и деформации с меньшими градиентами. Размеры внешней и внутренней областей деформирования были определены по результатам компьютерного моделирования и подтверждены экспериментальными методами.

Таким образом, в области влияния горных разработок формируются внутренняя зона деформирования, образуемая непосредственно вокруг выработанного пространства под воздействием уравновешенной системы сил, и внешняя, возникающая за счет нарушения изостазии при перемещении полезного ископаемого и вскрышных пород. Размеры внутренней зоны, в соответствии с принципом Сен-Венана, составляют 2-3 средних радиусов

выработанного пространства, а у внешней зоны, в соответствии с решением Бусинеска, практически заметные деформации могут распространяться на 20-30 средних радиусов.

Основные параметры геомеханической модели определяются деформационными свойствами и структурой массива горных пород, первоначальным и техногенным напряженным состоянием массива горных пород, геометрическими параметрами разрабатываемых рудных тел. Скальный массив горных пород, имеющий сложную иерархически блочную структуру, в геомеханической модели представляется в виде упругой однородной изотропной среды с интегральными деформационными характеристиками, определяемыми на базах, соответствующих конкретным задачам сдвижения горных пород.

Геометрические параметры модели сдвижения горных пород определяются, с одной стороны, существующими представлениями о строении верхней части земной коры, а с другой стороны, размерами, формой и взаимным расположением техногенных объектов. При этом их реальные границы заменяются правильными геометрическими фигурами, а распределение техногенных нагрузок внутри объекта производится по определенным математическим законам.

В третьей главе рассматриваются геомеханические принципы построения площадной наблюдательной станции, обеспечивающей получение пространственных компонент поля деформаций за счет измерения полных трехмерных векторов смещений реперов.

Для получения полной картины процесса сдвижения с учетом анизотропии поля начальных напряжений и иерархически-блочного строения массива необходимо чтобы инструментальными измерениями были охвачены внешняя и внутренняя область деформирования и обеспечена возможность выявления аномалий в развитии процесса сдвижения. Для этого необходимо, в отличие от линейного принципа построения наблюдательной станции, обеспечивающего определение параметров деформаций только по направлениям профильных линий, организовывать инструментальные наблюдения по площадному принципу с определением пространственного тензора деформаций породного массива.

Базовым элементом площадной наблюдательной станции с минимальным количеством реперов является треугольник (рис. 4). При проведении нескольких серий инструментальных наблюдений, определяются пространственные координаты реперов на каждый момент времени мониторинга, что позволяет определить полные вектора смещений находящихся в вершинах базового треугольного элемента. Путем проецирования полных векторов смещений реперов

Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 на соответствующие интервалы базового элемента определяются деформации интервалов ε_{12} , ε_{13} и ε_{23} сторон базового элемента наблюдательной станции на различные моменты времени, что позволяет получить искомые главные тензоры деформаций ε_{\max} и ε_{\min} , угол φ по формуле (1).

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_{xy}^2}; \\ \varepsilon_{\min} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_{xy}^2}; \\ \varphi &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot \varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right). \end{aligned} \right\} (1)$$

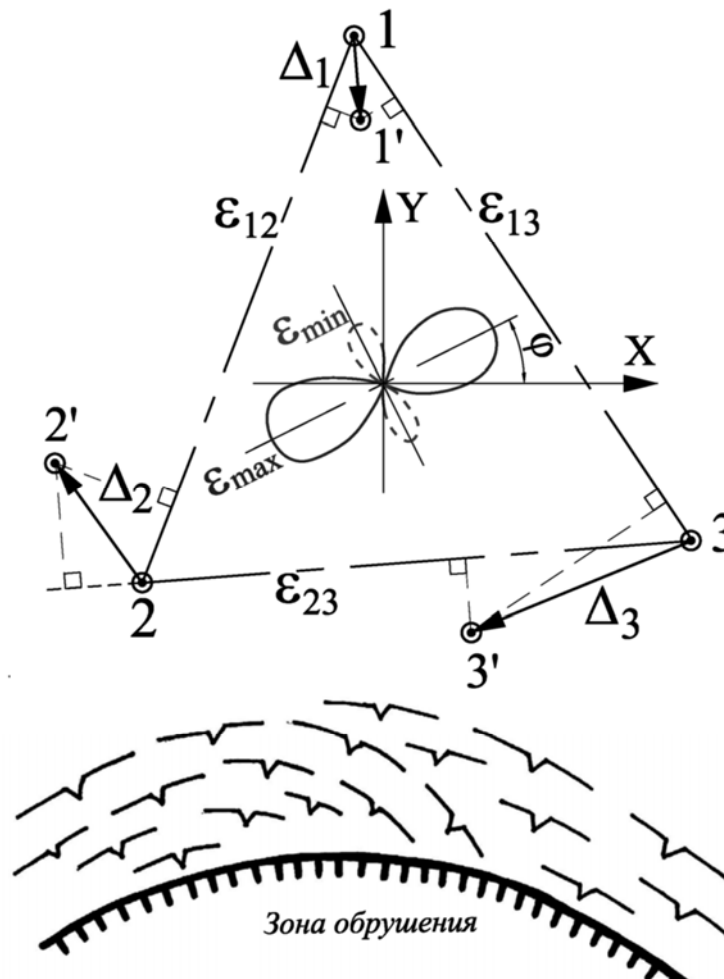


Рисунок 4 – Определение тензора деформаций по полному вектору сдвижений реперов базового треугольного элемента

Величины относительных удлинений ε_x и ε_y и сдвиговых деформаций ε_{xy} для базового элемента наблюдательной станции может быть определен как по деформациям интервалов деформационной розетки ε_{12} , ε_{12} и ε_{23} , так и непосред-

ственно по полным векторам смещений реперов наблюдательной станции Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 . Выбор конкретного метода определения главных компонент плоского тензора деформаций зависит от способа получения исходных данных геомеханического мониторинга. Для определения вертикальных деформаций используются вертикальные компоненты смещений реперов, по которым вычисляются величины наклонов, кривизны и радиуса кривизны.

Таким образом, для получения объемного тензора деформаций, характеризующего напряженно-деформированное состояние массива, необходимо измерить полные вектора смещений реперов наблюдательной станции, образующих базовый треугольный элемент.

Основные принципы построения площадной наблюдательной станции из базовых треугольных элементов для инструментальных исследований процесса сдвига сформулированы следующим образом:

- конструкция наблюдательной станции должна обеспечивать возможность инструментальных исследований закономерностей распределения смещений и деформаций массива горных пород во внешней и внутренней областях деформирования, а также на локальных участках;

- густота распределения реперов наблюдательной станции на земной поверхности должна определяться размерами области техногенного влияния, размерами и взаимным расположением возмущающих полостей, размерами охраняемых объектов, дискретностью массива горных пород и градиентами деформаций породного массива;

- конструкция реперов наблюдательной станции должна обеспечивать их долговременную сохранность и неизменность положения в пространстве и простоту установки на репере измерительного прибора;

- месторасположение реперов наблюдательной станции на местности должно обеспечивать наиболее благоприятные условия для проведения спутниковых геодезических измерений, легкий доступ к ним в любое время года и их однозначную идентификацию.

- конструкция наблюдательной станции должна обеспечивать возможность ее модернизации по мере развития горных работ, уточнения горно-геологических условий и получении новых данных о развитии деформационных процессов на исследуемой территории.

Следуя принципу построения геодезических сетей от общего к частному, определяется, в зависимости от масштабного фактора и поставленных задач,

трехуровневая структура наблюдательной станции для изучения процесса сдвига при разработке месторождения полезных ископаемых (рис. 5):

- наблюдательные станции для изучения деформационных процессов, происходящих во внешней области деформирования – области техногенного влияния масштабных горных разработок;

- наблюдательные станции для изучения деформационных процессов, происходящих во внутренней области деформирования – мульде сдвига при подземной разработке и прибортовом массиве при открытом способе разработки месторождения;

- специальные наблюдательные станции для изучения процесса сдвига на локальных участках нахождения охраняемых объектов, где предшествующими измерениями был выявлен аномальный характер развития процесса сдвига, значительные градиенты деформаций или флюктуации напряженно-деформированного состояния.

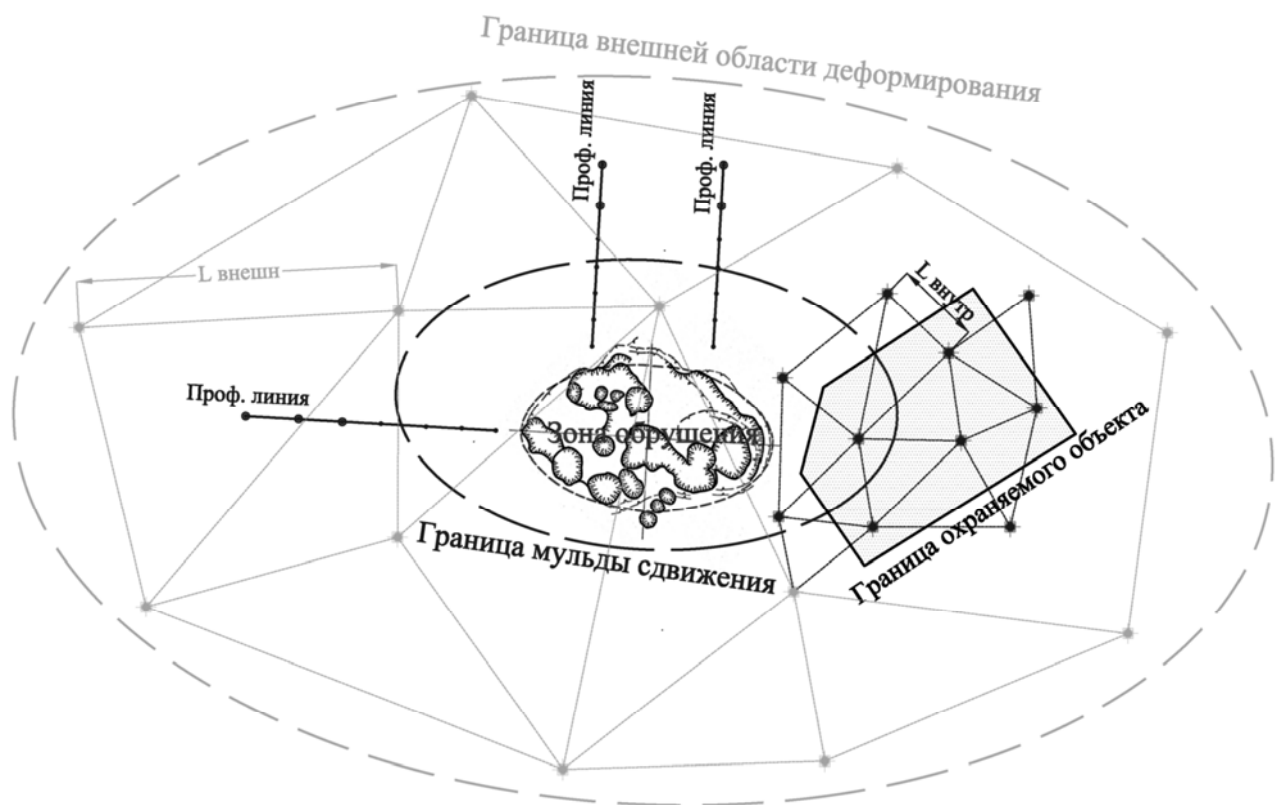


Рисунок 5 – Площадной принцип построения наблюдательной станции во внутренней и внешней областях деформирования

Таким образом, во внутренней области деформирования плотность реперов наблюдательной станции будет определяться размерами охраняемых сооружений. В дальнейшем, в случае выявления аномального характера

развития процесса сдвижения, значительных градиентов деформаций и структурных нарушений будет происходить уплотнение наблюдательной сети. Во внешней области деформирования необходимо измерить деформации минимум на двух интервалах с каждой стороны области техногенных возмущений, что будет соответствовать расстоянию между реперами от 1 до 5 радиусов области техногенного возмущения.

В четвертой главе представлена экспериментальная методика определения смещений и деформаций земной поверхности по площадной наблюдательной станции с применением GPS-технологий и методика камеральной обработки результатов измерений.

Обосновано применение технологий спутниковой геодезии в режиме дифференциальной GPS (рис. 6) для высокоточного определения пространственных координат реперов площадной наблюдательной станции. Использование GPS технологий позволяет проводить инструментальные измерения сдвижений и деформаций в условиях отсутствия прямой оптической видимости между реперами с одновременным получением трех пространственных компонент полного вектора смещений с миллиметровым уровнем точности.

Анализ технических характеристик современного геодезического GPS оборудования геодезического класса и программного обеспечения для камеральной обработки показал, что они позволяют с высокой точностью и надежностью определять пространственные координаты и смещения реперов между сериями инструментальных измерений, что позволяет использовать их при исследованиях процесса сдвижения.

Методика выполнения инструментальных исследований процесса сдвижения подразумевает многократное высокоточное переопределение координат реперов наблюдательной станций, что позволяет получить полные тензоры деформаций породного массива. Для этого необходимо выполнить подготовительные работы – составление технического и рабочего проектов, полевые инструментальные измерения, камеральную обработку результатов измерений и произвести оценку точности геодезических измерений.

Регламент полевых измерений включает в себя предполевое планирование времени и продолжительности спутниковых измерений, проверку оборудования, обследование реперов, непосредственное полевое координирование реперов в соответствии с разработанным рабочим проектом и передачу сырых данных из полевых приборов в компьютер. Время измерения на каждом репере

определяется условиями прохождения спутникового радиосигнала и для баз измерений менее 10 километров составляет от 15-20 минут до 1 часа.

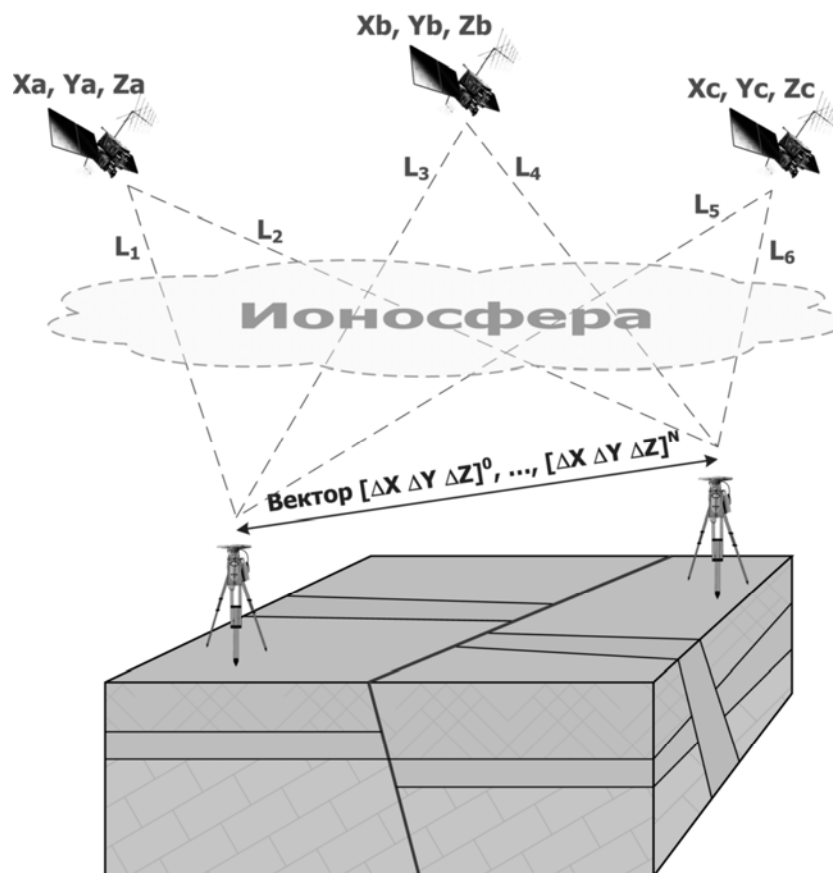


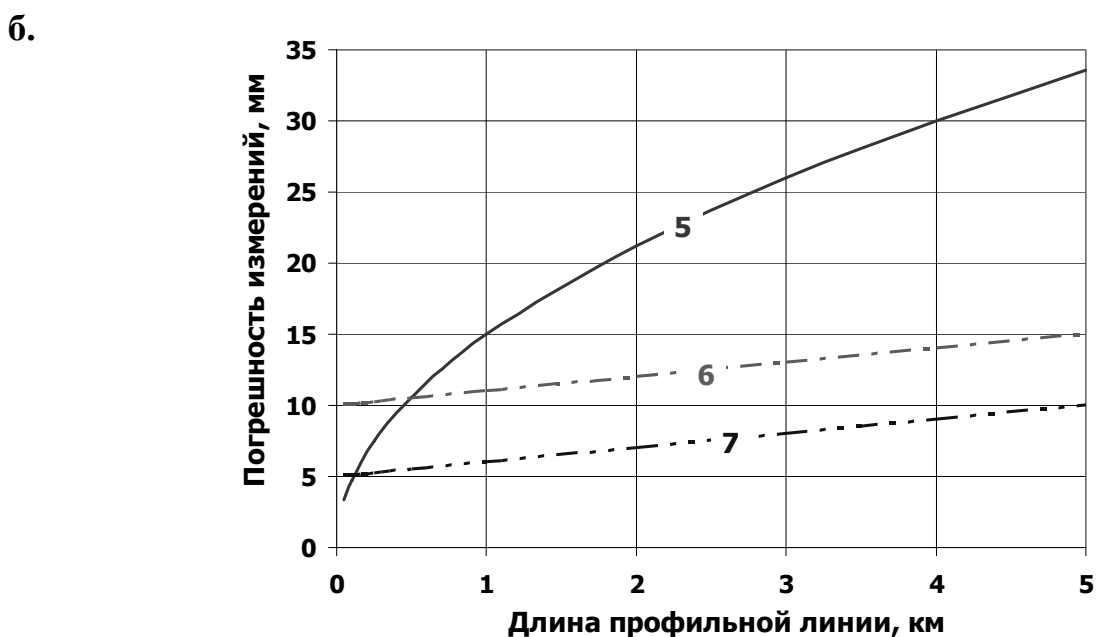
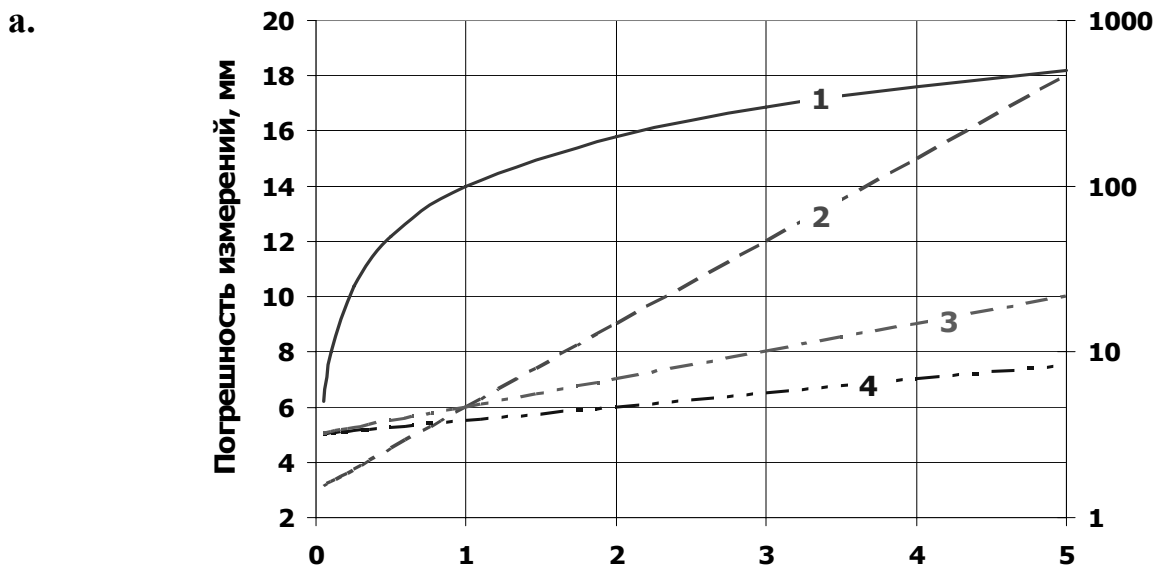
Рис. 6. Измерение сдвижений комплексом спутниковой геодезии

После выполнения этапа полевых измерений камеральной обработке подвергаются сырые данные спутниковых наблюдений, собранные во время синхронной работы двух или более GPS приемников на реперах наблюдательной станции. Регламент камеральной обработки включает в себя первичную камеральную обработку полевого материала, вычисление векторов между центрами реперов наблюдательной станции, уравнивание геодезической сети с формированием каталога координат и расчет величин векторов смещений.

Достижение необходимой точности выполнения инструментальных исследований обеспечивается техническими характеристиками используемого геодезического GPS оборудования, а с другой стороны, трехступенчатым контролем фактических погрешностей измерений.

Сопоставление погрешностей измерения GPS оборудованием в вертикальной и горизонтальной плоскости с допустимыми значениями, нормированными действующими инструкциями приведено на графиках (рис. 7). Фактиче-

ское достижение заявленной точности измерений, достигающих относительных величин до 1:100000 – 1:1500000, контролируется на этапе камеральной обработки по внутренней сходимости векторов на основании F-теста (Ratio) и теста на относительную дисперсию (Reference Variance), контролем невязок приращений координат по замкнутым контурам с оценкой реальных погрешностей независимых измерений и результатам уравнивания геодезической сети.



1 – нормированные для рулетки (логарифмическая шкала); 2 – нормированные для светодальномера; 5 – нормированные для геометрического нивелирования; 3 и 6 – при измерениях для одночастотными GPS-приемниками; 4 и 7 – при измерениях двухчастотными GPS-приемниками.

Рисунок 7 – Сопоставление погрешностей на площадной наблюдательной станции с нормированными действующими инструкциями в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

В пятой главе произведены результаты промышленных экспериментов по практической проверке основных положений разработанной методики определения полных трехмерных векторов сдвижения реперов наблюдательной станции на горных предприятиях для решения задач, связанных с охраной сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок. Исследования процесса сдвижения производились во внешней и внутренней областях деформирования.

На Кiemбаевском ГОКе (рис. 8) в качестве реперов наблюдательной станции были использованы пункты Государственной геодезической сети (ГГС) и пункты опорной маркшейдерской сети (ОМС) карьера и отвала, заложенные до начала разработки месторождения. В ходе выполнения исследований были переопределены координаты пунктов ГГС, расположенные во внешней области деформирования на площади 120 км², и выявлен условно-стабильный базис, от которого были переопределены пространственные координаты пунктов ОМС.

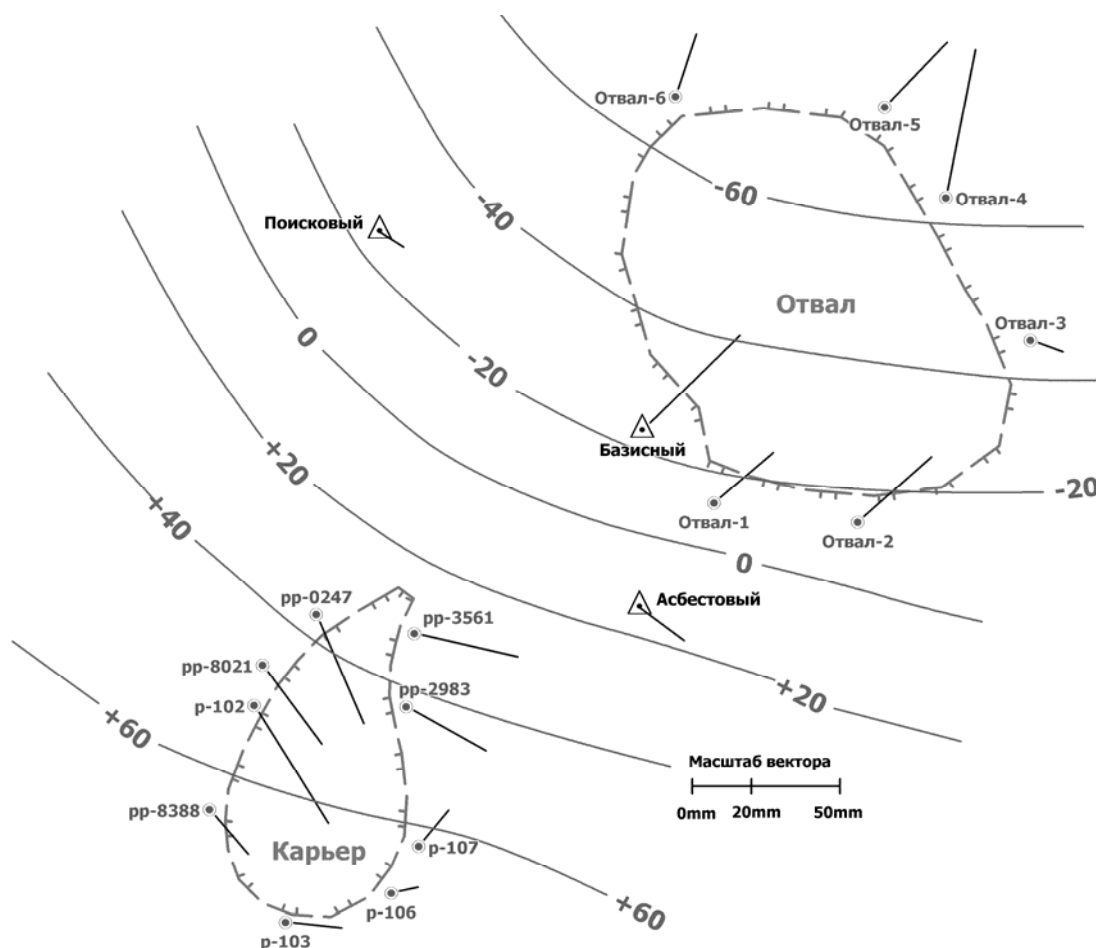


Рисунок 8 – Вектора горизонтальных и изолинии вертикальных сдвижений во внутренней и внешней областях деформирования на Кiemбаевском месторождении

В результате были определены современные координаты пунктов ГГС и ОМС, сопоставление которых с их первоначальными значениями, полученными до начала отработки месторождения, позволило вычислить полные трехмерные вектора смещений и пространственные компоненты поля деформаций. Данные о напряженно-деформированном состоянии прибортового массива были использованы для обоснования предельных углов наклона бортов карьера и реконструкции маркшейдерского обоснования предприятия.

На шахте «Магнетитовой», ведущей отработку Высокогорского месторождения в черте города Нижний Тагил, наблюдения за развитием процесса сдвижения производятся во внутренней зоне деформирования (рис. 9). Программа инструментальных исследований включает определение напряженно-деформированного состояния участка с использованием двух методик – традиционной с измерением деформаций по профильным линиям, и площадной с определением полных трехмерных векторов смещений реперов. В качестве условно-стабильных базисов сети используются пункты ГГС, расположенные все зоны влияния горных разработок, в 3-5 км от зоны обрушения.

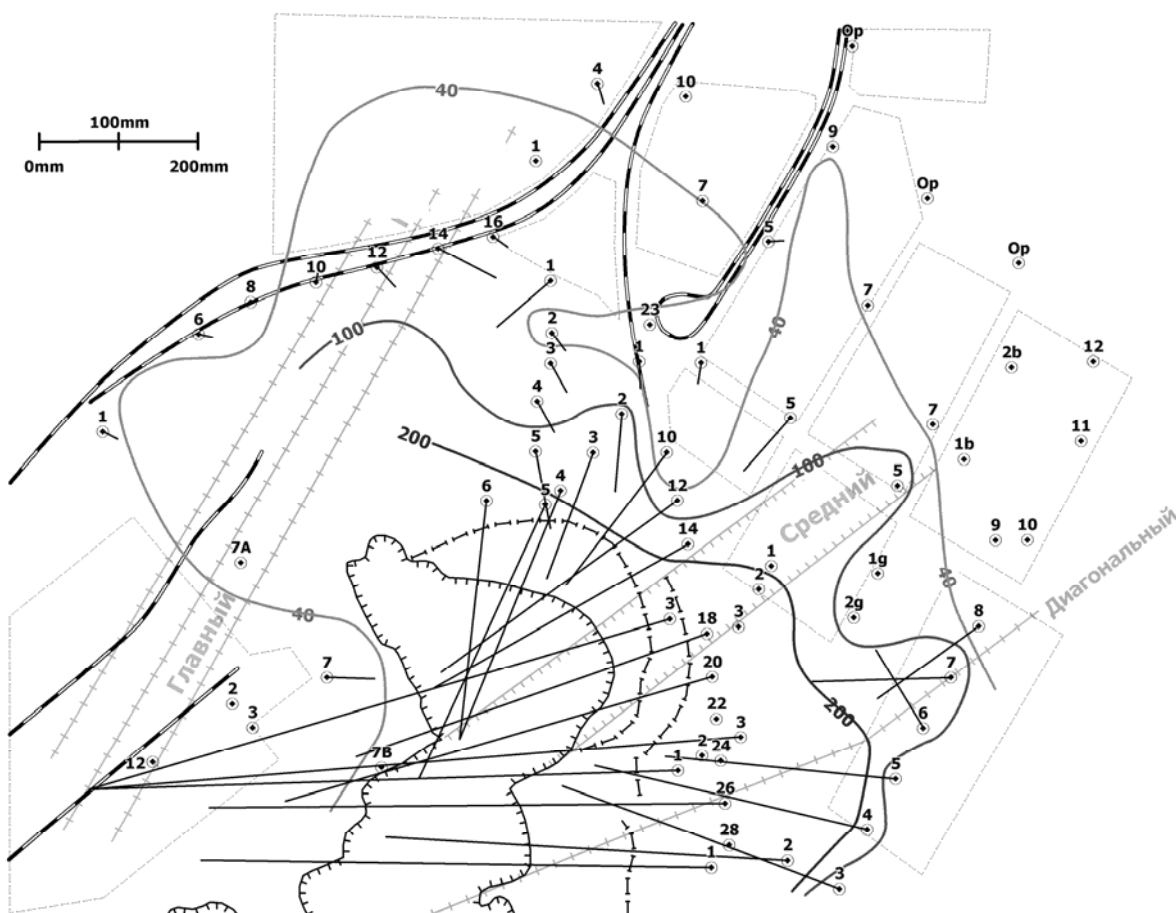


Рисунок 9 – Вектора горизонтальных и изолинии вертикальных сдвижений во внутренней области деформирования на Высокогорском месторождении

Комплекс проведенных исследований с использованием разработанной методики на Высокогорском месторождении, позволил повысить надежность охраны сооружений – объектов промплощадки в лежащем боку и жилых домов в висячем боку месторождения при отработке запасов гор.-370 и 450 м системами разработки с обрушением без оставления запасов в целиках. Совместное использование двух методик измерений позволило провести сравнительный анализ условий их применения, выявить преимущества и недостатки разработанной методики определения трехмерных векторов сдвижения площадной наблюдательной станции перед существующей традиционной методикой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научно-технической задачи: совершенствование метода наблюдения за процессом сдвижения, обеспечивающего получение полного тензора деформаций в области влияния горных разработок. Это позволяет повысить надежность охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок и полноту выемки полезного ископаемого из недр.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены основные закономерности формирования вторичного напряженно-деформированного состояния массива горных пород в области влияния горных разработок. Выделяются внутренняя зона деформирования, образующаяся непосредственно вокруг выработанного пространства под воздействием уравновешенной системы сил, и внешняя, возникающая за счет нарушения изостазии при перемещении полезного ископаемого и вскрышных пород.

2. Обоснованы основные параметры геомеханической модели разрабатываемого месторождения для исследования процессов сдвижения земной поверхности. Размеры внутренней зоны, в соответствии с принципом Сен-Венана, составляют 2-3 средних радиусов выработанного пространства, а у внешней зоны, в соответствии с решением Бусинеска, практически заметные деформации могут распространяться на 20-30 средних радиусов.

3. Доказано, что получение объемного тензора деформаций, характеризующего напряженно-деформированное состояние массива, достигается за счет измерения параметров полных векторов смещений реперов наблюдательной

станции, образующих базовые треугольные элементы, с использованием математического аппарата механики сплошной среды.

4. Разработана методика измерений смещений и деформаций земной поверхности по площадной наблюдательной станции с применением GPS-технологий и методику камеральной обработки результатов измерений, исследованы условия ее применения, погрешности измерений, преимущества и недостатки разработанной методики определения трехмерных векторов сдвижения площадной наблюдательной станции перед существующими методиками.

6. Установлено, что плотность сети реперов наблюдательной станции зависит от расположения охраняемых объектов, ожидаемых градиентов деформирования, структуры массива горных пород и расстояния между реперами определяются во внутренней области деформирования размерами охраняемых сооружений, а во внешней области деформирования изменяются от 1 до 5 радиусов в направлении внешней границы деформируемой области.

7. Произведена практическая проверка разработанной методики на горных предприятиях для решения задач, связанных с охраной сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок показала, что:

- методика позволяет получить компоненты объемного тензора деформаций, характеризующего напряженно-деформированное состояние массива;

- используемые методы спутниковой геодезии не требуют прямой оптической видимости между соседними реперами, а все три координаты, определяющие положение репера в пространстве, определяются одновременно;

- на коротких, 30-50 метровых измерительных базисах, погрешности традиционных и спутниковых измерений имеют сопоставимые значения, при увеличении длины измерительных базисов точность GPS измерений в 2-3 раза выше точности традиционных геодезических измерений;

- полученные с использованием методики величины тензоров деформаций, спроецированные на профильные линии, совпадают, в пределах среднеквадратичных ошибок измерений, со значениями деформаций, полученных традиционными методами инструментального контроля;

- условия применения разработанной методики на горных предприятиях имеют ряд особенностей, которые снижают точность определения координат реперов наблюдательной станции, однако трехуровневая система контроля погрешностей измерений позволяет оценивать фактические ошибки положения всех реперов в пространстве.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Панжин А. А. Наблюдение за сдвижением земной поверхности на горных предприятиях с использованием GPS [Текст] / А. А. Панжин // Известия УГТГА. Сер. Горное дело. – 2000. - № 11. – С. 196 – 203.

2. Панжин А. А. GPS – технологии в исследовании деформационных процессов на горных предприятиях [Текст] / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин, Ю. П. Коновалова // Горный информ.-аналит. бюл. – 2002. - № 11. – С. 98 – 101.

3. Панжин А. А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий [Текст] / А. Д. Сашурин и др. // Горный информ.-аналит. бюл. – 2003. - № 7. – С. 34 – 38.

4. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением спутниковой геодезии [Текст] / А. А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. – 2003. - № 2. – С. 43 – 54.

5. Панжин А. А. Геомеханическое обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений в области влияния горных работ [Текст] / А. А. Панжин, С. В. Усанов // Горный информ.-аналит. бюл. – 2004. - № 6. – С. 179 – 184.

6. Панжин А. А. Роль тектонических нарушений в процессе сдвижения на руднике Высокогорского ГОКа [Текст] / А.А. Панжин // Горный информ.-аналит. бюл.– 2005. - № 4. – С. 131 – 136.

7. Панжин А. А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях [Текст] / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Горный информ.-аналит. бюл. – 2007. - № 3. – С. 171 – 183.

Статьи, опубликованные в научных сборниках, журналах и материалах конференций:

1. Панжин А. А. GPS – технологии в геодезическом мониторинге НДС техногенного участка [Текст] / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле: сб. науч. тр. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 1999. – С. 68 – 85.

2. Панжин А. А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии [Текст] / А. А. Панжин // Геодинамика – напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф./ ИГД СО РАН. – Новосибирск, 201. – С. 158 – 162.

3. Панжин А. А. Результаты мониторинга деформированного состояния массива в области Киембаевского асбестового карьера [Текст] / А. А. Панжин, В. В. Дубовик, В. И. Ручкин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2004. – С. 256 – 261.

4. Панжин А. А. Диагностика геомеханического состояния породного массива на различных масштабных уровнях геодезическими методами [Текст] / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – С. 29 – 38.

5. Панжин А. А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий на горных предприятиях и урбанизированных территориях [Текст] / А. А. Панжин, С. В. Усанов, Н. А. Панжина // Состояние и перспективы развития маркшейдерского дела на Урале: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Д. Н. Оглобина / УГГУ. – Екатеринбург, 2005. – 102 – 119.

6. Панжин А. А. Геомеханическая модель подработанного породного массива и диагностика его состояния на шахте Молодежная Донского ГОКа [Текст] / А. А. Панжин // Проблемы недропользования: материалы 1 молодежной науч.-практ. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – С. 184 – 195.

7. Панжин А. А. Состояние выработанного пространства и подработанной толщи шахты Молодежной [Текст] / А. А. Панжин, А. В. Вождаев // Проблемы и пути устойчивого развития горнодобывающих отраслей промышленности (Материалы Четвертой Междунар. науч.-практ. конф.) / РГП НЦ КПМС РК и др. – Хромтау, 2007. – С. 208 – 213.

Учебное пособие для студентов ВУЗов:

1. Панжин А. А. Маркшейдерские работы при разработке месторождений открытым способом [Текст] : учеб. пособие / Б. П. Голубко, А. А. Панжин. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 154 с.