

Российская академия наук
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

УДК 622.83:[528.2:629.78]
№ госрегистрации 01201059194
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ
д-р техн. наук, проф.
_____ С. В. Корнилков

“ 29 ” сентября 2012 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры
инновационной России» на 2009–2013 годы

Шифр заявки «2010-1.1-151-045-013»
по Государственному контракту от «05» апреля 2010 г. № 02.740.11.0722

по теме:

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ И ОБЪЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕРРИТОРИЙ И
ОБЪЕКТОВ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
(Итоговый, этап № 6)

Наименование этапа: «Разработка инновационной технологии мониторинга деформирования
процессов территорий и объектов в районах ведения горных работ»

Руководитель НИР, д-р техн. наук,
Заслуженный деятель науки РФ

подпись, дата

А. Д. Сашурин

Екатеринбург 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель темы, д.т.н. _____ А. Д. Сашурин (введение, заключение, разделы 1, 3)

Ответственный исполнитель, к.т.н. _____ А. А. Панжин (разделы 1-4)

Нормоконтролер, д.т.н. _____ А.Е.Балек

Исполнители:

г.н.с., д.т.н. _____ А. В. Зубков (раздел 1.1)

зав.лаб., д.т.н. _____ В. Е. Боликов (раздел 3)

в.н.с., д.т.н. _____ А. Е. Балек (раздел 3)

зав.лаб., д.т.н. _____ О. В. Зотеев (раздел 1.1)

зав.лаб., к.т.н. _____ И. В. Соколов (раздел 1.1)

с.н.с., к.т.н. _____ Я. И. Липин (раздел 1.1)

с.н.с., к.т.н. _____ С. И. Худяков (раздел 1.2)

с.н.с., к.т.н. _____ О. Ю. Смирнов (раздел 1)

с.н.с., к.т.н. _____ Г.Г. Саканцев (раздел 1.1)

с.н.с., к.т.н. _____ П.А. Рыбников (раздел 1.3)

с.н.с., к.т.н. _____ С.Н. Жариков (раздел 1.3)

зав.лаб, к.т.н. _____ Н. Ю. Антонинова (раздел 1)

н.с. _____ В. П. Драсков (раздел 1.2)

н.с. _____ В. И. Ручкин (раздел 1.2)

н.с. _____ Т. Ш. Далатказин (раздел 1)

зав.лаб., к.т.н. _____ В. В. Мельник (раздел 1.2)

м.н.с. _____ Р. И. Климанская (раздел 3)

инж-иссл. _____ Е. Р. Маницына (раздел 3)

м.н.с. _____ Н. А. Панжина (разделы 1-2)

м.н.с. _____ Ю. П. Коновалова
(раздел 1.2)

зав.лаб., к.т.н.	_____	С. В. Усанов (раздел 1.1)
м.н.с.	_____	А. Л. Пустуев (раздел 1.2)
м.н.с.	_____	И. Л. Озорнин (раздел 1.2)
н.с., к.т.н.	_____	А. Н. Каюмова (раздел 1.2)
м.н.с.	_____	А. Л. Замятин (раздел 4)
н.с.	_____	Р. В. Криницын (раздел 4)
м.н.с.	_____	С. А. Рыбак (раздел 4)
м.н.с.	_____	А. В. Ведерников (раздел 4)
м.н.с.	_____	К. В. Селин (раздел 4)
м.н.с.	_____	Д. В. Григорьев (раздел 4)
м.н.с.	_____	П. И. Зуев (раздел 4)
м.н.с.	_____	И. В. Бирючев (раздел 4)
стаж-исс.	_____	А. Л. Турсуков (раздел 4)
м.н.с.	_____	О. Д. Желтышева (разделы 1, 2, 4)
м.н.с.	_____	Т. Ф. Харисов (раздел 4)
м.н.с.	_____	Т. В. Калистова (раздел 4)
стаж-исс.	_____	А. Р. Вафин (раздел 4)
стаж-исс.	_____	Е. Ю. Ефремов (раздел 4)
стаж-исс.	_____	Д. Ю. Князев (раздел 4)
стаж-исс.	_____	Н. П. Мальцев (раздел 4)
стаж-исс.	_____	Н. Д. Елтуков (раздел 4)

РЕФЕРАТ

Отчет 127 с., 34 рис., 5 табл., 68 источников

ГЕОМЕХАНИКА, СДВИЖЕНИЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, МОНИТОРИНГ, СПУТНИКОВАЯ ГЕОДЕЗИЯ, ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ, НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ.

В отчете представлены результаты итогового, шестого этапа НИР «Разработка инновационной технологии мониторинга деформирования процессов территорий и объектов в районах ведения горных работ» по теме «Исследование и разработка инновационных технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования для мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых».

Объектом исследования являются процессы деформирования земной поверхности и массива горных пород, подверженных техногенному воздействию в области ведения горных работ по добыче полезных ископаемых.

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 разработки инновационных технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования для мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых, обеспечивающего повышение надежности прогнозных оценок состояния охраняемых объектов.

В ходе проведения исследований **на шестом этапе** в соответствии с календарным планом и техническим заданием на выполнение НИР были решены **следующие задачи**:

- разработаны концептуальные положения мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых;
- разработан регламент проведения мониторинга деформационных процессов в районах ведения горных работ;
- разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс;
- проведена опытно-промышленная проверка разработанной инновационной технологии мониторинга деформационных процессов на горных предприятиях.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Разработка концептуальных положений мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых	8
1.1 Геомеханические процессы и явления при добыче полезных ископаемых	8
1.2 Деформационные процессы при добыче полезных ископаемых как источник аварий и катастроф	16
1.3 Характеристика деформационных процессов в районах добычи полезных ископаемых	22
1.4 Закономерности и механизм взаимодействия деформационных процессов с объектами на земной поверхности	39
1.5 Выводы по разделу	44
2 Разработка регламента проведения мониторинга деформационных процессов в районах ведения горных работ	46
2.1 Законодательные и нормативные требования к мониторингу деформационных процессов.....	46
2.2 Регламент спутниковых технологий площадного мониторинга деформационных процессов....	50
2.3 Регламент объемного лазерного сканирования деформационного состояния объектов.....	65
2.4 Выводы по разделу	81
3 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс.....	83
4 Опытно-промышленная проверка технологии мониторинга деформационных процессов на горных предприятиях	102
4.1 Проведение мониторинга с использованием комплексов спутниковой геодезии на Высокогорском ГОКе.....	102
4.2 Проведение объемного лазерного сканирования объектов на деформированных территориях горных предприятий.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	116
ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (по шести этапам).....	122

ВВЕДЕНИЕ

В отчете представлены результаты итогового, шестого этапа НИР «Разработка инновационной технологии мониторинга деформирования процессов территорий и объектов в районах ведения горных работ» по теме: «Исследование и разработка инновационных технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования для мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых», выполняемой в рамках государственного контракта с Федеральным агентством по науке и инновациям № 02.740.11.0722 от 05 апреля 2010. НИР проводится в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области геологии, горного дела» (шифр заявки 2010-1.1-151-045-013). Основанием для проведения НИР является решение Конкурсной комиссии Роснауки № 4К/2010, протокол от 25.03.2010 № 25.

Технические требования для проведения НИР включают проведение исследований в шесть этапов:

Этап 1. Теоретические исследования закономерностей развития деформационных процессов земной поверхности в области ведения горных работ по добыче полезных ископаемых (с 05 апреля по 30 июня 2010 г., промежуточный).

Этап 2. Разработка структурно-геомеханической модели массива горных пород и участка земной поверхности в области влияния горных работ (с 01 июля по 15 ноября 2010 г., промежуточный).

Этап 3. Разработка методики оценки влияния деформационных процессов на безопасности сооружений и природных объектов на подрабатываемых территориях (с 01 января по 30 июня 2011 г., промежуточный).

Этап 4. Разработка технологии проведения мониторинга деформационных процессов с использованием методов спутниковой геодезии (с 01 июля по 15 ноября 2011 г., промежуточный).

Этап 5. Разработка технологии объемного лазерного сканирования для мониторинга деформирования сооружений на подрабатываемых территориях (с 01 января по 30 июня 2012 г., промежуточный).

Этап 6. Разработка инновационной технологии мониторинга деформирования процессов территорий и объектов в районах ведения горных работ (с 01 июля по 01 октября 2012 г., заключительный, представлен в настоящем отчете).

В ходе проведения исследований на итоговом, шестом этапе в соответствии с календарным планом и техническим заданием на выполнение НИР рассмотрены следующие вопросы:

- в первом разделе отчета – на основе ретроспективного анализа теоретических разработок о области геомеханики и исследования процесса сдвижения горных пород разработаны концептуальные положения мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых.

- во втором разделе – разработан регламент проведения мониторинга деформационных процессов в районах ведения горных работ с использованием технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования.

- в третьем разделе отчета приведена информации о разработке программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс;

- в четвертом разделе отчета приведены данные о проведении опытно-промышленной проверки разработанной инновационной технологии мониторинга деформационных процессов на горных предприятиях (раздел выполнен за счет привлечения внебюджетных средств).

Результаты фундаментальных и прикладных исследований данной работы направлены для углубления познаний геомеханических процессов и явлений, играющих первостепенную роль в обеспечении эффективности и безопасности природопользования.

В состав молодых специалистов, привлеченных к выполнению исследований и разработок на шестом этапе, вошли к.ф-м.н. Рыбников П.А., к.т.н. Антонинова Н.Ю., Замятин А.Л., Криницын Р.В., Калистова Т.В., Рыбак С.А., Бирючев И.В., к.т.н. Жариков С.Н., Ведерников А.С., Селин К.В., Маницына Е.Р., Григорьев Д.В., Зуев П.И., Харисов Т.Ф., Турсуков А.Л., Князев Д.Ю., Ефремов Е.Ю., Желтышева О.Д., Мальцев Н.П., Елсуков Н.Д., Вафин А.Р.

1 Разработка концептуальных положений мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых

1.1 Геомеханические процессы и явления при добыче полезных ископаемых

Процесс сдвижения горных пород развивается по причине нарушения естественного напряженно-деформированного состояния массива вследствие образования горных выработок. Действующие в горном массиве напряжения, собственный вес пород и суффозионные процессы вызывают разрушение и перемещение подработанных пород в выработанное пространство. Этот процесс, развиваясь, достигает поверхности, где образуются провалы, террасы и трещины. Деформирование подработанного массива и поверхности продолжается вследствие консолидации дезинтегрированных пород и по мере их уплотнения формируется новое равновесное состояние массива. В общем случае окончание процесса сдвижения происходит при формировании в массиве и на поверхности трех характерных зон дезинтеграции горных пород (рис. 1).

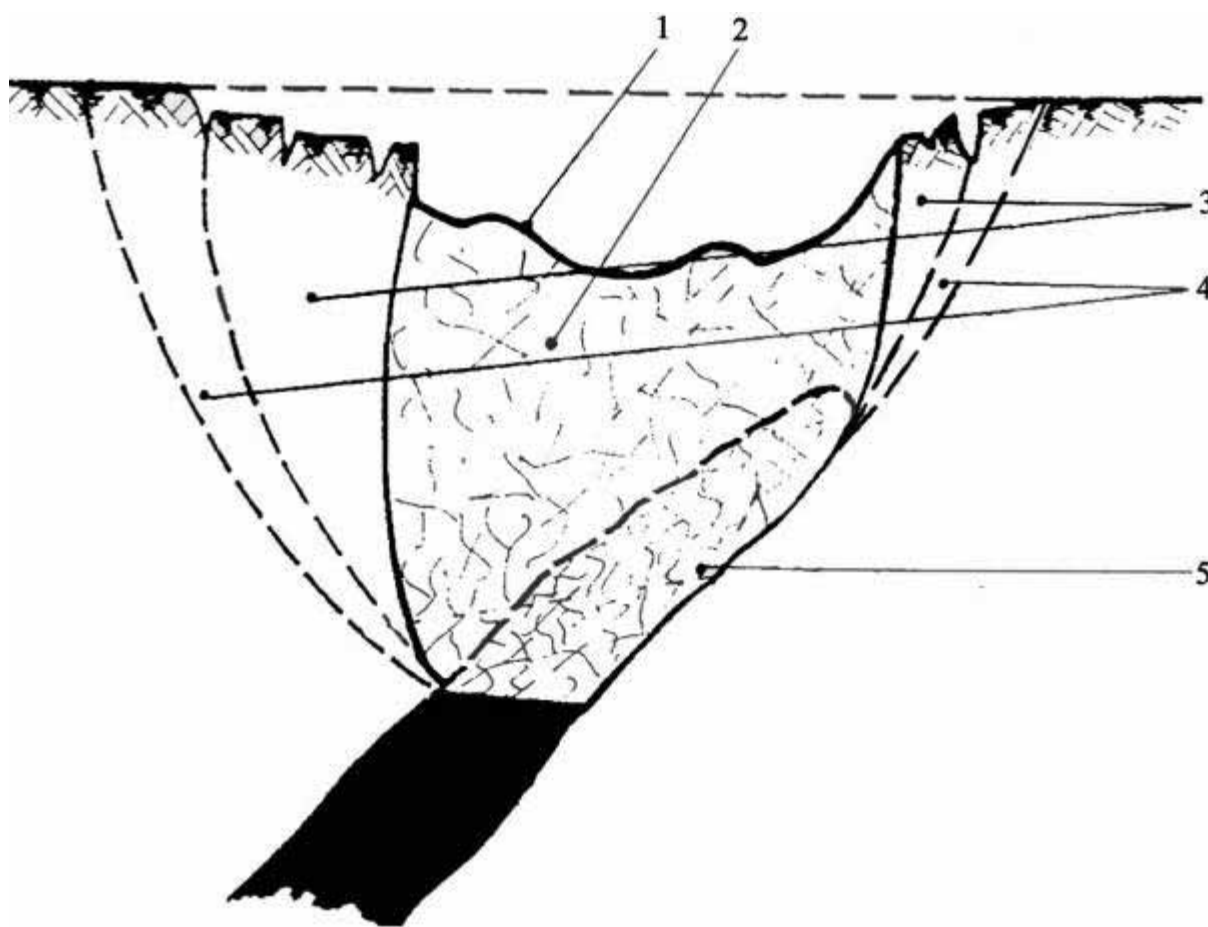


Рисунок 1. Общая модель распределения зон процесса сдвижения [1-2].

Процесс развития разрушения горных пород от образования выработанного пространства до окончания сдвижения можно представить серией из семи геомеханических моделей (рис. 2 - 8). Так как сдвижение и дезинтеграция массива распространяются в стороны лежачего и висячего боков, а также в стороны простирания залежи, то и присутствие всех зон сдвижения и дезинтеграции характерно для всех сторон мульды сдвижения. В связи с этим можно рассматривать развитие процесса сдвижения в любой вертикальной плоскости, проходящей через центр мульды сдвижения. При этом плоскость будет подсекать все образующиеся зоны дезинтеграции.

Естественное начальное состояние подработанного массива горных пород представляет геологическая модель рудной залежи, контуры которой в дальнейшем будут представлять границы выработанного пространства (рис. 2). Массив горных пород обладает первоначальной структурой, которая образуется границами геологических разностей, естественной трещиноватостью и тектоническими нарушениями.

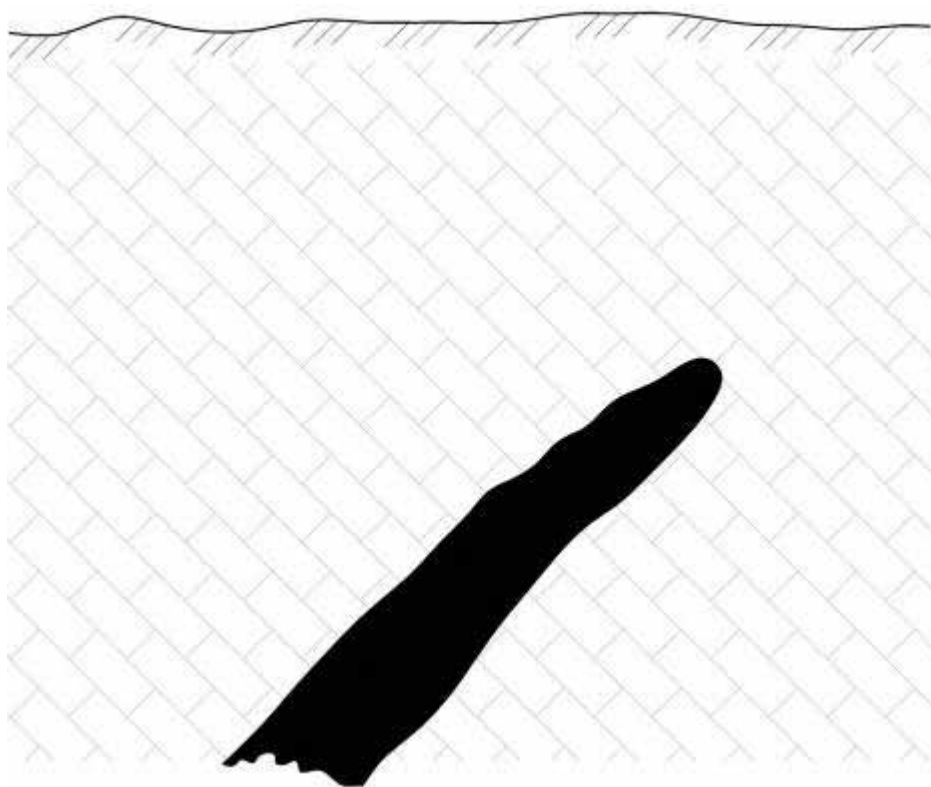


Рисунок 2. Разрез горного массива до начала подземной отработки.

Подземное выработанное пространство имеет форму, близкую к исходной форме залежи (рис. 3). В прилегающем к выработке массиве формируется техногенная трещиноватость, вторичная по отношению к первоначальной структуре. Эта трещиноватость имеет глубину распространения на несколько метров от краев выработки. На этом этапе сдвигание вмещающих пород происходит в виде сводообразования и вывалов пород из стенок обнажения. Главным образом это локальные сдвигания вокруг очистного пространства, не распространяющиеся на весь массив. Деформации поверхности пока отсутствуют.

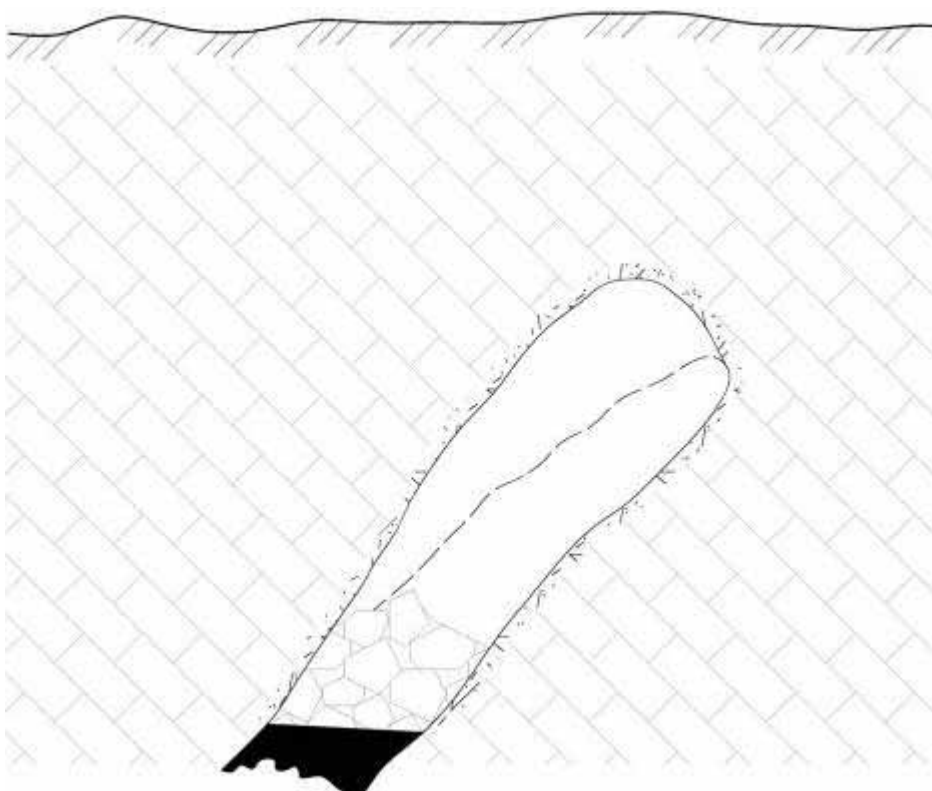


Рисунок 3. Образование выработанного пространства

В результате образования выработанного пространства в массиве горных пород естественное равновесное состояние нарушено. Стремление массива к новому равновесному состоянию происходит под действием напряжений, действующих в массиве, и собственного веса пород, зависших над выработанным пространством. Действие сил направлено на заполнение образовавшейся пустоты (рис. 4). После превышения выработкой предельного пролета структурные связи пород не выдерживают действия сил, вызывающих сдвигание, и процесс сводообразования сменяется на образование системы третичной, в порядковом исчислении, трещиноватости, ориентированной в субвертикальном направлении (рис. 4). Формирование этой системы трещин предшествует выходу воронки обрушения на

поверхность. Существенного изменения рельефа поверхности все еще не произошло. Однако в геомеханическом отношении массив является уже не устойчивым, несущим потенциальную опасность для сооружений.

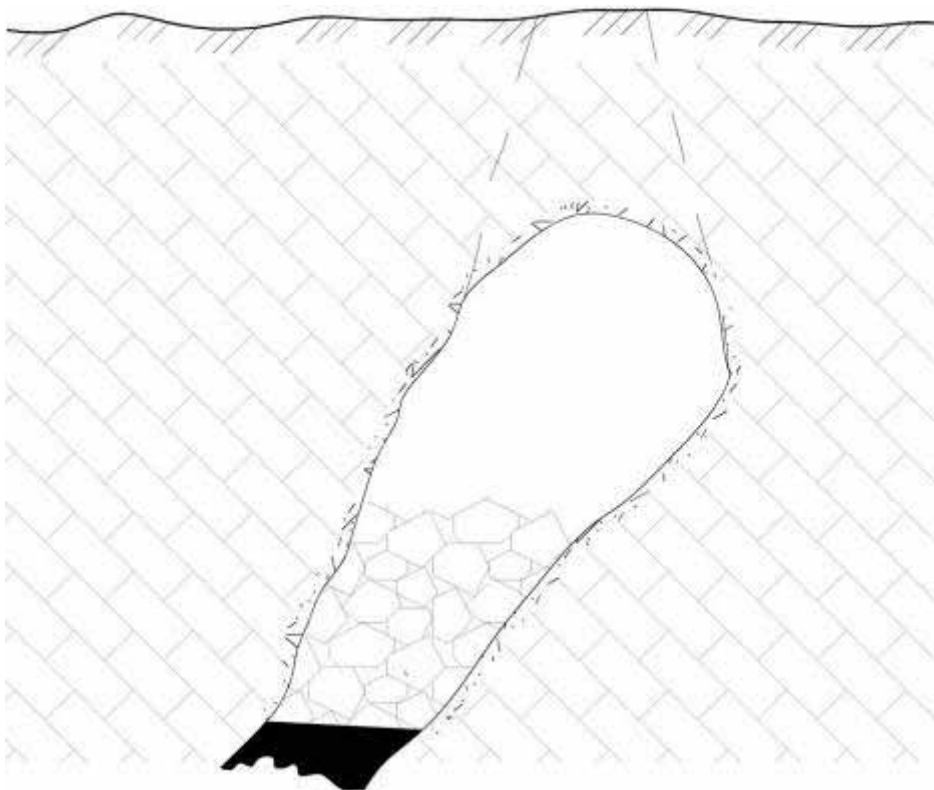


Рисунок 4. Образование в массиве системы третичной трещиноватости.

Образование системы субвертикальной трещиноватости приводит к потере структурных связей в залегающем над выработкой массиве. Зона развития ориентированной трещиноватости перешла в форму развития процесса дезинтеграции, налегающего над обнажением, горного массива (рис. 5). По сути дела над пустотой нависают горные породы, большей частью удерживающиеся в таком положении за счет сил трения, действующих между блоками горных пород. Происходит частичное заполнение выработанного пространства. В области дезинтеграции пород образуется зона разгрузки. Боковое давление на породы, окружающие область дезинтеграции, становится преобладающей силой, которая побуждает дальнейшее развитие системы третичной субвертикальной трещиноватости в сторону ненарушенного массива (рис. 5).

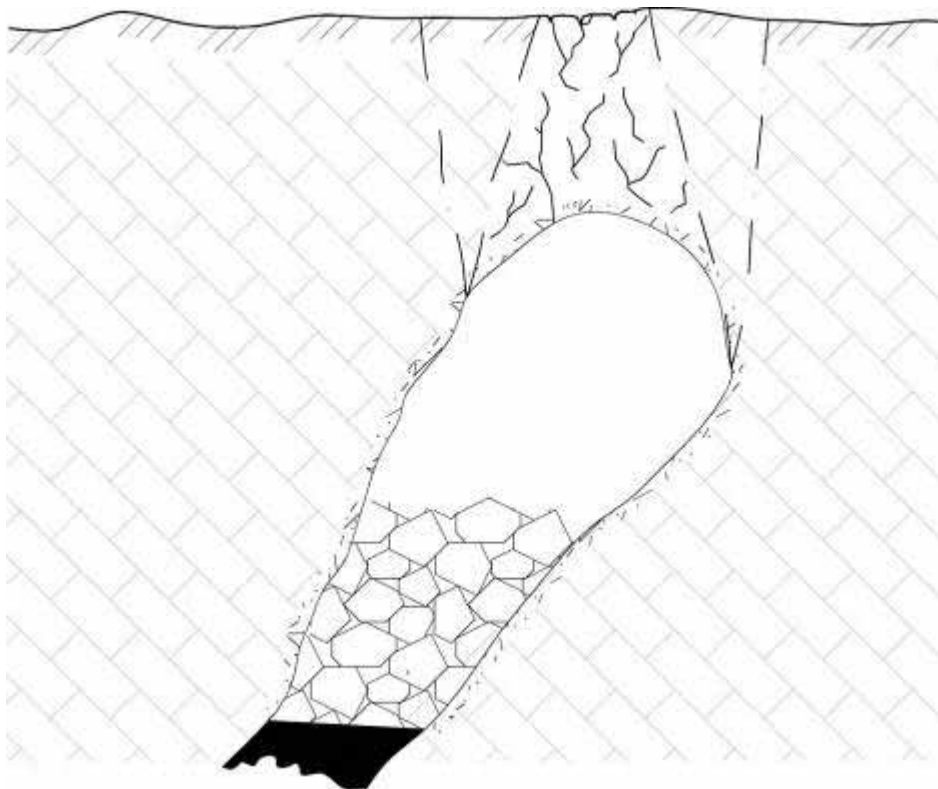


Рисунок 5. Подготовка обрушения поверхности

Переход субвертикальной трещиноватости в новые области налегающей толщи горных пород приводит к окончательной потере структурных связей в зоне дезинтеграции. Действие напряжений в массиве и собственный вес пород приводят налегающую толщу к обрушению, и на поверхности образуется зона обрушения. Выход воронки обрушения на поверхность вызывает дальнейшее развитие зон трещин и плавных деформаций (рис. 6).

Начинается, так называемая, установившаяся стадия процесса сдвижения, когда на поверхности образовались, но продолжают развиваться зоны обрушения, трещин и плавных деформаций. Обнажение погашено обрушившимися породами. Все зоны, массива затронутого сдвижением, стремятся развиваться в нетронутый массив до предельных углов (рис. 7), образуя подработанную территорию.

С выходом сдвижения на максимальные углы интенсивный процесс распространения зон сдвижения приостанавливается. В зонах субвертикальной трещиноватости и плавных сдвижений происходит развитие дезориентированной системы трещиноватости (рис. 8), усредняющей разрушение массива. В области массива, затронутой сдвижением, развивается процесс уплотнения обрушившихся пород с величинами не вызывающими опасности для объектов [1-7]. Подработанный массив приобретает новое равновесное состояние.

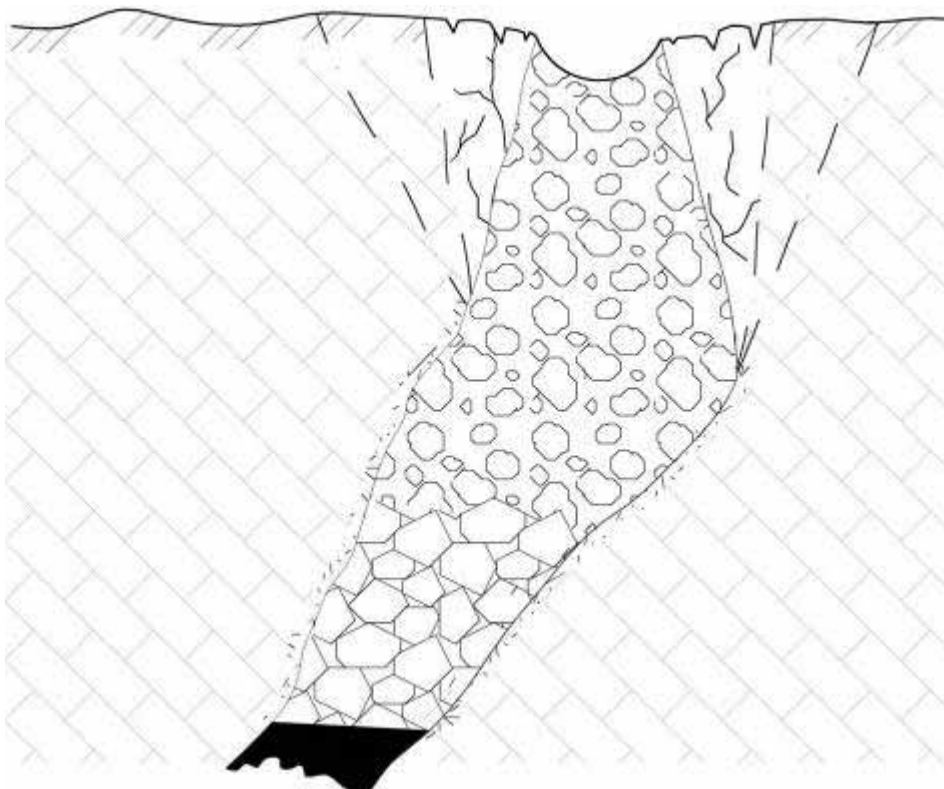


Рисунок 6. Образование воронки обрушения на поверхности.

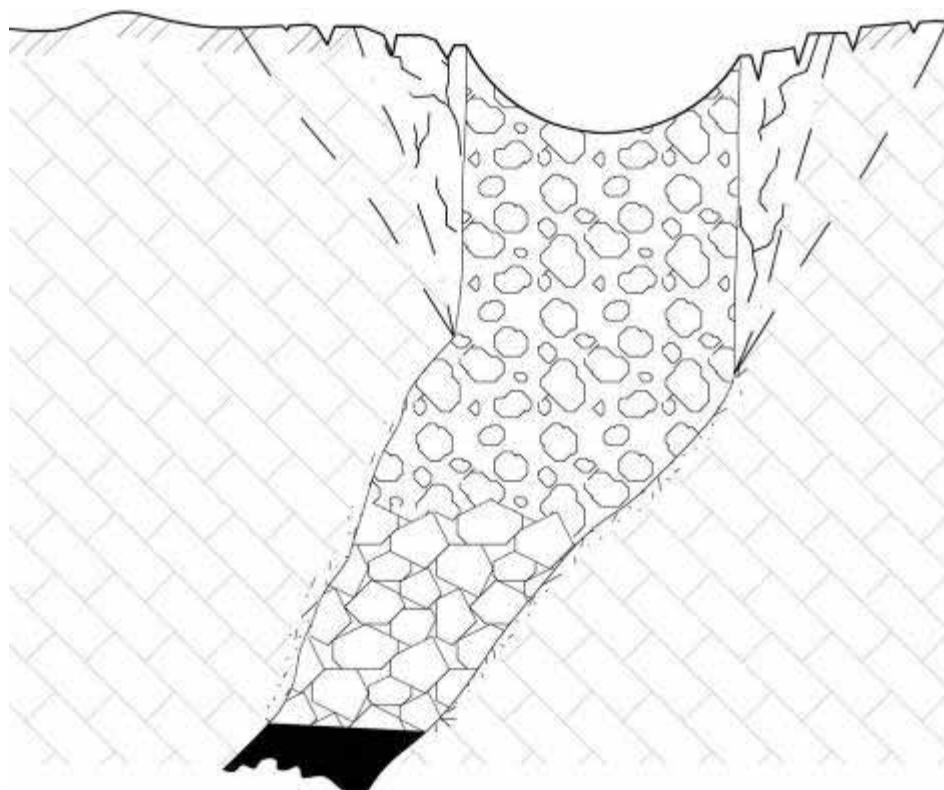


Рисунок 7. Установившаяся стадия развития процесса сдвижения

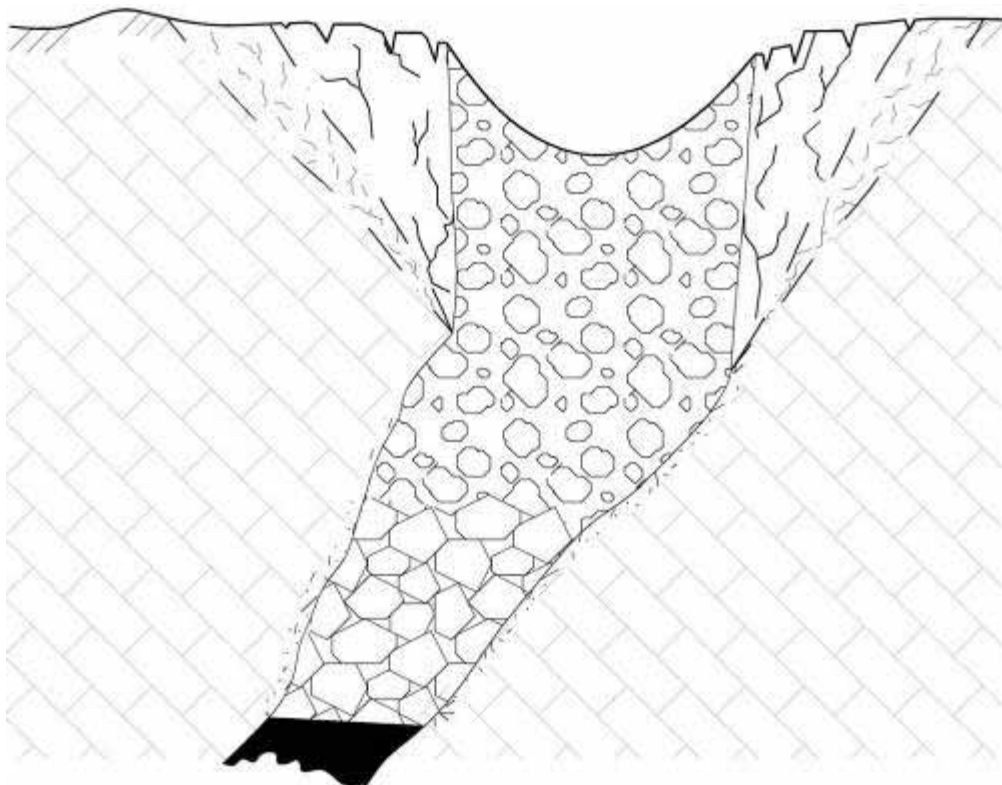


Рисунок 8. Окончание процесса сдвигения.

Сдвигение горных пород начинается плавным деформированием поверхности, испытывающей оседания без разрыва структурных связей массива. Изменение рельефа проявляется в форме прогиба с образованием трещин на поверхности, что является свидетельством неустойчивого состояния подработанной толщи пород. Начальной стадии соответствуют геомеханические модели подработанного массива, представленные на рис. 3 и 4. Возникает потенциальная опасность деформирования или разрушения зданий и сооружений.

Образование и развитие зоны провала и трещин свидетельствует об активной стадии сдвигения подработанного массива. Изменение рельефа поверхности происходит с величинами вызывающими разрушение зданий и сооружений, попадающих в область провала и трещин. Геомеханические модели (рис. 5 и 6) отражают активную стадию развития процесса сдвигения – наиболее опасный период для эксплуатации подработанного участка.

Лишь после вступления процесса сдвигения в завершающую стадию вредное влияние горных работ снижается, стремясь к нулю. Подработанному массиву в стадии окончания процесса сдвигения соответствуют модели, представленные на рис. 7 и 8. При

сформировавшихся зонах дезинтеграции пород и постепенном снижении угрозы деформирования объектов становятся возможными некоторые виды эксплуатации территорий. По мере затухания процесса сдвижения будет расширяться возможности хозяйственного использования подработанных участков.

Таким образом, определив фактическую стадию развития процесса сдвижения, можно оценить дальнейшее поведение подработанного массива и его опасность для эксплуатации.

Поскольку сдвижение горных пород – сложное многофакторное природно-техногенное явление, протекающее в толще пород между горными выработками и земной поверхностью, экспериментальные и теоретические исследования процесса сдвижения на подработанных территориях сопряжены со многими трудностями. В частности развитие свода обрушения в высоту при отсутствии непосредственного доступа к нему крайне затруднено для контроля. Результаты наблюдений в горных выработках и по скважинным реперам недостаточно надежны вследствие контролирования узких участков массива, а после ликвидации шахты развитие свода обрушения вообще не контролируется. Прямые (маркшейдерские) методы контроля деформаций в этом случае позволяют контролировать лишь проявление сдвижения на дневной поверхности

Развитие сдвижения в подземном пространстве доступно для изучения в основном косвенными (геофизическими) методами, которые позволяют определить с поверхности массива формы и геометрию горных пород, за счет контраста их свойств (электрическое сопротивление, магнитную проницаемость и др.). Центральным элементом, определяющим контраст геофизических свойств пород подработанных горных массивов, является структура и степень её изменения. Изменение первоначальной структуры подработанного массива происходит за счет увеличения трещиноватости пород вследствие их механического перемещения. Степень изменения структуры пород зависит от воздействующих нагрузок. В области горного массива, подвергнувшейся подработке, формируются области, где происходит сжатие, сдвиг и разгрузка пород. При этом каждый тип нагружения провоцирует увеличение или уменьшение пустотно-трещинного пространства пород, которое сопровождается соответствующим изменением электрических и других свойств пород.

1.2 Деформационные процессы при добыче полезных ископаемых как источник аварий и катастроф

Неуклонный рост риска возникновения техногенных катастроф в области недропользования коррелирует с растущими масштабами добычи, переработки и транспортировки полезных ископаемых, свидетельствуя о том, что принимаемые меры по предотвращению катастрофических последствий от техногенного воздействия горных разработок на литосферу не компенсируют падения безопасности среды обитания человека.

Приведенные в работе [8] данные свидетельствуют, что, наряду с уже очевидными источниками катастроф гидротехническими сооружениями, все более уверенно в этой роли утверждаются крупные горные предприятия по добыче твердых полезных ископаемых, нефти и газа. Несмотря на очевидную необходимость предупреждения техногенных катастроф, связанных с добычей полезных ископаемых, проблема эта пока не привлекает к себе должного внимания ни в прикладном аспекте, ни в фундаментальной области.

Геодинамические явления в земной коре имеют или естественное происхождение, обусловленное тектоническими процессами, или искусственное, вызванное техногенной деятельностью по добыче полезных ископаемых. Механизм развития обоих видов геодинамических явлений одинаков. Отличие состоит лишь в местах проявления. Техногенные или наведенные приурочены обязательно к областям влияния техногенных нагрузок, создаваемых на участках добычи полезных ископаемых. По результатам некоторых экспериментов радиус области влияния крупного горного предприятия составляет несколько десятков километров [9]. По теоретическим представлениям область влияния может иметь большие значения.

Медленное развитие деформаций, как правило, не сопровождается сейсмическими эффектами и разрушительные последствия в этом случае ограничиваются лишь непосредственным воздействием либо на основание объекта, либо на сам объект подземного типа. Опасность их, несмотря на отсутствие сейсмических эффектов определяется достаточно высокими скоростями деформирования земной поверхности, достигающими $(1.0-3.0) \cdot 10^{-3}$ в год в сейсмически спокойных районах Урала. При дискретном распределении деформаций в блочной среде можно ожидать смещения по структурным нарушениям с метровым измерением. Подобные примеры имели место в районе г. Камышлова и в Ирбитском районе Свердловской области в 1961-1962 годах, когда на поверхности земли образовались раскрытые трещины до 0.4 м шириной, уходящие на неизвестные глубины [10].

Распространенность медленных деформаций и подвижек представляет серьезную опасность для ответственных и экологически опасных сооружений. Особенно велика вероятность встречи с ними у протяженных объектов: магистральных трубопроводов,

железных дорог, линий электропередач и др., а также у ограждающих дамб и плотин водохранилищ, хвосто- и шламоохранилищ вследствие их тяготения к разломным структурам в земной коре.

При внешней сложности явлений, происходящих в районах добычи полезных ископаемых, геомеханическая модель исследуемого района может быть представлена несложными построениями [8]. Основным элементом модели является отображение участка земной коры либо нижним полупространством бесконечных размеров по площади и глубине, либо, в соответствии с глобальной тектоникой плит, в виде оболочки конечной толщины и бесконечных размеров в плане, находящейся на вязком слое астеносферы.

Граничные условия геомеханической модели включают боковые горизонтальные силы и объемный вес. В случае моделирования оболочки, на разделе между литосферой и астеносферой действуют гидростатические силы, уравнивающие вес литосферной плиты. Боковые горизонтальные силы состоят из горизонтальных тектонических сил, одинаковых по глубине, и бокового распора от гравитационных сил, пропорционального глубине. Техногенные силы соответствуют весу пород, перемещаемых при разработке. Наличие зон нагрузки и разгрузки создает моментное нагружение массива.

Теоретические исследования масштабного техногенного воздействия на участок литосферы в данном случае основываются на классических решениях механики сплошной среды. Для условий, когда модель представляется нижним полупространством, теоретические решения исходят из известного решения Бусинеска о действии сосредоточенной силы на полупространство [11]. В зависимости от характера нагрузки, сосредоточенная сила может заменена распределенной по площади по определенному закону. В случае моделирования литосферной плиты оболочкой, расчет параметров ее деформирования под воздействием техногенных нагрузок производится с помощью математического аппарата известных решений оболочек с разными видами нагрузок [12].

Экспериментальные исследования деформаций, вызванных техногенным воздействием добычи полезных ископаемых, осуществляются путем проведения геодезического мониторинга за геодезическими знаками, оборудованными в области влияния горных разработок. Учитывая размеры этой области, реальное проведение такого мониторинга стало возможно лишь с внедрением в практику научных исследований приборов спутниковой геодезии типа GPS. В настоящее время для этих целей используется методика, схематично представленная на рис. 9.

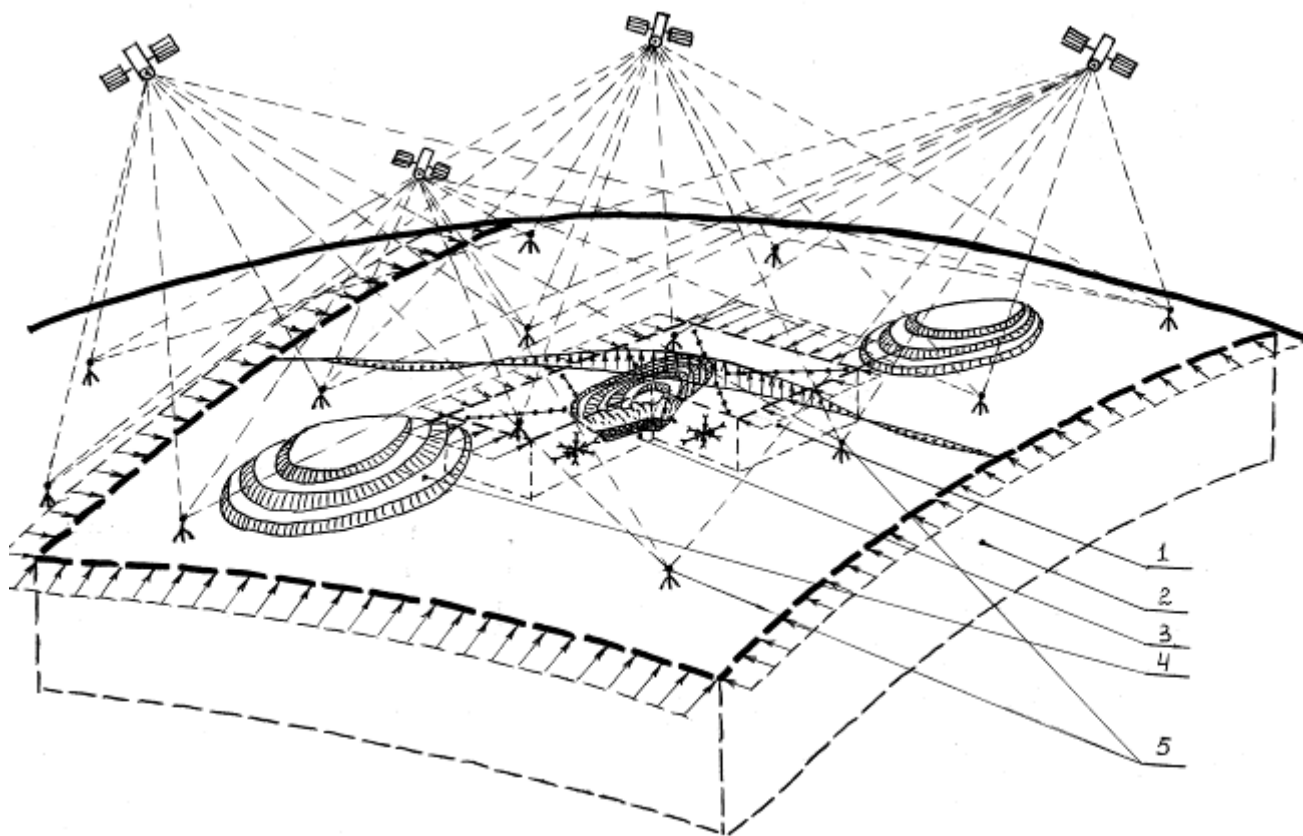


Рисунок 9. Принципиальная схема исследования техногенного воздействия добычи полезных ископаемых:

1 – зона добычи; 2 – литосферная плита; 3 – горные работы; 4 – отходы производства;
5 – геодезические пункты

Уральский регион исторически является крупнейшим горнодобывающим регионом России, поэтому для него риск возникновения техногенных катастроф, вызванных добычей полезных ископаемых очень реален. Три крупнейших карьера Урала, добывающие железную руду (г. Качканар), асбест (г. Асбест) и уголь (г. Коркино), значительно превысили уровень техногенного воздействия, при котором становятся возможными наведенные геодинамические процессы. Аналогичное положение сложилось и в районах подземной добычи соли (г. Соликамск), бокситов (г. Североуральск, г. Сатка), железной руды (г. Кушва, г. Нижний Тагил) и др. В настоящее время выделяется по крайней мере 7 районов добычи, потенциально опасных по наведенным геодинамическим явлениям.

В настоящее время исполнители проекта располагают большим объемом инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород на горных предприятиях Урала за 30-летний период. При этом применение комплексов спутниковой геодезии и лазерного сканирования дает принципиально новые возможности в этой области.

Лабораторные исследования моделей, отражающих литосферную плиту, в комплексе с теоретическими расчетами на основе теории оболочек свидетельствуют, что при действии естественных горизонтальных тектонических напряжений в земной коре, первый инвариант которых оценивается в среднем -30.8 МПа [13], в оболочке возникает критическая нагрузка, способная вызвать ее деформирование в виде «хлопка». Этот вид потери устойчивости, известный в теории оболочек, сопровождается мгновенным развитием деформаций с сейсмическими эффектами. Техногенные нагрузки в этом случае играют роль триггера, определяющего место и время развития деформаций.

Одним из характерных районов масштабного техногенного воздействия является район добычи асбеста вблизи г. Асбеста. В настоящее время глубина карьеров достигла 300 м и из них удалено более 5 млрд. тонн пород, большая часть которых заскладирована в отвалы. Кроме карьеров и отвалов комбината Ураласбест, в качестве техногенных факторов в этом районе выступают Курмановский щебенчатый и Малышевский изумрудный карьеры и их отвалы, а также Рефтинское и Белоярское водохранилище объемом около 1 км^3 каждое. Социальная опасность геодинамических проявлений в этом районе усугубляется наличием Белоярской атомной электростанции.

На первом этапе были проведены теоретические исследования геомеханической модели района с заданием техногенного воздействия соответствующими силами. Вертикальные смещения земной поверхности, вызванные техногенными силами представлены на рис. 10.

В распределении вертикальных смещений земной поверхности четко выделяются две области с противоположным направлением смещений - область влияния карьера с поднятием поверхности за счет техногенной разгрузки земной коры и области оседаний, вызванные нагружением земной коры отвалами и водохранилищами. Величины оседаний и поднятий примерно одинаковы и достигают до 1 м.

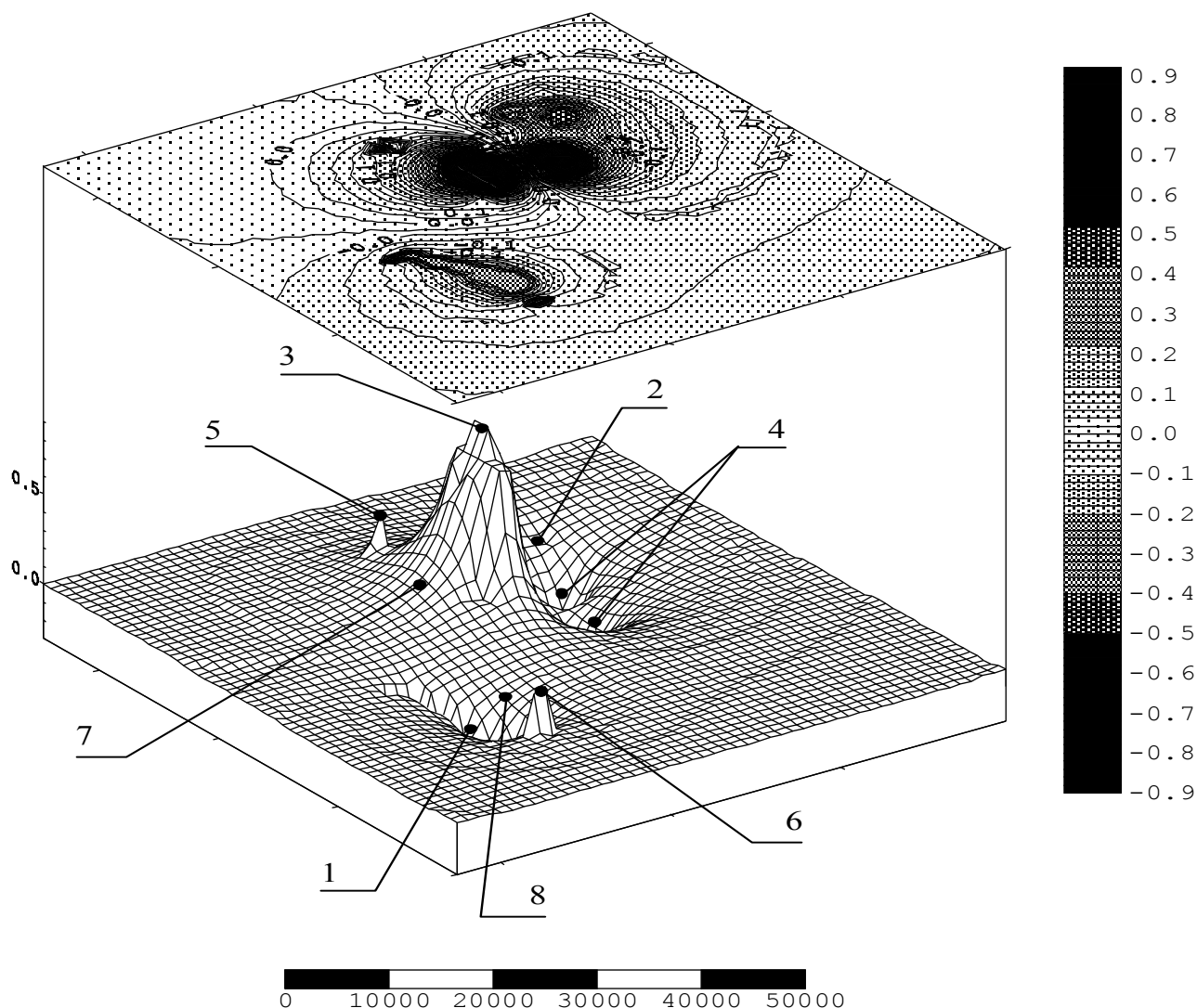


Рисунок 10. Вертикальные смещения земной поверхности, вызванные техногенным воздействием на литосферную плиту

1 – Белоярское водохранилище; 2 – Рефтинское водохранилище; 3 – Асбестовские карьеры; 4 – Асбестовские отвалы; 5 – Малышевские изумрудные карьеры; 6 – Курмановский щебеночный карьер; 7 – город Асбест; 8 – Белоярская атомная электростанция; 9 – поселок Белоярский; 10 – город Заречный; 11 – Асбестовско-Ключевская зона разломов

Представленные результаты получены на основе теоретических решений, в которых на этом этапе среда модели принималась однородной. В реальной иерархически блочной среде деформирование носит дискретный характер, что внесет свои существенные поправки в теоретическую картину.

Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы относительно параметров масштабного техногенного воздействия горных разработок и

возможных последствий их проявления. Уровень вертикальных смещений земной поверхности от воздействия техногенных факторов сопоставим с величинами смещений, фиксируемыми на территориях происшедших крупных землетрясений [14]. Разные направления техногенного воздействия, обусловленные нагрузкой и разгрузкой участков земной поверхности, вызывают моментные нагружения массива горных пород. Близость противоположных по знаку техногенных нагрузок создает области с высоким градиентом вертикальных смещений, что повышает вероятность проявления в этих областях геодинамических эффектов.

Таким образом, техногенное воздействие горных разработок вносит серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние больших участков земной коры и может послужить причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями. Исследование закономерностей развития деформационных процессов в земной коре под влиянием добычи полезных ископаемых, наряду с фундаментальным значением, весьма актуальны в прикладной сфере для обеспечения экологической безопасности при освоении недр. Решение задач по выявлению техногенных катастроф, законов их развития и разработке методов предотвращения требует организации геодезического мониторинга за деформациями в области влияния горных разработок с применением оборудования спутниковой геодезии и лазерного сканирования.

1.3 Характеристика деформационных процессов в районах добычи полезных ископаемых

Выполненный в работе анализ современных теоретических исследований процесса сдвижения, свидетельствует, что применяемые аналитический аппарат и геомеханические модели с высокой степенью достоверности раскрывают общие закономерности процесса сдвижения и деформирования массива горных пород в области влияния открытой и подземной разработки месторождений. Построение расчетных геомеханических моделей деформируемого массива, используемых в теоретических исследованиях, основывается на следующих предпосылках:

1. Массив горных пород, представляющий собой в трехмерном объемном варианте нижнее полупространство, в общем случае представляется сплошной однородной изотропной средой, которая наделяется упругими, упруго-пластическими и иными свойствами. Деформационные свойства среды модели могут определяться как физико-механическими свойствами горных пород в куске, так и интегральными деформационными характеристиками массива. Некоторые исследователи в стремлении приблизить модельные свойства изотропного однородного массива к свойствам иерархически-блочного реального породного массива делают попытки внести в него структурные элементы, поверхности ослабления, неоднородности свойств и т.д. [15-18].

2. Начальное напряженно-деформированное состояние породного массива, используемое в расчетах в качестве граничных условий, в соответствии с современным уровнем исследований, складывается из гравитационных сил, тектонических напряжений и переменных напряжений, вызванных современными геодинамическими короткопериодными знакопеременными движениями. Гравитационные силы, зависящие от веса налегающих пород и бокового распора (рис. 11), изменяются пропорционально глубине: при глубине разработки 500 метров они могут достигать 10-15 МПа. Горизонтальные тектонические напряжения постоянны по глубине, характеризуются величиной главных нормальных напряжений, первый инвариант которых оценивается в 30.8 МПа [19-21], и направлением их действия. Причем направленность их действия не совпадает в общем случае с простиранием месторождения, а величины главных напряжений существенно отличаются, создавая анизотропию в исходном напряженном состоянии. Иерархически-блочное строение породного массива во многом предопределяет неоднородность суммарного напряженного состояния, поэтому в расчетной модели используются интегральные его характеристики. Переменные во времени напряжения, обусловленные короткопериодными циклическими геодинамическими движениями, достигают 0.5 - 2 МПа [22-25].

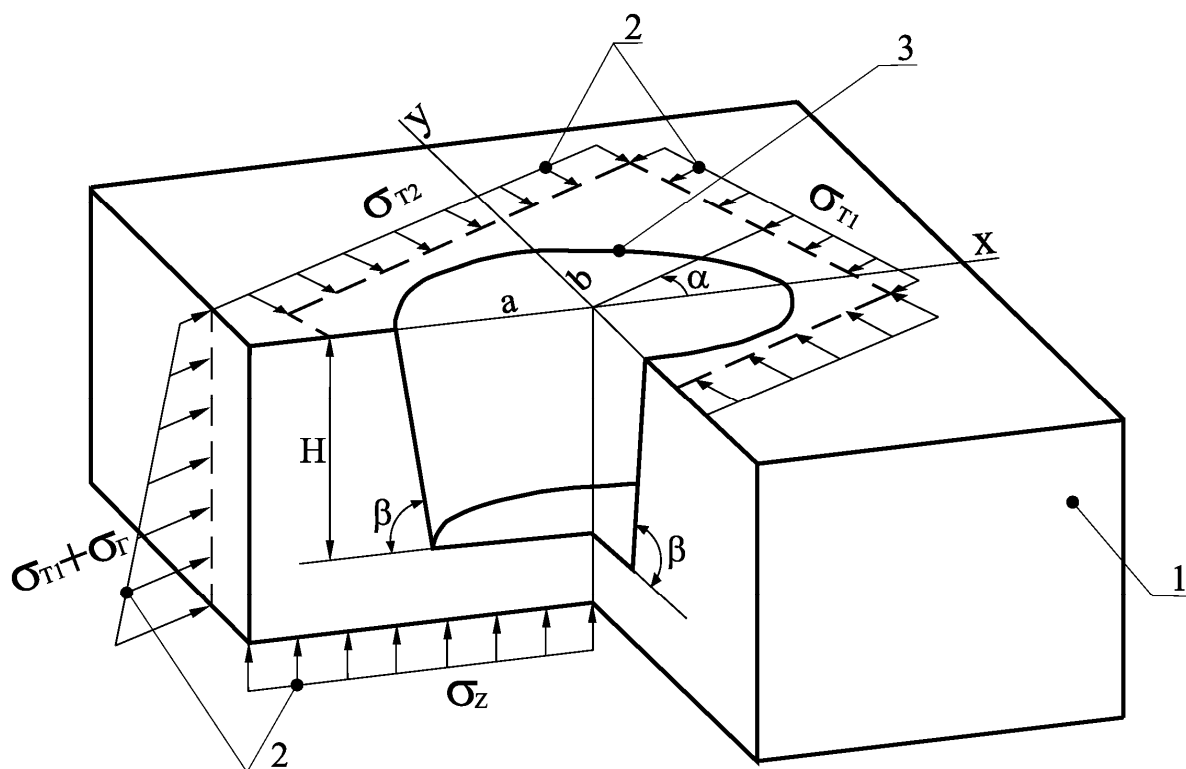


Рисунок 11 – Основные элементы геомеханической модели

1 – массив горных пород; 2 – напряжения, действующие в породном массиве;

3 – область техногенных возмущений

3. Техногенные источники возмущения, представленные карьерным пространством при открытых горных работах и выработанным очистным пространством при подземном способе разработки, характеризуются объемными геометрическими параметрами, глубиной их расположения в породном массиве, ориентацией главных осей техногенных возмущений относительно простирания рудных тел и относительно направлений действия главных нормальных напряжений. В результате отработки месторождения, в зависимости от принятой технологии ведения горных работ, геометрические параметры техногенных возмущений и ориентация их главных осей в пространстве постоянно претерпевают значительные изменения, что приводит к многократному перераспределению нагрузок в массиве во времени [26-30].

Использование рассмотренной расчетной геомеханической модели разрабатываемого месторождения в теоретических исследованиях процесса сдвижения позволяет выявить общие закономерности деформирования массива горных пород и земной поверхности на основе аналитических решений, численного моделирования и других теоретических методов. Однако следует отметить, что многофакторность развития процесса

сдвигения в реальных горно-геологических условиях обуславливает многочисленные неопределенности в теоретических методах, отмеченные следующими факторами:

- отличием деформационных свойств реального породного массива, имеющего иерархически-блочное строение, от модельных представлений, в которых, как правило, используются интегральные деформационные характеристики: в результате, фактические закономерности сдвигения и деформирования массива горных пород и земной поверхности существенно отличаются на значительных участках мульды сдвигения, но особенно серьезные расхождения теоретических и фактических параметров процесса сдвигения имеют место на конкретных исследуемых участках земной поверхности, что может привести к ошибочным решениям по обеспечению безопасности расположенных на них охраняемых объектов;

- сложностью получения на каждый момент отработки месторождения реальных параметров напряженно-деформированного состояния породного массива, вводимых в расчеты в качестве граничных условий, вследствие его значительной неоднородности, обусловленной иерархически-блочным строением реального массива; в результате, для расчетов используются усредненные значения напряжений, достоверность которых не всегда обоснована [31-34];

- упрощением реальных форм областей техногенных возмущений, поскольку в расчетной модели сложная реальная конфигурация областей техногенных возмущений – карьерного пространства при открытых горных работах и зоны обрушения при подземном способе разработки – аппроксимируется правильными геометрическими построениями – эллипсами или окружностями – частным случаем эллипса, в которые с той или иной степенью погрешности вписываются контуры областей техногенных возмущений [35].

Влияние вышеперечисленных факторов на расхождение теоретических и фактических параметров развития процесса сдвигения сохраняет актуальность требования нормативных документов [36] обязательного инструментального контроля за развитием деформационных процессов, происходящих в породном массиве и на земной поверхности; на его основе корректируются прогнозные теоретические общие закономерности процесса сдвигения, оценивается состояние охраняемых объектов, находящихся в области вредного влияния горных разработок, разрабатываются мероприятия по обеспечению их безопасности [37-39].

Однако, как отмечено выше, линейный принцип построения наблюдательной станции, на котором основаны современные методы инструментального контроля за сдвижением, не раскрывают реального процесса деформирования. В связи с этим, для совершенствования метода инструментального контроля путем введения площадного

принципа построения наблюдательной станции, обеспечивающего получение полного тензора деформаций, целесообразно рассмотреть основные параметры геомеханической модели разрабатываемого месторождения, имеющие значение для него.

Также в массиве горных пород и на земной поверхности формируется обширная область деформирования, распространяющаяся на несколько километров, в которой проявляются сдвигения и деформации с меньшими градиентами. Не вызывая существенных деформаций в массиве горных пород и охраняемых объектах, сдвигение горных пород в этой области, тем не менее, выступает как иницирующий фактор, способный нарушить хрупкое равновесие, существующее в массиве горных пород, и в комплексе с существующими современными геодинамическими движениями вызвать проявления вторичной наведенной геодинамической активности и серьезные катастрофические последствия. Поэтому эта внешняя область и внешняя зона на земной поверхности должны также контролироваться в процессе разработки месторождения [40, 26, 41, 42].

Таким образом, при разработке месторождения в массиве горных пород и на земной поверхности формируются две области деформирования с соответствующими зонами на земной поверхности: внутренняя и внешняя. Внутренняя зона формируется в результате перераспределения напряжений вокруг техногенной области возмущения под действием уравновешенной системы сил, образуя в породном массиве вторичное напряженно-деформированное состояние. Внешняя зона формируется в результате нарушения изостазии за счет выемки полезного ископаемого из области техногенного возмущения, размещения вскрышных пород и отходов обогащения в области отвалообразования, образовании депрессионной воронки при осушении месторождения. Все эти силы, участвующие в формировании внешней зоны деформирования, представляют собой неуравновешенные системы. Геометрические параметры внутренней зоны деформирования определяются размерами и морфологией отрабатываемых рудных тел, физико-механическими свойствами вмещающих пород, структурными особенностями породного массива и глубиной залегания. На различных глубинах, вплоть до земной поверхности, они определяются размерами и формой горизонтального сечения отработанной площади и углами разрывов и сдвижения. На нижних горизонтах, непосредственно примыкающих к очистным работам, горизонтальные сечения внутренней зоны деформирования во многом повторяют формы контура отработки, выше, по мере удаления от очистного пространства, это подобие может проявиться лишь в крупном плане без повторения деталей.

Граница зоны трещин, ограничивающая область техногенных возмущений от подземной отработки рудного тела, определяется углами разрыва, величины которых для рудных месторождений Урала и Казахстана [43] изменяются в широких пределах: от 55° до

80° в лежащем боку, от 45° до 80° в висячем боку и от 60° до 80° в торцах рудных тел. Размеры областей техногенных возмущений (размеры главных полуосей a и b аппроксимирующего эллипса и средний радиус r), отстроенные для ряда месторождений Урала и Казахстана по углам разрыва, приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, радиус возмущающей полости для большинства месторождений изменяется в небольших пределах – от 260 до 310 м.

Граница мульды сдвижения по указанным критериям отстраивается под граничными углами, значение которых изменяется: от 35° до 70° в лежащем боку, от 40° до 70° в висячем боку и от 60° до 70° в торцах рудных тел. Размеры зон плавных деформаций (размеры главных полуосей A и B аппроксимирующего эллипса и средний радиус R), отстроенные для уже рассмотренных месторождений Урала и Казахстана по граничным углам, также приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что средние радиусы внутренней зоны деформирования также изменяются в небольших пределах – от 510 до 657 м. Таким образом, по нормативным требованиям зона плавных деформаций, представляющая интерес для углубленного контроля, для современных глубин разработки заключается в пределах 1100 - 2300 м по простиранию рудного тела и 430 - 1200 м вкрест простирания. Средние размеры внутренней области деформирования в плане составляют 1200 м.

Вместе с тем, в соответствии с классическими положениями теории упругости [44-47], внутреннюю зону деформирования следует рассматривать также и как область формирования вторичного напряженно-деформированного состояния под действием уравновешенной системы сил, вызванных образованием выработанного пространства от подземных разработок или карьера, а также зоны обрушения. В соответствии с принципом Сен-Венана, эта область носит локальный характер и размеры ее распространения в породном массиве составляют от 2.5 до 3 радиусов возмущающей техногенной полости.

В табл. 1. приведены соотношения радиуса зоны плавных деформаций и среднего радиуса зоны обрушения: это соотношение выдерживается в пределах 1.9 - 2.5. Можно сделать вывод, что реальные размеры зоны плавных деформаций будут несколько больше, чем размеры, полученные по граничным углам.

Таблица 1 - Геометрические параметры внутренней зоны деформирования для месторождений Урала и Казахстана

Месторождение, участок	Глубина залегания, м	Размеры возмущающей области, м			Размеры внутренней зоны деформирования, м			Соотношение R/r
		a	b	r	A	B	R	
Северопесчанское: Северопесчанский	600	310	215	263	1178	258	657	2.5
Высокогорское: Восточно-Ревдинский	700	370	180	275	1036	288	605	2.2
Гороблагодатское	500	370	180	275	1100	216	578	2.1
Им. 40 лет КазССР - Молодежное	500	305	315	310	549	583	573	1.9

Таблица 2 – Геометрические параметры внешней зоны деформирования для месторождений Урала и Казахстана

Месторождение, участок	Радиус возмущающей полости r , м	Радиус зоны натуральных исследований, м	Радиус влияния R , м		Соотношение R/r	
			Критерий по 5% деформаций	Критерий по точности	Критерий по 5% деформаций	Критерий по точности
Киембаевский ГОК: Главный карьер	1000	1000-8000	20000	12000	20.0	12.0
Донской ГОК: Карьер 40 лет Каз ССР	500	750-3000	10000	5000	20.0	10.0
Гороблагодатское РУ: Главный карьер	750	750-3000	15000	8000	20.0	10.7
Северопесчанское: Северопесчанский	260	-	5000	2000	19.2	7.7
Высокогорское: Восточно-Ревдинский	275	500-3000	5000	2000	18.1	7.3

Таким образом, внутренняя зона деформирования, требующая углубленного исследования сдвижений и деформаций, имеет следующие геометрические параметры:

- размеры по простиранию разрабатываемого рудного тела, определяемые по граничным углам 1100 - 2360 м, а определяемые по размерам области Сен-Венана до 2500м;

- размеры вкрест простирания разрабатываемого рудного тела, определяемые по граничным углам, 430 - 1200 м, а определяемые по размерам области Сен-Венана до 1300м;

- средние размеры зоны внутренней зоны деформирования – мульды сдвижения составляют 1.9 - 3.0 радиуса возмущающей техногенной полости.

Внешняя зона деформирования, как было отмечено выше, образуется за счет нарушения изостазии в результате разгрузки породного массива – выемки горной массы, значительной откачки подземных вод при осушении месторождения или, напротив, его пригрузки при размещении вскрыши и отходов обогащения в области отвалообразования.

В соответствии с классическими решениями Бусинеска [46-47], система неуравновешенных сил, приложенная к бесконечному упругому полупространству, имеет неограниченную сферу влияния, а затухание деформаций пропорционально расстоянию от точки приложения нагрузки. В табл. 2 приведены результаты расчетов геометрических параметров внешней зоны деформирования, выполненных для ряда месторождений Урала и Казахстана.

Для определения радиуса внешней зоны деформирования необходимо ввести критерии оценки сферы влияния деформаций. В табл. 2 радиус зоны влияния оценивался по двум критериям: 5% величин деформаций на контуре возмущающей полости и по критерию точности измерений, с помощью которых данные деформации можно зафиксировать с помощью современных геодезических приборов, поскольку величина деформаций обратно пропорциональна расстоянию от возмущающей техногенной полости.

Таким образом, если принять для установления границы зоны внешнего деформирования за основной критерий 5% величин деформаций на контуре возмущающей полости, то размеры внешней области деформирования составят 5000 - 20000 м, или 18.1 - 20.0 размеров области техногенных возмущений. По критерию точности инструментальных измерений размеры внешней области деформирования будут меньше: 2000 - 12000 м, или 7.3 - 12.0 размеров области техногенных возмущений.

Итак, геометрические параметры геомеханической модели, в которой необходимо углубленно исследовать сдвижения и деформации составляют:

- для внутренней зоны деформирования 1.9 - 3.0 радиуса возмущающей техногенной полости;
- для внешней зоны деформирования 7.3 - 12.0 радиусов возмущающей техногенной полости.

Геомеханическая модель процесса сдвижения горных пород, описанная выше, не накладывает дополнительных ограничений на свойства массива горных пород, кроме некоторых особенностей, присущих скальным массивам – высокой крепости, достаточно выраженной жесткости и склонности к хрупкому разрушению. Что касается поведения среды под нагрузкой, то в модели возможно использовать среды, наделенные упругими, упруго-пластическими и иными свойствами.

Современные горные науки и науки о Земле располагают обширными сведениями о физических и механических свойствах горных пород в куске, позволяющими обоснованно решать многие горнотехнические задачи. Большой вклад в развитие исследований в этой области внесла школа, возглавляемая академиком В.В. Ржевским [27, 28]. Исследования же свойств горных пород в реальных массивах, в условиях их естественного залегания, носят пока единичный характер и касаются относительно небольших объемов. Поэтому выбор деформационных свойств геомеханической 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. Даже небольшие образцы скальной породы, такие как керны, представляют собой композитную и многофазную среду, состоящую из различных минеральных элементов с отличающимися физическими свойствами, из трещин, микротрещин и пор, насыщенных газом и жидкостью. При рассмотрении же больших объемов наглядно проявляется блочное строение породных массивов, обусловленное многочисленными структурными неоднородностями и нарушениями, такими как разломы, зоны дробления, открытые и закрытые трещины. К этой картине добавляются неоднородности, обусловленные литологической изменчивостью пород – химического состава и текстуры, - различной степенью эрозии и обводненности, характером напластования и складчатости, вторичной минерализации открытых трещин и др. Такая дискретность и неоднородность среды приводит к неоднородности ее напряженно-деформированного состояния, а наличие структурных неоднородностей различного размера – к масштабной неоднородности, то есть к качественно и количественно различным свойствам массива горных пород при различных объемах его деформирования и базах исследований [48, 49].

При этом неоднородность массивов скальных горных пород имеет иерархический характер. Структурные блоки, образованные структурными неоднородностями определенного иерархического уровня, разбиты на более мелкие структурные блоки, которые включают в себя элементы более низкого иерархического уровня и т.д. Таким образом, реальный массив горных пород можно представить как физическую неоднородность, иерархически дискретную, в различной степени и формах анизотропную среду, механические процессы деформирования которой имеют нелинейный и необратимый характер. Схематично подобное строение массива горных пород показано на рис. 12. Геологическое строение реального массива Высокогорского месторождения и его структура представлены на рис. 13.

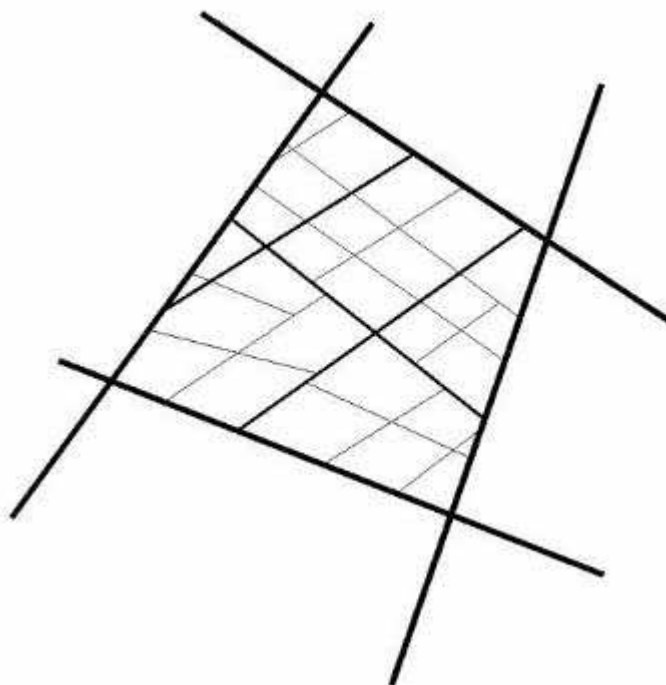


Рисунок 12 – Структурные неоднородности массива горных пород

Очевидно, что адекватное математическое описание процессов деформирования такой среды крайне сложно. В связи с этим в геомеханике при анализе механических процессов и решении конкретных горнотехнических задач в качестве объекта исследований приходится рассматривать не реальные горные массивы, а их модели, которые отражают лишь те физико-механические и геометрические свойства реальной среды, которые оказывают влияние на решение поставленной горнотехнической задачи в пределах требуемой точности.

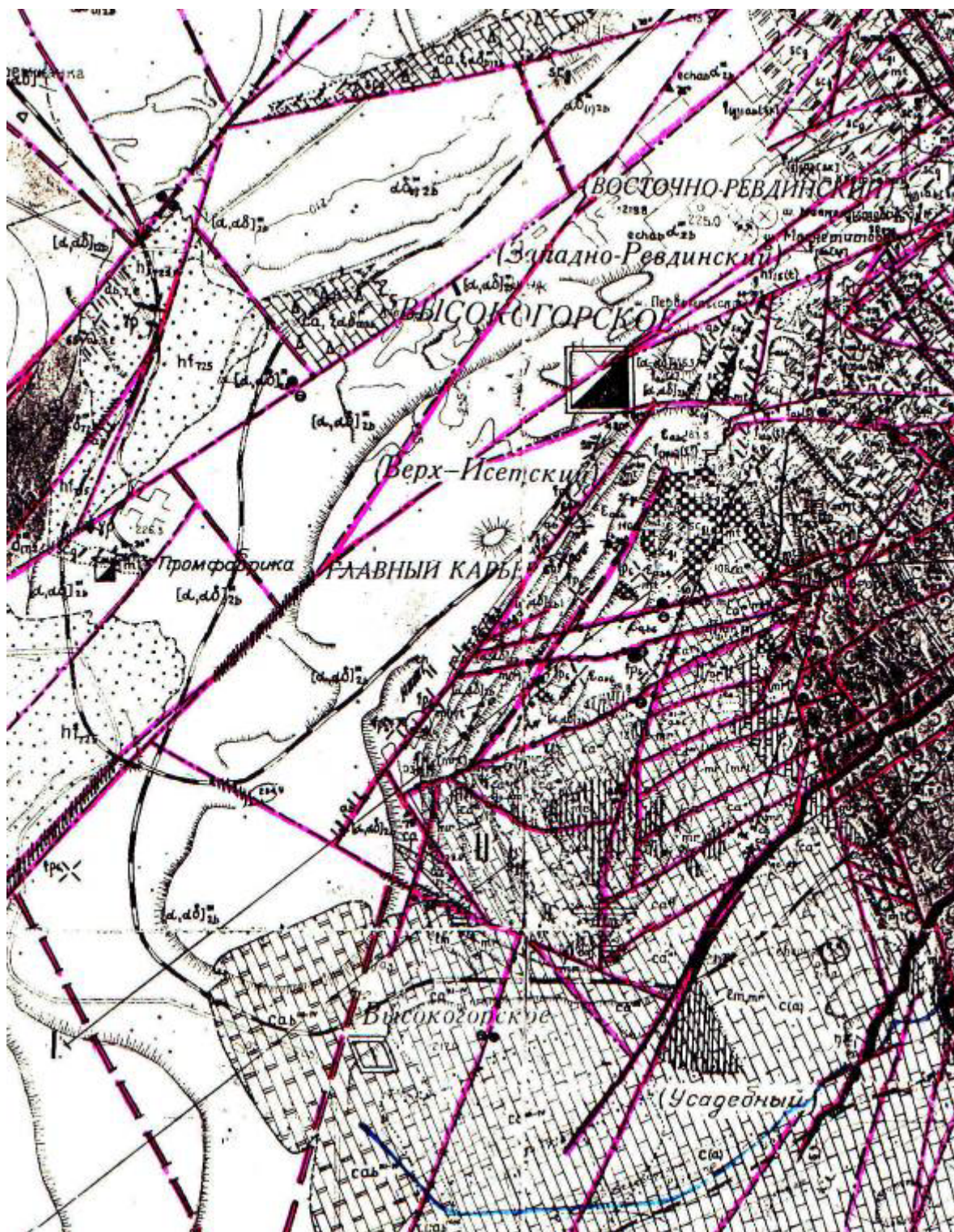


Рисунок 13 – Геологическое строение реального массива Высокогорского месторождения и его структура

В общем виде используемые модели деформируемых массивов скальных горных пород можно подразделить на дискретные и сплошные. Дискретные модели предполагают большую степень соответствия реальности, так как при их составлении предпринимается попытка отобразить фактически существующую дискретность и неоднородность среды. Однако это крайне сложная задача, и поэтому в настоящее время наибольшее применение находят континуальные модели, основой для построения которых является использование для физически дискретной деформируемой среды положения о математической сплошности. В данном случае понятие математической сплошности сводится к требованию непрерывности поля напряжений и деформаций. Основой для этого явилось введение понятия элементарного объема, то есть такого объема среды, который сохранял бы в себе все требуемые в рамках решаемой задачи деформационные характеристики этой среды и в то же время был настолько мал по сравнению с деформируемым объектом, что его напряженно-деформированное состояние можно было бы рассматривать как точечное. В качестве элементарного объема может выступать как частица-зерно, так и частица-кирпичик, которые слагают реальный массив горных пород: усредненные напряжения и деформации некоторого объема такой среды, достаточно большого по сравнению с элементарным, оказываются статистически эквивалентны усредненным напряжениям и деформациям этого же объема в модели идеально сплошной среды.

В сдвигании горных пород в рассматриваемой геомеханической модели принимают участие массивы различных размеров. Так, при изучении процесса сдвигания во внешней зоне деформирования размеры исследуемого участка могут составлять несколько десятков километров, а при изучении общих закономерностей развития процесса сдвигания во внутренней области деформирования составляют от нескольких сотен метров до 1 - 2 километров. При решении частных вопросов охраны подрабатываемых сооружений исследуются деформации участков размерами в десятки и сотни метров. Во всех случаях в качестве деформируемой среды выступает реальный массив горных пород.

Промышленные эксперименты, проведенные на месторождениях Урала, свидетельствуют, что расчеты деформаций и сдвижений с использованием однородной упругой изотропной модели массива горных пород на больших участках, охватывающих несколько уровней неоднородностей, дают в большинстве случаев результаты, хорошо согласующиеся с опытом. Это дает возможность пользоваться расчетами не только в методическом плане, но и для решения конкретных горнотехнических задач. Определять конкретные значения деформационных характеристик и структуры массива при решении

практических вопросов можно теоретическими методами [18], непосредственными экспериментами или с помощью эмпирических корреляционных связей.

В последние годы разработан экспериментальный метод определения модуля деформации на базах, превышающих километры [50]. Метод основан на измерении деформаций земной поверхности, вызванных нарушением изостатического равновесия на участке земной коры за счет разработки месторождений, отсыпки отвалов, влияния депрессионной воронки и других видов масштабного техногенного воздействия [26]. Данными исследованиями было установлено, что численные значения интегральных деформационных характеристик массива – модуля упругости и коэффициента Пуассона на больших базах составляют в среднем $E = 5 \cdot 10^{-3}$ МПа; $\mu = 0.3$. Определение деформационных характеристик массива на километровых и близких к ним базах наиболее полно соответствует условиям развития процесса сдвижения горных пород на рудных месторождениях, решения задач по прогнозу и управления его основными параметрами. Иерархически-блочное строение массива и роль дискретности его деформирования исследуется как с применением инструментальных измерений сдвижений и деформаций породного массива на горных предприятиях [33], так и с использованием современных геофизических методов [34].

Экспериментально-теоретический подход к раскрытию закономерностей развития процесса сдвижения, принятый в данной работе, позволяет использовать преимущества упругих однородных изотропных сред и устранить присущие им недостатки.

Исходной информацией для исследований служат результаты инструментальных наблюдений, отражающие реальную структуру массива горных пород и его деформационные свойства, то есть реальное напряженно-деформированное состояние с его дискретностью и неоднородностью. Представление их в тензорной форме осуществляется на основе упругой однородной среды. На конкретном участке охраняемого объекта результаты интерпретации отражают реальные значения параметров с учетом структур более высокого ранга, чем охраняемый объект. В целом на месторождении, на территории области влияния частные неоднородности усредняются, что позволяет раскрыть действующие общие закономерности развития процесса сдвижения во взаимосвязи с порядком и последовательностью разработки месторождения.

Таким образом, принятый экспериментально-теоретический метод решения задачи позволяет использовать модель с упругой однородной изотропной средой, наделенной деформационными свойствами, соответствующими рассматриваемым базам деформирования.

Граничные условия модели включают систему сил и деформаций, действующих по плоскостям, ограничивающим область массива горных пород, затронутую техногенным влиянием добычи полезных ископаемых. Их величины и направления определяются непосредственно параметрами напряженного состояния нетронутого массива горных пород.

Фундаментальные представления о параметрах напряженно-деформированного состояния массива горных пород за последние несколько десятилетий претерпели серьезную эволюцию на основе теоретических и, особенно, экспериментальных исследований структуры и свойств скальных массивов и компонент первоначального и вторичного полей напряжений.

До внедрения в практику исследований массовых экспериментальных измерений напряжений представления о напряженном состоянии массива горных пород базировались на гипотезах А. Гейма и А.Н. Динника, в соответствии с которыми вертикальные напряжения определяются весом налегающих пород, а горизонтальные – боковым распором деформирующихся пород. Экспериментальные измерения напряжений подтвердили справедливость этих гипотез. Вместе с тем было установлено, что в массиве горных пород, кроме гравитационных напряжений, действует сложный комплекс иных сил, обусловленных многочисленными факторами. Наиболее существенными среди них, имеющими повсеместное распространение являются тектонические силы. Остаточным напряжениям, напряжениям, вызванным метаморфизмом вмещающих пород, изменением водного режима и другими факторами, присущ более локальный характер.

Таким образом, первоначальные горизонтальные напряжения, действующие на внешние границы, в общем случае включают следующие компоненты (см. рис. 11): силы бокового распора от действия веса налегающей толщи пород (σ_T); тектонические напряжения, характеризуемые величиной главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и направлением их действия. Силы бокового распора изменяются пропорционально глубине. Горизонтальные тектонические силы в соответствии с проведенными обобщениями экспериментальных данных постоянны по глубине, и первый инвариант горизонтальных тектонических напряжений составляет $\sigma_1 + \sigma_2 = -30.8 \pm 2.3$ МПа [21].

Экспериментальными исследованиями напряжений и деформаций в процессе разработки месторождений в скальных породах установлено, что сложной иерархически-блочной структуре скального массива, рассмотренной в предыдущем разделе, присуще более сложное напряженно-деформированное состояние, параметры которого являются предметом дальнейших исследований. Они имеют прерывистый характер, со всей очевидностью проявляющийся на границах структурных блоков и создающий сложную

многоступенчатую мозаичную картину распределения компонент напряженно-деформированного состояния.

Современные экспериментальные методы определения напряжений основываются либо на распространенном в механике горных пород приеме создания возмущения в естественном поле напряжений путем образования полости в горном массиве и измерения сопутствующих деформаций в окружающих породах, либо путем измерения деформаций, возникающих в ненарушенном массиве горных пород под воздействием переменного поля напряжений [35]. В первом случае в результате обработки экспериментальных данных вычисляются абсолютные величины и направления действия главных нормальных напряжений, во втором случае вычисляются приращения напряжений, произошедшие в массиве горных пород между двумя сериями измерений.

В зависимости от линейных размеров экспериментального участка различают измерения напряжений на малых и больших базах [50]. Измерения на малых базах основываются на измерении деформаций разгрузки малых участков, не превышающих 10 - 15 см. Основной недостаток этого способа заключается в том, что полученные с его помощью данные о параметрах напряженного состояния не отражают реальных процессов, происходящих в массиве горных пород. В реальном массиве скальных пород поле напряжений имеет неоднородную структуру, что затрудняет оценку напряженного состояния крупного участка горного массива или всего месторождения по данным точечных измерений.

Измерения напряжений на больших базах основываются на тех же теоретических предпосылках, что и измерения на малых базах. В качестве возмущающей полости используется зона обрушения от подземных горных работ. База измерения деформаций в этом случае увеличивается от первых метров до десятков и даже сотен метров.

В процессе разработки месторождения горизонтальные и вертикальные напряжения претерпевают существенные изменения. Во внутренней области деформирования наиболее серьезные изменения претерпевают горизонтальные напряжения, являющиеся основной причиной деформирования массива горных пород и земной поверхности. Однако во внешней области деформирования, находящейся под влиянием мощных техногенных нагрузок, возможны значительные изменения вертикальных напряжений за счет образования в массиве высокоградиентных зон деформаций.

При рассмотрении данной геомеханической модели сдвижения горных пород следует подчеркнуть, что, в соответствии с масштабами отображаемых массивов горных пород, речь идет об интегральных характеристиках поля напряжений, для определения

которых предпочтительны методы с базами измерений от сотен метров до нескольких километров. Таким образом, рабочая геомеханическая модель разрабатываемого месторождения для осуществления инструментального контроля за развитием процесса сдвижения и обеспечения сохранности охраняемых объектов может быть представлена в обобщенном виде (рис. 14).

Среда геомеханической модели – массив горных пород – представляет собой сплошное однородное упругое изотропное объемное тело – нижнее полупространство, наделенное упругими, упруго-пластическими и иными свойствами. Деформационные свойства среды модели определяются численными значениями интегральных деформационных характеристик массива, соответствующими рассматриваемым базам деформирования. Рабочая зона модели представлена дневной поверхностью с охраняемыми сооружениями и природными объектами.

Исходное состояние среды геомеханической модели – первоначальное напряженно-деформированное состояние – складывается из гравитационных сил, тектонических напряжений и переменных напряжений, вызванных короткопериодными знакопеременными движениями. Гравитационные силы переменны и изменяются пропорционально глубине, горизонтальные тектонические силы постоянны по глубине и имеют анизотропный характер, причем направления действия главных напряжений не совпадают с параметрами залегания рудных тел [51, 52].

В теле модели образуется выработанное пространство в виде карьера при открытых горных работах или выработанное пространство с зоной обрушения, представляющие собой область техногенного возмущения. Параметры выработанного пространства претерпевают значительные изменения во времени и пространстве и определяются способом и последовательностью отработки месторождения. Образование в породном массиве выемки приводит к нарушению естественного равновесия гравитационных и тектонических сил и к формированию вторичного напряженно-деформированного состояния, сопровождающегося соответствующими деформациями. Вокруг области техногенного возмущения формируются области влияния, подразделяющиеся на внутреннюю и внешнюю зоны деформирования, имеющие свои особенности развития процесса сдвижения и деформирования породного массива и земной поверхности. Внутренняя зона формируется под действием уравновешенной системы сил в результате перераспределения напряжений вокруг техногенной области возмущения. Внешняя зона формируется под воздействием неуравновешенной системы сил в результате нарушения изостазии.

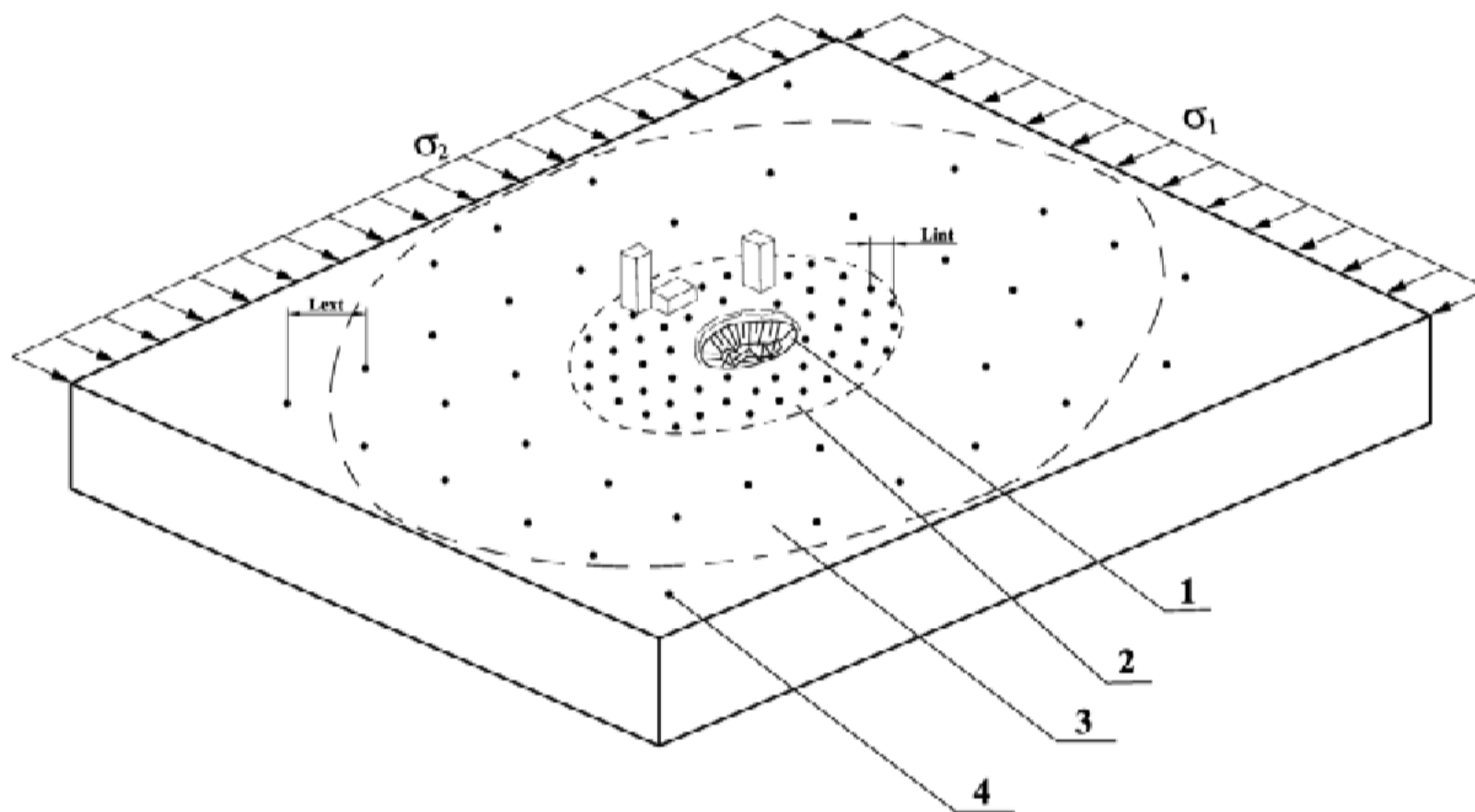


Рисунок 16 – Обобщенная геомеханическая модель разрабатываемого месторождения для осуществления инструментального контроля за развитием процесса сдвижения

*1 – выработанное пространство; 2 – внутренняя зона деформирования; 3 – внешняя зона деформирования;
4 – массив горных пород*

1.4 Закономерности и механизм взаимодействия деформационных процессов с объектами на земной поверхности

Сфера недропользования включает весь спектр человеческой деятельности, связанный с использованием массива горных пород и его земной поверхности. Объектом недропользования является любое сооружение, непосредственно контактирующее с горным массивом, размещённое на его дневной поверхности, а также частично или полностью находящиеся в горном массиве. Горный массив в свою очередь подразделяется на блоки, являя собой иерархически-блочную структуру.

Объекты недропользования подразделяются на несколько видов, по своим параметрам, по типу эксплуатации и функциональности. Расположение объекта относительно горного массива подразделяет его на два вида, поверхностный (наземный), и подземный. Наземный, контактирует главным образом с верхней, открытой частью горного массива – дневной поверхностью.

Подготовка площадки для наземного объекта на поверхности включает геодезические, геофизические, инженерно – геологические, гидрогеологические и геомеханические изыскания для определения условий места будущего размещения. С помощью геодезических изысканий определяют рельеф местности. Остальные виды изысканий позволяют получить информацию о том, что конкретно из себя представляет горный массив, находящийся непосредственно под будущим строением, его иерархически – блочной структуре, взаимоотношениях с другими массивами, о геодинамической активности. Получение этой информации позволяет выбрать безопасное место для размещения объектов.

Подземные объекты размещаются, сооружаются непосредственно в горном массиве. Место для их размещения выбирается так же по результатам информации полученной посредством проведения изысканий, описанных выше. Подземный объект является частью иерархически блочной среды. Здесь на него действуют силы не только тяжести, но и горизонтального и вертикального давления горных пород. Место для сооружения, размещения подземного объекта организуется в результате выемки грунта, вскрытия и разработки горных пород, частей и целого горного массива.

Совокупность наземного и подземного объектов являет собой третий вид объекта недропользования – комбинированный, объект частично расположенный под землей и частично выходящий на дневную поверхность. Таким образом, этот объект состоит из двух блоков – наземного и подземного.

В итоге выделяется три вида объектов недропользования в зависимости от расположения относительно горного массива (Рис. 17).

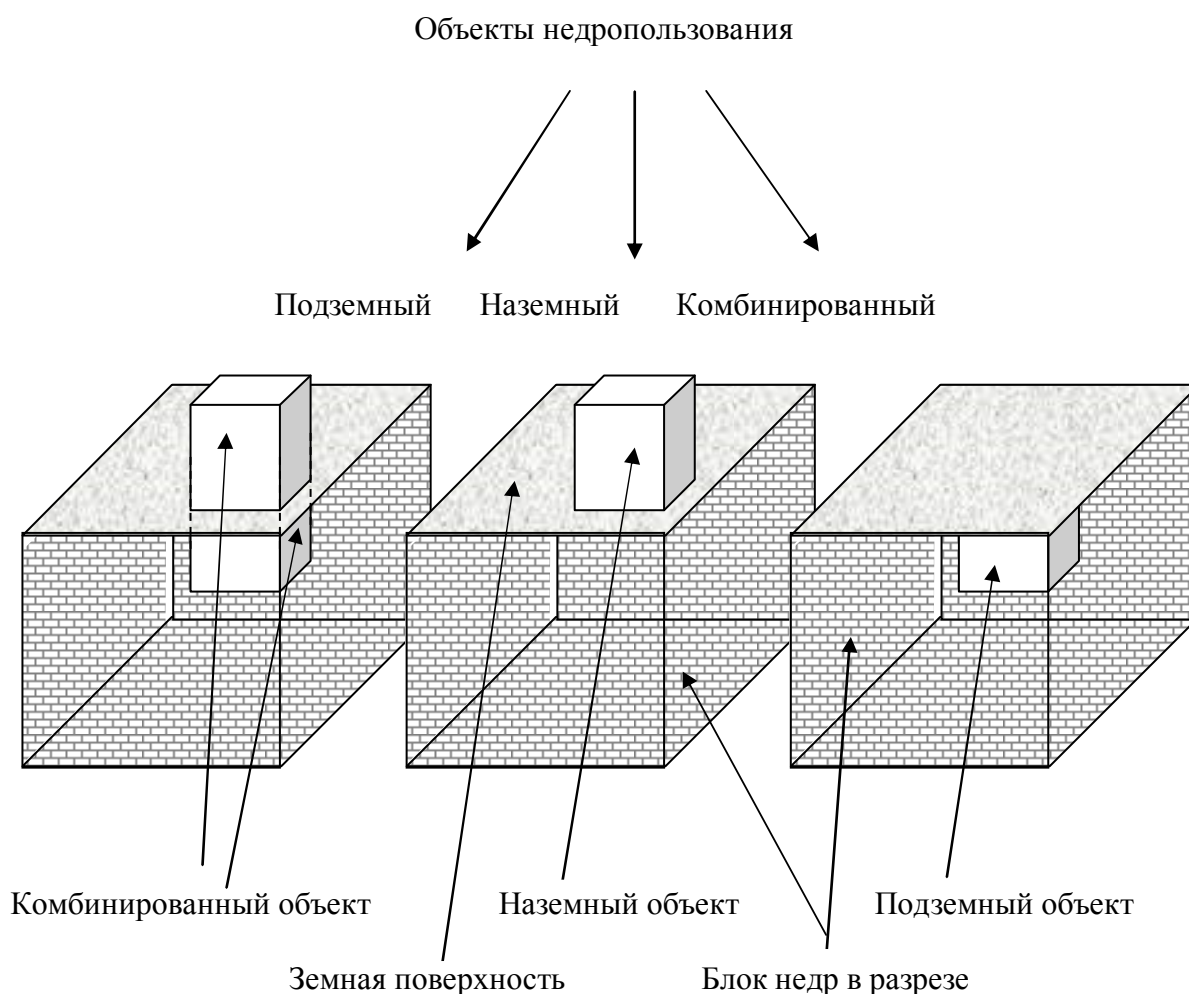


Рисунок 17 – Расположение объектов недропользования относительно горного массива

Развитие деформационных процессов, сопровождающих подземную разработку месторождений, приводит к различным повреждениям объектов подрабатываемой застройки, которая может объединять здания и сооружения, отнесенные к жилым, общественным и промышленным объектам. При этом характер повреждений зависит оттого, какие именно подрабатываемые объекты, и какой вид деформаций они испытали в результате подработки.

В современной практике подземных разработок угольных, рудных и нерудных месторождений среди многообразия случаев вредного воздействия деформаций на здания и сооружения с позиции рассмотрения и решения вопросов проблемы их безопасной эксплуатации на подрабатываемых территориях, в качестве основной причины наблюдаемых повреждений у подрабатываемых объектов следует рассматривать деформации от подземных горных работ.

При этом многие повреждения зданий и сооружений на подрабатываемой территории могут быть вызванными деформациями не от горных работ, а деформациями, возникшими в связи с воздействием других антропогенных и природных факторов как на основание, так и собственно на конструкцию здания и сооружения.

Независимо от причин, вызвавших деформацию, общность характерных признаков наблюдаемых повреждений у подрабатываемых объектов позволяет их классифицировать по виду деформаций (рис. 18).

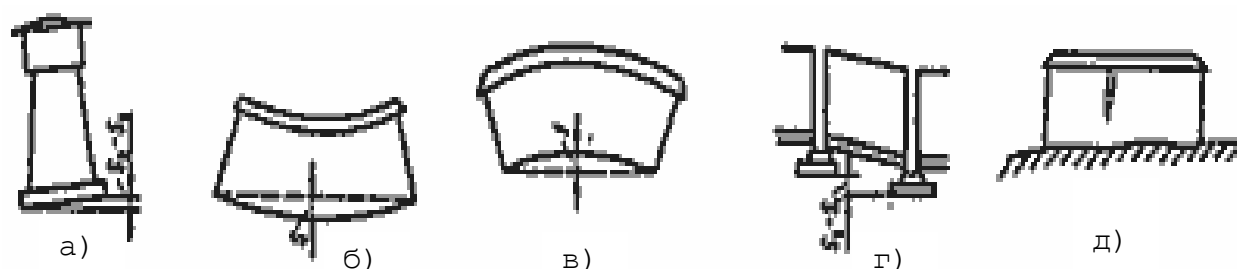


Рисунок 18 - Виды деформаций сооружения:

а- наклон; б- прогиб; в- выгиб; г- перекос; д - трещинообразование

Вертикальные деформации вызывают перемещение сооружения или его частей вверх или вниз и подразделяются на осадки, просадки, набухания и оседания, подъемы или выпирания. Горизонтальные деформации вызывают горизонтальные смещения или сдвиги сооружения или наклоны, которые называют креном.

Приведенные параметры сдвижения земной поверхности задействованы нормативными документами (Правила охраны и СНиПы) в качестве основных исходных данных, учитываемых при проектировании зданий и сооружений, а также, используемых для оценки и прогноза их состояния по условиям сохранения режима безопасной их эксплуатации на подрабатываемых территориях.

В зависимости от того, к какому типу относятся подрабатываемые здания и сооружения: жилые, общественные или промышленные объекты, чувствительность их конструкций к восприятию воздействию вредных деформаций может быть различной. Так, например, жилые и промышленные здания более всего страдают от наклонов, кривизны и горизонтальных деформаций. Для транспортных сооружений трубопроводов и сетей канализации опасность представляют оседания земной поверхности деформации сжатия или растяжения, создающие продольные и поперечные деформации. Преобладание процесса

развития трещин в сооружении при отсутствии проявления других деформационных процессов сдвижения связывают с изменением кривизны мульды сдвижения.

Следует отметить, что при равномерных оседаниях прочность и устойчивость сооружений не снижается, но они существенно влияют на связи с коммуникациями и другими сооружениями. Действие неравномерных осадок на сооружение всегда создает дополнительные напряжения в их конструкциях и может быть опасным. Вследствие неравномерных деформаций на сооружение могут произойти крены, прогибы, выгибы, перекосы, кручения разрывы в конструктивных элементах сооружений.

Таким образом, фактическое состояние жилых, общественных и промышленных объектов на подрабатываемой территории оценивается степенью подработки, которая обусловлена суммарным воздействием сдвижений и деформаций и деформаций, вызванных природными факторами, что не учитывается существующей методикой оценки влияния деформационных процессов на безопасность подрабатываемых объектов недропользования.

Одним из важнейших элементов обеспечения безопасности являются меры по раннему выявлению возможности обрушения здания под воздействием природно-техногенных воздействий, геодинамических процессов, деформации основания и изменения в грунтовых условиях под объектом. Особое внимание уделяется изучению влияния деформаций на сооружения высотного типа, которые по конструктивным признакам подразделяются на высотные сооружения ступенчатого, коробчатого и башенного типа - высотные здания, высотные жилые дома, телевизионные башни, дымовые трубы, градирни ТЭЦ, радиорелейные мачты и т. д. Для всех этих высотных сооружений характерно сосредоточение огромной нагрузки на основание и фундаменты вызывающей осадку сооружения, данный тип нагрузки относится к постоянному типу. Эти деформации, присущие всем типам высотных сооружений, возрастают с ростом нагрузки в строительный период и постепенно, по мере уплотнения грунтов, стабилизируются в период эксплуатации.

Деформационные процессы земной поверхности, влияющие на устойчивость сооружения, могут иметь, как естественную природу (трендовые и короткопериодные горизонтальные и вертикальные подвижки по границам структурных блоков, образование карстовых воронок и провалов в основании здания, подвижки в результате сейсмических событий), так и техногенное происхождение (осадки земной поверхности, горизонтальные смещения, искривление поверхности, в результате различной деятельности человека).

Трендовые подвижки происходят в основном медленно и способны оказать влияние на сооружения, только накапливаясь в течение длительного промежутка времени. Неравномерность осадки основания (вертикальные подвижки) сооружения приводит к нарушению вертикальности (крену), прогибам отдельных элементов сооружения и

трещинам. Горизонтальные смещения (растяжение или сжатие), вызывают дополнительные нагрузки на фундамент сооружений. Степень деформации характеризуется величиной и скоростью процесса. Иногда характер деформаций влияет на нормальный режим функционирования сооружения, может вызвать разрушения фундаментов и полную или частичную потерю несущей способности. В этом случае при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений, особо чувствительных к деформациям, необходим учет деформаций, которые по своей величине могут быть существенны для устойчивости строительных конструкций.

Образование карстовых воронок и провалов в основании сооружения, вызывает локальные разрушения основания под отдельными несущими конструкциями сооружения, что приводит к потере несущей способности части конструкции и к перераспределению нагрузки на другие конструкции сооружения. При неспособности уцелевшей части конструкции выдержать дополнительные нагрузки может произойти прогрессирующее обрушение сооружения. Под прогрессирующим (лавинообразным) обрушением понимается распространение начального локального повреждения в виде цепной реакции от элемента к элементу, которое, в конечном счете, приводит к обрушению всего сооружения или непропорционально большой его части. Основное средство защиты зданий от прогрессирующего обрушения – проведение изысканий на стадии проектирования, резервирование прочности несущих элементов.

Анализ последствий сильных землетрясений показывает, что при сейсмических воздействиях возникают не только поступательные, но и вращательные (крутильные) колебания в основании сооружений. При поступательных и крутильных колебаниях происходят повреждения или разрушения торцевых стен, изгиб центральных частей протяженных в плане сооружений. При сильном сейсмическом воздействии часть здания, расположенная на более слабых грунтах, испытывает неоднородную осадку, при этом возможно проявление горизонтальной составляющей деформации с угловой (вращательной) компонентой. Такие деформации являются одним из наиболее значимых факторов повреждения сооружений, и в обязательном порядке должны учитываться при проектировании мероприятий по снижению сейсмического риска, а, в первую очередь, при усилении существующих зданий.

Механизм воздействия деформационных процессов техногенного происхождения, в основании высотных сооружений, аналогичен механизму воздействия процессов имеющих естественную природу. Техногенные деформации выражаются в основном вертикальными деформациями, осадками (в некоторых случаях даже поднятием) поверхности основания, при неравномерных осадках возникает наклон поверхности, который приводит к нарушению

вертикальности (крену), а так же к прогибам отдельных элементов сооружения, горизонтальные деформации (растяжение или сжатие), вызывают дополнительные нагрузки на фундамент сооружений а так же изменением свойств грунтов в основании сооружения в результате техногенного воздействия.

1.5 Выводы по разделу

1. Проблема сдвижения массива горных пород и земной поверхности под влиянием горных разработок приобретает все более высокую актуальность в связи с тем, что при увеличении масштабов горного производства в область вредного влияния горных разработок попадает все большее количество охраняемых объектов. При этом уровень смещений земной поверхности от воздействия техногенных факторов сопоставим с величинами смещений, фиксируемыми на территориях происшедших крупных землетрясений. Разные направления техногенного воздействия, обусловленные нагрузкой и разгрузкой участков земной поверхности, вызывают моментные нагружения массива горных пород. Близость противоположных по знаку техногенных нагрузок создает области с высоким градиентом вертикальных смещений, что повышает вероятность проявления в этих областях геодинамических эффектов.

2. Таким образом, техногенное воздействие горных разработок вносит серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние больших участков земной коры и может послужить причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями. Исследование закономерностей развития деформационных процессов в земной коре под влиянием добычи полезных ископаемых, наряду с фундаментальным значением, весьма актуальны в прикладной сфере для обеспечения экологической безопасности при освоении недр. Решение задач по выявлению техногенных катастроф, законов их развития и разработке методов предотвращения требует организации геодезического мониторинга за деформациями в области влияния горных разработок с применением оборудования спутниковой геодезии и лазерного сканирования.

3. Методология проведения инструментальных измерений отстает от современных теоретических представлений, основанных на закономерностях формирования анизотропного напряженно-деформированного состояния в иерархически-блочном породном массиве и численных методах моделирования. Это приводит к тому, что современные теоретические методы исследований опираются на экспериментальные данные, получаемые с использованием методов инструментальных исследований, не обеспечивающих полноты данных о процессе сдвижения. В результате измерений, выполняемых по традиционным методикам инструментальных исследований, информация о

развитии процесса сдвижения на месторождении не в полном объеме отражает реальные геомеханические процессы, происходящие в подработанном массиве горных пород. К настоящему времени сложилась реальная необходимость пересмотра и совершенствования методики инструментальных измерений и приведения ее в соответствие с современными теоретическими представлениями о развитии процесса сдвижения породного массива и земной поверхности.

4. Особенности возникновения и развития процесса сдвижения при разработке рудного месторождения определяются группами факторов, характеризующих свойства массива горных пород, его напряженное состояние и геометрические параметры разрабатываемого месторождения. Геомеханическая модель разрабатываемого месторождения состоит из двух специфичных областей деформирования – внутренней, образованной воздействием уравновешенной системы сил, возникающей по контурам выработанных пространств и зон обрушений, и внешней, образованной за счет перемещения масс добываемого полезного ископаемого, добычи и складирования в отвалы вскрышных пород, а также откачки подземных вод.

5. Сфера недропользования включает весь спектр человеческой деятельности, связанный с использованием массива горных пород и его земной поверхности. При этом объектом недропользования является любое сооружение, непосредственно контактирующее с горным массивом, размещённое на его дневной поверхности, а также частично или полностью находящиеся в горном массиве. При этом многие повреждения зданий и сооружений на подрабатываемой территории могут быть вызванными деформациями не от горных работ, а деформациями, возникшими в связи с воздействием других антропогенных и природных факторов как на основание, так и собственно на конструкцию здания и сооружения. Вертикальные деформации вызывают перемещение сооружения или его частей вверх или вниз и подразделяются на осадки, просадки, набухания и оседания, подъемы или выпирания. Горизонтальные деформации вызывают горизонтальные смещения или сдвиги сооружения или наклоны, которые называют креном.

2 Разработка регламента проведения мониторинга деформационных процессов в районах ведения горных работ

2.1 Законодательные и нормативные требования к мониторингу деформационных процессов

Статья 22 Федерального Закона «О недрах», определяющая права и обязанности пользователя недр, требует, чтобы пользователь недр обеспечил соблюдение норм и правил по охране недр, атмосферного воздуха, земель, лесов, вод, а также зданий и сооружений от вредного влияния работ, связанных с использованием недр [53]. Для выполнения этого требования и обеспечения безопасности ведения работ, связанных с использованием недр, статьей 24 этого же закона предписывается проведение комплекса геологических и иных наблюдений, достаточных для обеспечения нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций, своевременное определение и нанесение на планы горных работ опасных зон.

Таким образом, целью ведения мониторинга является информационное обеспечение органов управления государственным фондом недр, надзорные органы и недропользователя о состоянии геологической среды и развивающихся в ней процессов и явлений в период недропользования.

Для реализации этой цели предусматривается решение следующих основных задач:

- оценка текущего состояния геологической среды;
- составление текущих оперативных и долгосрочных прогнозов изменения состояния геологической среды;
- разработка мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций и ослаблению негативных последствий эксплуатационных работ;
- предоставление органам надзора информации о состоянии геологической среды.

Изменение инженерно-геологических и геотектонических условий с развитием опасных геологических процессов происходит в следующих основных направлениях:

- развитие деформаций в массиве горных пород и на земной поверхности вследствие изменения напряженного состояния, трещиноватости и физико-механических свойств;
- оседание земной поверхности в результате уплотнения пород коллекторов и нарушения гидрогеологических режимов;
- возникновение или активизация суффозионно-карстовых процессов;
- активизация эндогенных процессов (техногенные землетрясения).

Проведение маркшейдерских работ в процессе мониторинга направлено на контроль деформационных процессов.

Задачи маркшейдерских работ по проведению мониторинга вытекают из требований Федерального Закона «О недрах» [53] и регламентируются «Инструкцией по производству маркшейдерских работ» [54]. В соответствии с этими документами необходимо:

- разработать программу – проект наблюдательной станции на месторождении, предусматривающий инструментальные наблюдения за деформационными процессами в зоне непосредственного влияния работ по использованию недр, в зоне депрессионной воронки и в периферийной зоне или в зоне фоновых деформаций;
- организовать реализацию проекта;
- организовать проведение инструментальных наблюдений за деформационными процессами;
- проводить анализ текущего состояния и прогноз развития опасных деформационных процессов;
- разработать мероприятия по предупреждению аварийных ситуаций и ослаблению негативного воздействия мокрой консервации;
- обеспечивать органы надзора и управления информацией о состоянии и прогнозах деформационных процессов.

Маркшейдерский мониторинг является наиболее ответственной частью общей системы мониторинга геологической среды в процессе недропользования, так как в его задачу входит обеспечение сохранности и безопасности объектов, попадающих в область влияния работ по использованию месторождения. Программа создания и ведения мониторинга разрабатывается в соответствии с требованиями к мониторингу, установленными в лицензии и должна содержать следующие разделы:

- цель и конкретные задачи мониторинга;
- выделение основных объектов наблюдений и состава наблюдаемых показателей;
- размещение пунктов наблюдательной сети и их конструкцию;
- методику проведения наблюдений;
- обработку данных и прогнозирование;
- состав, форму и сроки передачи данных в органы управления фондами недр и органы надзора.

Мониторинг деформационных процессов должен охватывать три зоны влияния эксплуатации подземного газового хранилища:

I зона – зона непосредственного ведения горных работ;

II зона – зона существенного влияния, распространяющаяся за пределы границ эксплуатационных работ, в пределах которой техногенные деформации оказывают фиксируемое инструментально влияние на состояние недр и расположенные в ней объекты;

III зона – периферийная зона, примыкающая к зоне существенного влияния или зона фонового мониторинга.

Деформационные процессы в первой и второй зонах определяются техногенной деятельностью по эксплуатации месторождения и фоновыми современными геодинамическими движениями. В периферийной зоне проявляются только фоновые современные геодинамические движения. На охраняемые объекты, попадающие в зоны влияния работ по эксплуатации месторождения, воздействуют суммарные деформации, проявляющиеся на конкретных участках их расположения.

Современные фоновые геодинамические движения подразделяются на трендовые движения (крип), имеющие относительно постоянное направление и скорость в течение года и более, и циклические движения полигармонического характера с продолжительностью циклов от нескольких секунд до нескольких часов и месяцев [55, 56]. Комплекс наблюдений в процессе мониторинга должен обеспечивать определение параметров суммарного тензора деформаций, включающего тензоры трендовых, циклических и техногенных деформаций.

Результаты мониторинга должны обеспечить получение данных о степени воздействия всего комплекса постоянных и переменных деформаций на охраняемые объекты, оценку текущего состояния безопасности объектов и прогноз их безопасности на последующие периоды эксплуатации месторождения. При необходимости результаты мониторинга должны обеспечивать разработку мер предупреждения аварийных ситуаций на охраняемых объектах.

В соответствии с требованиями СП 11-104-97 пункт 10.64 геодезические наблюдения на геодинамических полигонах в районах проявления геодинамических движений по разрывным тектоническим смещениям должны выполняться в комплексе со структурно-геоморфологическими и геофизическими исследованиями [56].

Наблюдательная станция, предназначенная для проведения деформационных процессов, вызванных эксплуатацией месторождения полезных ископаемых, создается по специальному проекту.

В сложных горно-геологических условиях, сопровождающих разработку месторождения, построение геодинамического полигона по классическим принципам конструирования наблюдательных станций не обеспечивает решения задач мониторинга [57]. Профильный принцип расположения реперов наблюдательной станции и традиционные методы проведения наблюдений в виде нивелировок и измерений изменений расстояний между реперами не отражают реальных процессов деформирования территорий, требуют несоразмерных трудовых и материальных затрат и, самое главное, не дают требуемой полноты информации о параметрах деформаций. 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 поставленных задач и принятия решений по охране объектов от влияния горных работ необходима достоверная информация о распределении деформаций в трехмерном пространстве, которую можно получить лишь с использованием площадного принципа построения наблюдательной станции и современных технологий спутниковой геодезии для определения полных трехмерных векторов смещений реперов, распределенных по исследуемой территории [58-60].

Основными результатами инструментальных наблюдений являются векторы техногенных и трендовых геодинамических движений, а также максимальные амплитуды и частоты циклических короткопериодных геодинамических движений. Они являются исходными данными для дальнейшей обработки и анализа развивающихся процессов. По ним отстраиваются карты распределения современных трендовых (техногенных и геодинамических) движений и карты распределения максимальных амплитуд циклических движений. Для дальнейшего анализа текущего состояния наблюдательная сеть реперов разбивается в систему треугольников разных размеров и разных сочетаний пунктов, по которым определяются величины и направления главных линейных деформаций «растяжение – сжатие» в горизонтальной плоскости и наклонов в вертикальной. По ним отстраиваются соответствующие карты.

Распределение параметров деформаций по территории и сопоставление их с критериями допустимых деформаций для охраняемых объектов позволяет оценить уровень негативного воздействия деформаций, вызванных разработкой месторождения, на охраняемые объекты и окружающую среду. Скорости развития деформационных процессов дают возможность осуществить прогноз на последующие периоды разработки. В случае выявления зон с высокими деформациями, наблюдательная станция дополнительно развивается для более глубокой детализации информации и оперативного принятия необходимых мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации жилых и промышленных объектов.

Результаты мониторинга и прогнозных оценок доводятся до сведения руководства недропользователя, органов надзора местного управления.

В случае возникновения аномальных процессов деформирования, создающих предпосылки к развитию аварийных ситуаций, разрабатываются рекомендации для принятия мер по предупреждению аварий.

2.2 Регламент спутниковых технологий площадного мониторинга деформационных процессов

Инструментальные исследования процесса с использованием комплексов спутниковой геодезии проводятся путем многократных измерений смещений реперов специально оборудованных наблюдательных станций. Под наблюдательной станцией в данном случае понимается система наблюдательных пунктов, которые закладываются на земной поверхности, в толще горных пород и конструктивных элементах охраняемых зданий и сооружений. Конструкция наблюдательной станции выбирается исходя из поставленных задач и горно-геологических условий месторождения.

При этом конструкция наблюдательной станции должна обеспечивать возможность получения данных о параметрах развития процесса сдвижения – полных пространственных векторов смещений точек земной поверхности для определения тензоров деформаций массива горных пород. Для получения полной картины процесса сдвижения с учетом дискретности деформирования массива необходимо, чтобы инструментальными измерениями были охвачены внешняя и внутренняя области деформирования и обеспечена возможность выявления анизотропии и аномалий в развитии процесса сдвижения. Конструкция наблюдательной станции должна также обеспечивать возможность инструментального контроля реальности прогнозных оценок с целью проведения своевременной корректировки принятых мер охраны.

В отличие от традиционного, линейного принципа построения наблюдательных станций по профильным линиям, обеспечивающим определение параметров деформаций только по направлениям профильных линий, предлагаемый площадной принцип построения наблюдательной станции выбран для получения пространственного тензора деформаций: по двум осям деформируемой площади и в вертикальном направлении по оси Z .

Исходя из вышеизложенного могут быть сформулированы основные принципы построения наблюдательной станции для инструментальных исследований процесса сдвижения с применением комплексов спутниковой геодезии:

- 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 проведения спутниковых геодезических измерений, легкий доступ к ним в любое время года и их однозначную идентификацию.

Наблюдательные станции для изучения процесса сдвижения при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых как во внешней, так и во внутренних областях деформирования имеют во многом общую конструкцию. Единственным их принципиальным отличием является то, что при разработке месторождения открытым способом во внутренней области деформирования, как правило, имеется возможность разместить репера наблюдательной станции непосредственно внутри возмущающей полости, то есть в карьерном пространстве. Эта возможность открывает перспективы более детального изучения процесса сдвижения внутри возмущающей полости на принципиально новом уровне. При подземных разработках размещать репера внутри зоны обрушения принципиально невозможно.

Площадной принцип построения наблюдательной станции подразумевает создание на исследуемом участке сети реперов, совокупность которых образует систему треугольных базовых элементов. Математический аппарат позволяет, зная величины смещения реперов между сериями наблюдений, определить полные пространственные тензоры деформаций для всех иерархически-блочных уровней породного массива.

Таким образом, задача инструментальных исследований сводится к высокоточному определению пространственных координат реперов наблюдательной станции, расположенных в вершинах базового треугольного измерительного элемента, на различные моменты времени. Эта задача может быть решена геодезическими методами – методами традиционной и спутниковой геодезии. При определении пространственных координат реперов методами традиционной геодезии необходимо выполнить измерения двух видов – линейно-угловые и высотные (нивелирование), при этом должна обеспечиваться прямая оптическая видимость между соседними реперами наблюдательной станции [61]. Для площадной наблюдательной станции это означает соблюдение условий прямой оптической видимости как минимум на три соседних репера, что не всегда достижимо в реальных условиях. Кроме этого, высокоточные традиционные геодезические измерения могут производиться только при определенных погодных условиях, в светлое время суток.

В отличие от традиционных геодезических методов, технологии спутниковой геодезии позволяют проводить измерения на том же уровне точности в любое время суток,

при любой погоде. Неоспоримым достоинством этих методов является возможность работать на наблюдательной станции, когда отсутствует прямая оптическая видимость между соседними реперами. Кроме этого, пространственные координаты реперов определяются в один прием, поскольку при спутниковых геодезических измерениях одновременно определяются все три координаты. Поэтому в разрабатываемой методике инструментальных исследований процесса сдвижения в качестве инструмента, позволяющего с высокой точностью определить пространственные координаты реперов наблюдательной станции, расположенных в вершинах базового треугольного измерительного элемента на различные моменты времени, принят комплекс спутниковой геодезии GPS [62-64].

Методика выполнения инструментальных исследований процесса сдвижения подразумевает многократное высокоточное переопределение координат реперов наблюдательной станции, что позволяет путем их сопоставления получать данные – полные пространственные вектора сдвижения, необходимые для вычисления полных тензоров деформаций породного массива. Укрупненная блок-схема выполнения инструментальных исследований процесса сдвижения представлена на рис. 19.

Серии инструментальных исследований процесса сдвижения

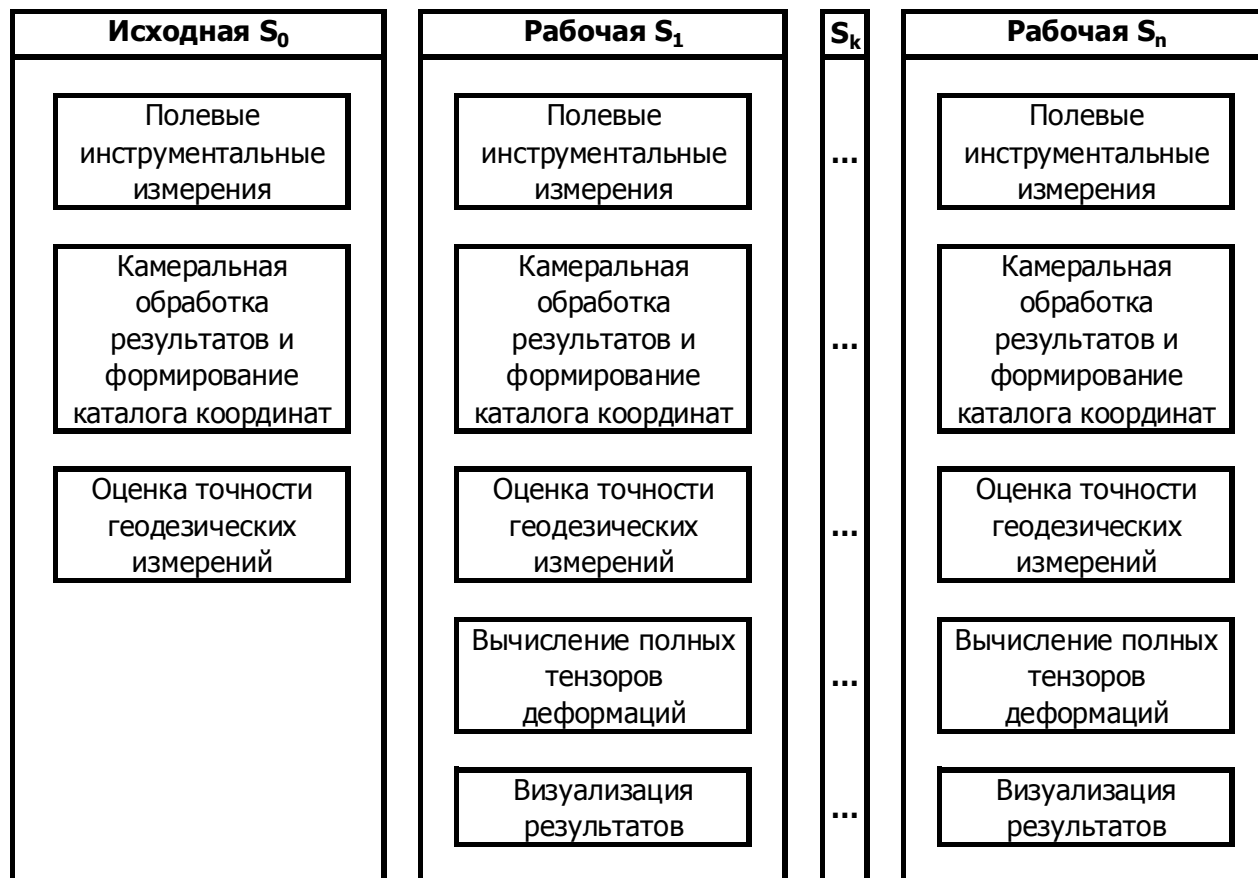


Рисунок 19 – Блок-схема выполнения инструментальных исследований процесса сдвижения

При любых геодезических работах особая роль отводится непосредственной организации полевых инструментальных измерений, идеология и методология которых были тщательно отработаны. Однако при широком внедрении спутниковых технологий в практику маркшейдерско-геодезических работ резко изменились организационные и технические принципы ведения полевых работ.

Свойственная спутниковым методам высокая производительность выполнения геодезических работ, с одной стороны, и особенности применения этих методов на промышленных объектах, с другой стороны, обуславливают необходимость четкой организации всего процесса спутниковых измерений, включая подготовительные работы. Поскольку инструментальные измерения параметров деформации массива горных пород имеют отличительную особенность – многократные периодические переопределения координат одних и тех же пунктов по одной и той же программе полевых работ, то имеется возможность детальной проработки проекта полевых измерений и дальнейшего его совершенствования.

Точные геодезические измерения производятся с использованием двух и более GPS-приемников геодезического класса, ведущих одновременную работу в дифференциальном режиме. Для обеспечения заданной точности определения плановых и высотных координат реперов наблюдательной станции необходимо обеспечить нормальные условия проведения наблюдений. Эти условия включают в себя прием сигналов от 5 и более спутников на всем протяжении измерений, низкое значение фактора DOP и отсутствие сбоев в приеме спутниковых радиосигналов. Накопленный опыт работы со спутниковой геодезической аппаратурой свидетельствует о том, что к важным факторам следует отнести легкость доступа к пунктам сети, удобство расположения и центрирования геодезической аппаратуры на пункте, обеспечение непрерывности электропитания, ведение полевого журнала и проч.

Существует несколько режимов работ спутниковых приемников, однако для высокоточных геодезических работ используются всего три режима: статический (static), быстростатический (faststatic) и кинематический (kinematic), применение которых позволяет измерять геометрические элементы геодезической сети с точностью от 1:100000 до 1:5000000, что соответствует миллиметровому уровню точности определения координат реперов наблюдательной станции. Все эти режимы подразумевают выполнение дифференциальных спутниковых наблюдений, по крайней мере, между двумя неподвижными приемниками. Статический режим является идеальным видом измерений на больших расстояниях – свыше 10 километров, или на коротких линиях с неблагоприятными условиями наблюдений, однако для его реализации требуется порядка одного часа измерений. Быстростатический режим является разновидностью статического режима для коротких базовых линий – менее 10 километров; при использовании этого режима миллиметровый уровень точности определения координат может быть достигнут при измерениях в течение 15 - 20 минут, однако для выполнения измерений в этом режиме требуется обеспечить радиовидимость на пять или более спутников с хорошим геометрическим фактором. Кинематический режим измерений позволяет достаточно быстро отнаблюдать большое количество реперов, но он требует, чтобы приемник удерживал захват спутников в течение всего времени перемещения между реперами сети. Этот режим является

идеальным для малых площадей, на которых репера располагаются рядом друг с другом и на которых отсутствуют препятствия для прохождения спутниковых радиосигналов. Для получения пространственных координат репера с миллиметровой точностью достаточно проводить спутниковые наблюдения на репере в течение 5 - 7 минут, однако во время съемки необходимо произвести ее инициализацию, что требует дополнительного времени [65, 56].

При создании и реконструкции геодезических сетей с использованием спутниковых приемников в большинстве публикаций рекомендованы следующие методы измерений:

- Лучевой метод. С опорного пункта или нескольких опорных пунктов координируются определяемые пункты сети. Он является очень производительным, однако имеет некоторые недостатки, основной – недостаточная надежность критериев оценки точности определяемых координат, базирующейся на анализе замкнутых геодезических построений. Однако этот недостаток легко устраняется при одновременной работе достаточного большого количества полевых приемников, когда в сети образуются замкнутые геометрические построения, либо при проведении независимых повторных измерений на пунктах сети, что, однако, заметно повышает трудоемкость полевых измерений. При измерении деформаций на горных предприятиях этот метод в основном используется для определения координат реперов наблюдательной станции, находящейся во внутренней области деформирования, так как в ней большое количество реперов сосредоточено на ограниченной территории.

- Сетевой метод. Измерения проводятся на каждой линии и на каждом пункте сети. Этот метод имеет много общего с традиционным методом построения геодезических сетей – трилатерацией. Основное достоинство – его высокая надежность, так как при измерениях образуется большое число замкнутых геометрических построений, что позволяет надежно оценить точность определяемых координат. Основной недостаток – высокая трудоемкость полевых работ при использовании ограниченного количества полевых приемников. Однако этот недостаток не так заметен при одновременной работе четырех и более GPS-приемников. В этом случае в геодезической сети выделяются несколько пунктов, на которых устанавливаются базовые приемники, которые накапливают данные в течение всего сеанса полевых работ. На остальных пунктах сети наблюдения проводят полевые приемники, которые поочередно устанавливаются на определяемых реперах наблюдательной станции. Этот метод измерений используют в основном для определения координат реперов наблюдательной станции, находящихся во внешней области деформирования, так как, во-первых, расстояния между реперами достигают нескольких километров, а во-вторых, данная наблюдательная станция является основой для геодезических построений более низких уровней.

- Совмещенный метод. Производится комбинация лучевого и сетевого методов измерений для достижения оптимальной производительности полевых работ и требуемой точности и надежности геодезических построений. Этот метод является основным при проведении исследований сдвижений земной поверхности и деформаций породного массива на горных предприятиях.

Во всех случаях определение пространственных координат рабочих реперов наблюдательной станции проводится от одного или нескольких условно-стабильных

опорных реперов сети более высокой иерархии, образующих один или более условно-стабильных базисов – сторон сети, не изменивших своей длины и превышений между эпохами измерений на величину, большую, чем среднеквадратическая ошибка измерений.

Основные этапы полевых инструментальных измерений могут быть представлены в виде блок-схемы (рис. 20). При этом этап «Подготовительные работы» (в силу специфики работы - многократного, от цикла к циклу, выполнения геодезических измерений на одних и тех же пунктах сети, по одной программе работ с дальнейшим анализом изменений геометрических взаимосвязей между реперами) может выполняться не в каждой серии измерений, а по мере необходимости, например при реконструкции наблюдательной станции.

Перед началом полевых работ в обязательном порядке производится предполевое планирование в камеральных условиях, которое включает в себя составление технического и рабочего проектов. Проектирование ведется как традиционным способом с использованием топографических карт и планов участка работ, так и с использованием входящего в комплект спутникового оборудования специального программного обеспечения, такого как Planning Software. Основной стадией, предшествующей составлению технического проекта, является сбор и обобщение необходимой информации об объекте, которая требуется в процессе работы над проектом.

Предварительная схема проектируемой сети реперов наблюдательной станции, которая составляется на начальной стадии разработки проекта, наносится на топографические планы соответствующего масштаба. При этом необходимо стремиться к тому, чтобы плотность сети наблюдательной станции соответствовала требованиям, предъявляемым к построению наблюдательных станций соответствующего иерархического уровня, а взаимное расположение реперов образовывало бы по возможности правильные геометрические построения – базовые треугольные элементы. Здесь следует особо отметить, что для векторных трехмерных построений, которые свойственны GPS-технологиям, геометрия создаваемой сети не имеет такого большого значения, как для традиционных геодезических сетей. Поскольку при исследованиях процесса деформирования очень часто используются существующие пункты геодезических сетей и репера традиционных наблюдательных станций, то при проектировании сети зачастую приходится приспосабливаться к существующей конфигурации сети, и некоторая свобода выбора появляется только при полной или частичной реконструкции наблюдательной станции.

Желательно при предсъёмочном планировании обследовать репера наблюдательной станции на местности; применительно к спутниковым технологиям, это имеет специфические особенности. При выборе мест спутниковых геодезических измерений особое внимание уделяется обеспечению благоприятных условий наблюдений спутников. В связи с этим не рекомендуется размещать пункты непосредственно рядом с высокими зданиями и сооружениями, большими и густыми деревьями, источниками мощного радиоманнитного излучения. Во избежание влияния многолучевого распространения радиосигнала не рекомендуется размещать репера наблюдательной станции вблизи различного рода отражающих поверхностей.

При исследовании процесса сдвижения на горных предприятиях, с одной стороны, зачастую в качестве реперов наблюдательных станций используются уже существующие пункты, а с другой стороны, даже при заложении новых пунктов сети невозможно обеспечить идеальные условия спутниковых наблюдений в связи с застроенностью территории, поэтому для тех реперов, на которых не обеспечиваются благоприятные условия спутниковых наблюдений составляются специальные абрисы препятствий прохождения радиосигналов. В этом случае к каждому пункту сети нужен индивидуальный подход, и зачастую удастся найти временные «окна», когда на пункте возможно провести качественные измерения. При индивидуальном подходе возможно проводить измерения на пунктах, где наблюдается многолучевой путь радиосигнала.

Во время обследования особо выделяются пункты, на которых условия наблюдений близки к идеальным. Эти пункты в дальнейшем используются как базовые, на которых полевые приемники будут накапливать данные в течение всего сеанса спутниковых наблюдений. Количество таких пунктов сети и их взаимное расположение оказывают большое влияние на выбор технологии и метода проведения полевых измерений. Большое влияние на возможность применения той или иной схемы работ оказывает наличие оптимальных путей перемещения между реперами наблюдательной станции, которые также отмечаются на плане при обследовании района работ.



Рисунок 20 – Блок-схема выполнения полевых инструментальных измерений

На следующем этапе планирования репера наблюдательной станции наносятся на план местности, сюда же наносятся оптимальные маршруты перемещения между различными пунктами сети согласно принятому методу измерений. Необходимость этой процедуры обусловлена тем, что, как правило, в деформационной сети существуют пункты с достаточно хорошими условиями приема спутникового радиосигнала, при работе на которых практически не бывает случаев потери сигнала от спутников, и пункты, на которых прием спутникового сигнала затруднен в силу различных причин. В связи с этим, время и продолжительность спутниковых наблюдений для таких пунктов планируется в индивидуальном порядке, а график посещения и маршрут планируется исходя из конкретных условий наблюдений и схемы выполнения полевых работ для различного количества приемников.

Поскольку исследование деформаций породного массива в мониторинговом режиме подразумевает многократное, от цикла к циклу, выполнение точных геодезических измерений на одних и тех же пунктах сети, по одной программе работ с дальнейшим анализом изменений геометрических взаимосвязей между реперами. Из этого вытекает важная особенность деформационных сетей: возможность детального изучения условий проведения наблюдений на каждом пункте сети и использование их при планировании времени и периода проведения спутниковых измерений, специальная подготовка отдельных пунктов сети с целью устранения причин затрудненного или некачественного приема спутникового радиосигнала.

Поскольку одним из самых главных требований выполнения высокоточных геодезических работ с применением GPS-оборудования является хорошая радиовидимость на всех определяемых пунктах, которая обеспечивается следующими факторами: низким значением коэффициента PDOP, высоким соотношением сигнал – шум, качеством радиосигнала и отсутствием потери целых циклов при приеме радиосигнала, - необходимо учитывать эти факторы заранее. Некоторые факторы, определяющие качество выполнения наблюдений, можно спрогнозировать заранее, используя специальное программное обеспечение. Распределение количества видимых спутников и изменение коэффициента PDOP во времени определяется заблаговременно по имеющимся эфемеридам спутников, а поскольку известны условия наблюдений на каждом пункте сети, составляются индивидуальные картограммы препятствий прохождения спутникового радиосигнала, с использованием которых достигается высокий уровень планируемых и фактических условий наблюдения на конкретном пункте (рис. 21). Соотношение сигнал - шум для конкретного пункта сети спрогнозировать невозможно, однако, когда измерения деформаций массива производятся в мониторинговом режиме, имеется богатый статистический материал, в результате обработки которого выявляются закономерности формирования шумового фона для каждого пункта сети. В результате планирования определяются промежутки времени, благоприятные и неблагоприятные для наблюдений. Как показывает практика, благоприятными являются промежутки времени, когда обеспечивается прием спутникового радиосигнала от 7 - 8 и более спутников при коэффициенте PDOP меньше 4. При таких условиях возможно проводить измерения на миллиметровом уровне точности.

Полевые измерения передвижными приемниками выполняются по заранее подготовленной программе работ, прибор устанавливается на репере наблюдательной станции, фазовый центр антенны приемника при помощи оптического центрира или системы принудительного центрирования располагается точно над центром репера. Высота установки антенны измеряется специальными рулетками и записывается в полевой журнал или память контроллера. Дальнейшая работа с конкретным типом приборов на станции осуществляется согласно инструкции на GPS-приемник. Из общих моментов выделяются этапы включения приемника, накопления «сырых» спутниковых данных и выключения прибора.

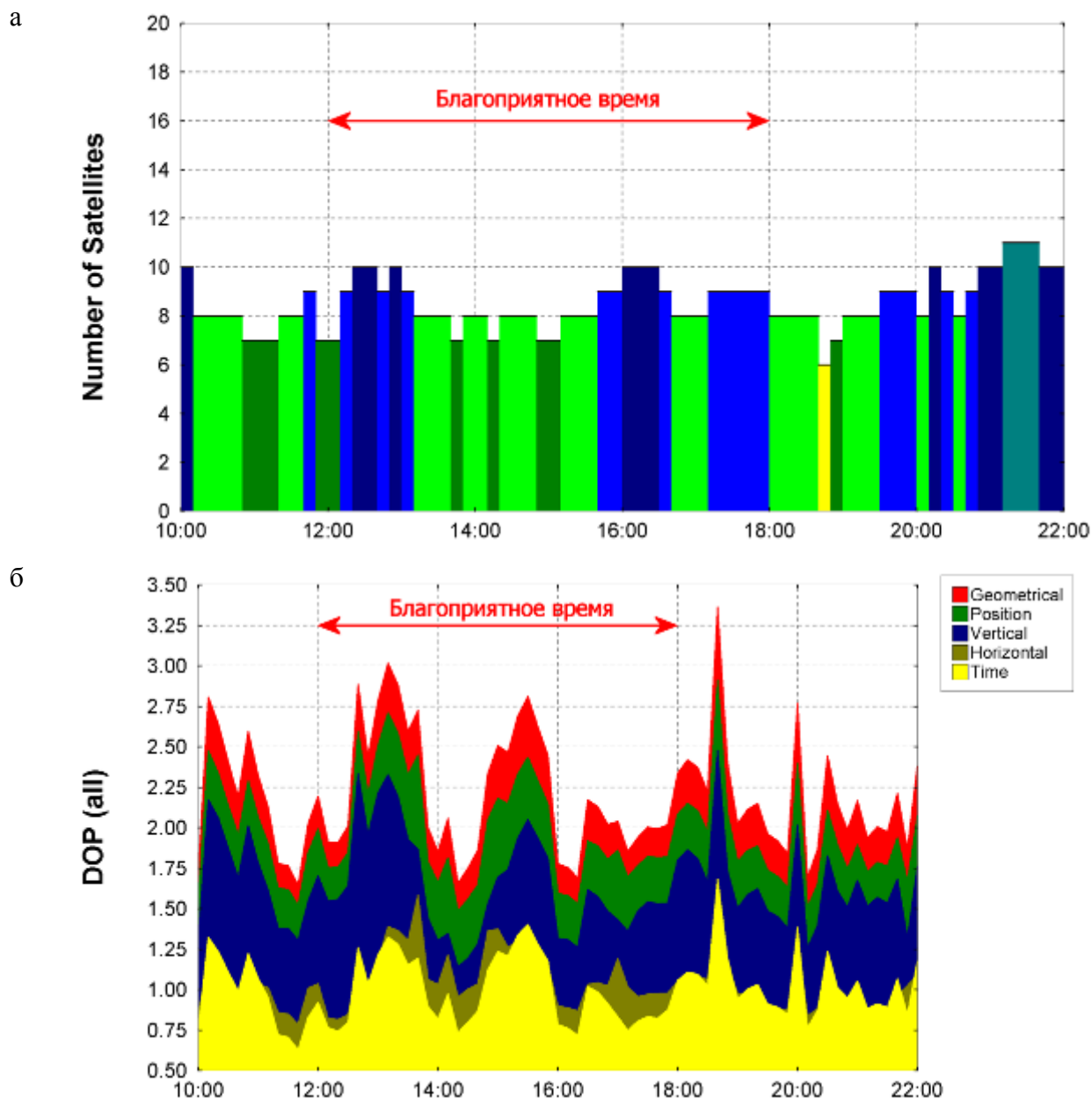


Рисунок 21 – Моделирование количества видимых спутников (а) и фактора снижения точности PDOP (б)

Общее время накопления «сырых» спутниковых данных на репере наблюдательной станции определяется рядом параметров: количеством спутников, от которых ведется прием радиосигнала, условиями наблюдения на конкретном репере, удалением от базового приемника и количеством рабочих частот L1 или L1+L2 в приемнике. Для баз измерений до 10 км производители оборудования рекомендуют время измерений 15 - 20 минут для одностотных приемников и 10 минут для двухчастотных приемников. При выполнении инструментальных исследований процесса сдвижения для достижения требуемой точности определения координат целесообразно придерживаться рекомендаций производителей спутникового геодезического оборудования. Однако для увеличения точности и надежности пространственных геодезических построений, когда в полевых измерениях синхронно участвуют более двух приемников, увеличение времени сбора «сырых» данных на некоторых реперах наблюдательной станции позволяет получить дополнительные замкнутые построения, которые на этапе строгого уравнивания сети по методу наименьших квадратов создают избыточные измерения.

В общем случае, увеличение времени накопления «сырых» спутниковых данных на репере наблюдательной станции, с одной стороны, приводит к увеличению точности и надежности определения координат, а с другой – приводит к падению производительности непосредственно полевых работ, причем падение производительности работ достаточно слабо влияет, когда при полевом кодировании задействовано большое количество GPS-приемников. На практике при выборе продолжительности накопления сырых данных применяется индивидуальный подход – на большей части реперов сети накопление происходит в стандартном режиме, а на ряде реперов время увеличивается относительно стандартного в 1.5 – 2 раза. Как правило увеличенное время наблюдений применяется к реперам, где имеются помехи в приеме радиосигнала от спутника.

Для контроля точности геодезических построений координаты ряда реперов наблюдательной станции могут также определяться повторными независимыми измерениями. Это позволяет путем сопоставления пространственных координат репера, полученных из двух и более измерений, определить реальную погрешность выполнения полевых и камеральных работ.

Завершающим этапом полевых измерений является перенос накопленной информации из памяти полевых базовых и передвижных приемников в компьютер для дальнейшей камеральной обработки. Таким образом, после завершения этапа полевых инструментальных измерений для дальнейшей камеральной обработки становятся доступны «сырые» данные спутниковых наблюдений, собранные во время синхронной работы GPS-приемников на реперах наблюдательной станции. При использовании этих данных возможно вычисление векторов между центрами реперов и, после уравнивания геодезической сети, определение полных пространственных координат реперов на текущую эпоху измерений.

Камеральная обработка результатов инструментальных измерений при выполнении геодезических работ является важнейшей составляющей как при создании сетей с использованием методов традиционной геодезии, так и при использовании методов

спутниковой геодезии GPS. Кроме этого, камеральная обработка является крайне ответственным этапом, поскольку допущенные ошибки могут сказаться на оценке геомеханического состояния подработанной территории, что приведет к негативным последствиям для охраняемых сооружений, а возможно, и крупным авариям.

Специфика инструментальных исследований процесса сдвижения – необходимость получения полного тензора деформаций – приводит к увеличению трудоемкости камеральных работ за счет выполнения дополнительных вычислений. Если при выполнении рядовых геодезических работ конечным продуктом является каталог координат пунктов сети, при исследовании процесса сдвижения получение каталога координат на текущую серию измерений является лишь промежуточным этапом. В дальнейшем необходимо сопоставить каталоги координат за различные серии инструментальных измерений, вычислить полные вектора сдвижения реперов, вертикальные и горизонтальные деформации интервалов между соседними реперами. На основании этих данных можно вычислить тензоры деформаций по формулам, приведенным в предыдущем разделе.

На рис. 22 приведена укрупненная блок-схема выполнения камеральной обработки результатов полевых инструментальных измерений.

На начальных этапах камеральной обработки выполняется первичная обработка полевого материала с целью установления пригодности результатов измерений для дальнейшей обработки. Проверяются полевые журналы, сопоставляются файлы, содержащие «сырые» спутниковые наблюдения, с конкретными реперами наблюдательной станции. При необходимости файлы результатов измерений конвертируются в универсальный формат RINEX (The Receiver Independent EXchange Format), что позволяет использовать в программном обеспечении камеральной обработки «сырые» данные, собранные при помощи оборудования сторонних производителей. Также на этом этапе происходит формирование камерального журнала, в котором файлы данных упорядочиваются по типам приборов, времени начала и окончания полевых измерений (табл. 3). Измеренные рулеткой высоты антенн приводятся от наклонных расстояний (от центра репера до маркера антенны) к истинному – от центра репера до фазового центра антенны (APC – Antenna Phase Center). На этом же этапе выявляются пропущенные, неполные и испорченные файлы данных.



Рисунок 22 – Блок-схема выполнения камеральной обработки результатов полевых инструментальных измерений

Файлы данных, прошедшие начальный отбор, загружаются в проект программы камеральной обработки результатов измерений, при этом каждому файлу данных присваивается имя соответствующего репера наблюдательной станции, тип GPS-приемника, тип антенны и ее высота. При помощи специальных подпрограмм производится оценка качества спутниковых наблюдений на каждом репере наблюдательной станции. Оцениваются фактические параметры: SVS (количество видимых спутников), DOP (Dilution Of Precision – снижения точности) и SNR (Signal to Noise Ratio – соотношение сигнал - шум). По результатам анализа принимаются предварительные решения о частичной или полной выбраковке сбойных спутников, наличии или отсутствии эффекта многолучевого хода радиосигнала (Multipath Error), срывов целых циклов и проч. Наличие такой информации на ранних этапах камеральной обработки позволяет принять решение о выборе оптимальных параметров вычислений при первичной обработке GPS-измерений – вычисление векторов между реперами.

Таблица 3 – Фрагмент камерального журнала

Репер	Линия	Прибор	Высота	APC	Начало	Конец	Файл
21.07.2007 - Нижний Тагил - Магнетитовая							
Rp-16	VIII	4000-T	1.514	1.498	05:23	13:06	99562021
Rp-07b	VII	02-Sok	1.444	1.531	05:43	06:07	00022020
Rp-01	VIII	02-Sok	1.481	1.568	06:35	07:04	00022021
Rp-06	VIII	02-Sok	1.432	1.519	07:16	07:40	00022022
Rp-14	VIII	02-Sok	1.432	1.519	07:58	08:16	00022023
Rp-20	IV	02-Sok	1.437	1.524	09:14	09:53	00022024
Rp-14	IV	02-Sok	1.362	1.449	10:29	10:54	00022025
Rp-05	BYK - XI	02-Sok	1.431	1.518	11:54	12:11	00022026
Rp-10	DOM - X	02-Sok	1.190	1.276	12:27	12:37	00022027
Rp-07a	VII	33-Sok	0.834	0.918	06:17	06:45	00332020
Rp-08	VIII	33-Sok	1.249	1.335	07:17	07:41	00332021
Rp-12	VIII	33-Sok	1.372	1.459	07:55	08:11	00332022
Rp-01	BOL - V	33-Sok	1.259	1.345	09:16	09:32	00332023
Rp-10	IV	33-Sok	1.564	1.651	10:30	10:48	00332024
Rp-23	VIII	33-Sok	1.437	1.524	11:15	11:37	00332025
Rp-01	BYK - XI	33-Sok	1.361	1.448	11:48	12:03	00332026
Rp-07	DOM - X	33-Sok	1.409	1.496	12:15	12:44	00332027
Rp-07	VII	47-Sok	1.364	1.451	05:50	06:20	00472020
Rp-10	VIII	47-Sok	1.396	1.483	07:45	08:03	00472021
Rp-Op	BYK - XI	47-Sok	1.395	1.482	12:01	12:32	00472022

Вычисление векторов – приращений координат между фазовыми центрами антенн GPS-приемников, а следовательно, между центрами реперов наблюдательной станции, производится в программе обработки по наборам определенных, заранее заданных правил (шаблонов), которые различаются рядом предустановленных параметров вычислений. Всего для изменения доступно несколько десятков параметров, путем изменения которых можно влиять на качество камеральной обработки. Изначально, на первом этапе вычисления векторов, проводится редактирование «сырых» данных спутниковых наблюдений. Исключаются из обработки сбойные спутники и спутники, чей радиосигнал содержит признаки ошибок многолучевого распространения. Удаляются участки кода, содержащие срывы циклов, поскольку использование таких данных снижает точность вычислений. После этого производится непосредственное решение векторов с выбором наилучших решений на основании F-теста (Ratio) и теста на относительную дисперсию (Reference Variance).

Внутренние невязки измерений, которые вычисляются для каждого спутника, участвовавшего в измерениях, являются индикатором того, насколько качественными являются собранные в поле сырые спутниковые данные. При анализе невязок по критерию их максимальных амплитуд, средних значений и синусоидальности выявляются спутники, чей радиосигнал содержит признаки многолучевого распространения или электрического шума. Такие спутники отбраковываются и в дальнейших вычислениях не участвуют. Если вычисленный вектор проходит тесты на Ratio и Reference Variance, а также имеет допустимые внутренние невязки измерений, он принимается к дальнейшей обработке.

Аналогичным образом вычисляются все возможные вектора в проекте между реперами наблюдательной станции. В случае, если измерения проводились с использованием трех и более синхронно работающих GPS-приемников, образуются замкнутые

геометрические построения, а следовательно возникает условие для наилучшего контроля качества полевых и камеральных работ – оценки качества по невязкам замкнутых фигур.

Поскольку для геодезических сетей наилучшим способом контроля их точности является использование программ замыкания фигур, которые для определения невязок суммируют компоненты векторов по замкнутому контуру, по каждой замкнутой фигуре необходимо получить невязки по всем трем координатным осям как сумму приращений соответствующих координат, которая теоретически должна равняться нулю.

В результате уравнивания геодезической сети решаются две основные задачи. Во-первых, при свободном уравнивании проводится заключительный контроль точности геодезических построений, в результате которого определяются фактические погрешности пространственного положения реперов наблюдательной станции эллипсы погрешностей по координатным осям. Во-вторых, при уравнивании сети с заданием условий жесткости – фиксации координат условно-стабильных элементов – происходит трансформация системы координат из геоцентрической общеземной в государственную или местную, используемую на конкретном горном предприятии.

При свободном уравнивании геодезической сети без жесткой фиксации исходных координат условно-стабильных пунктов производится трансформация системы векторов, образующих пространственную сеть, с учетом невязок по осям координат замкнутых геометрических фигур. Таким образом, путем ввода поправок в приращения координат сеть приводится к состоянию, свободному от невязок. Также при свободном уравнивании сети производится тестирование неизменности геометрических параметров условно-стабильных базисов путем сравнения их начальных и текущих значений. Поскольку при выполнении данного этапа работ происходит оценка точности измерений по эллипсам погрешностей положения реперов, возможно сопоставление величин изменения базиса с погрешностями измерений. При фиксации концов одного или нескольких условно-стабильных базисов в принятой системе координат и выполнении уравнивания сети с заданием условий жесткости все рабочие репера наблюдательной станции получают пространственные координаты на заданную эпоху измерений в принятой на предприятии системе координат. Для того чтобы учесть величину среднеквадратичной ошибки измерений условно-стабильных базисов, в программе уравнивания предусмотрено задание для каждого условно-стабильного элемента погрешности начального положения.

На завершающем этапе камеральной обработки результатов измерений путем сопоставления уравненных значений координат из различных эпох измерений производится расчет векторов сдвижений по каждой из осей координат. По этим данным определяются главные компоненты плоского тензора деформаций в варианте расчета с использованием полных векторов смещений реперов наблюдательной станции, вертикальные деформации наклона и кривизны определяются с использованием полученных данных изменения высот.

Визуализация результатов определения компонент плоского тензора деформаций для каждой задачи охраны объекта от вредного влияния горных разработок производится в соответствии с конкретными требованиями, предъявляемыми к ним. Практически возможны варианты визуализации в виде полярных эпюр тензора деформаций, графических

изображений тензора в виде взаимно перпендикулярных векторов, масштаб которых соответствует величине тензора, в виде изолиний по различным сечениям и проч.

2.3 Регламент объемного лазерного сканирования деформационного состояния объектов

Для построения точной трехмерной масштабной модели объекта необходимо провести геодезические измерения и получить пространственные координаты всех характерных точек, а затем представить их в графическом виде. Определение пространственных координат точек объекта, или съемка, составляет наиболее трудоемкую и затратную часть всей работы. При производстве достаточно больших объемов полевых измерений, геодезистами используется современное оборудование, в первую очередь, электронные тахеометры и лазерные сканеры, позволяющие получать координаты съемочных точек с миллиметровым уровнем точности.

Лазерное сканирование – это метод, позволяющий создать цифровую модель всего окружающего пространства, представив его набором точек с пространственными координатами. Несмотря на принципиальную новизну данного метода, его можно рассматривать как логическое продолжение развития безотражательных технологий и их использования в геодезических инструментах. Основное отличие метода лазерного сканирования от традиционных тахеометров – гораздо большая скорость измерений, сервопривод, автоматически поворачивающий измерительную головку инструмента в обеих, горизонтальной и вертикальной плоскостях, и самое главное – скорость (5000 измерений в секунду) и плотность (десятки точек на 1 кв. сантиметр поверхности). Полученная в результате измерений цифровая модель объекта представляет собой набор от сотен тысяч до нескольких миллионов точек, имеющих пространственные координаты с точностью в несколько миллиметров. Кроме этого, в большинстве современных сканеров имеется встроенная цифровая камера, позволяющая для каждой точки трехмерного растрового изображения определить показатели интенсивности отражения и истинного цвета, которые на этапе камеральной обработки используются не только для трансформации растрового изображения в векторный формат, но и для изучения геологического строения объекта.

Принцип работы лазерного сканера тот же, что и у обычного электронного тахеометра – измерение расстояния до объекта и двух углов – горизонтального и вертикального, что в конечном итоге дает возможность вычислить пространственные координаты точки. Лазерный излучатель с заранее определенным временным интервалом генерирует пучок электромагнитных волн, который отражается от поверхности снимаемого объекта, и возвращается в приемник, как показано на рис. 23. Одновременно с генерацией сигнала излучатель посылает сигнал «старт», который поступает в электронный блок обработки сигналов; в этот же блок поступает сигнал «стоп» от приемника, когда он получает отраженный от объекта сигнал. Излученный и принятый сигналы сравниваются, и по времени прохождения вычисляется расстояние до объекта.

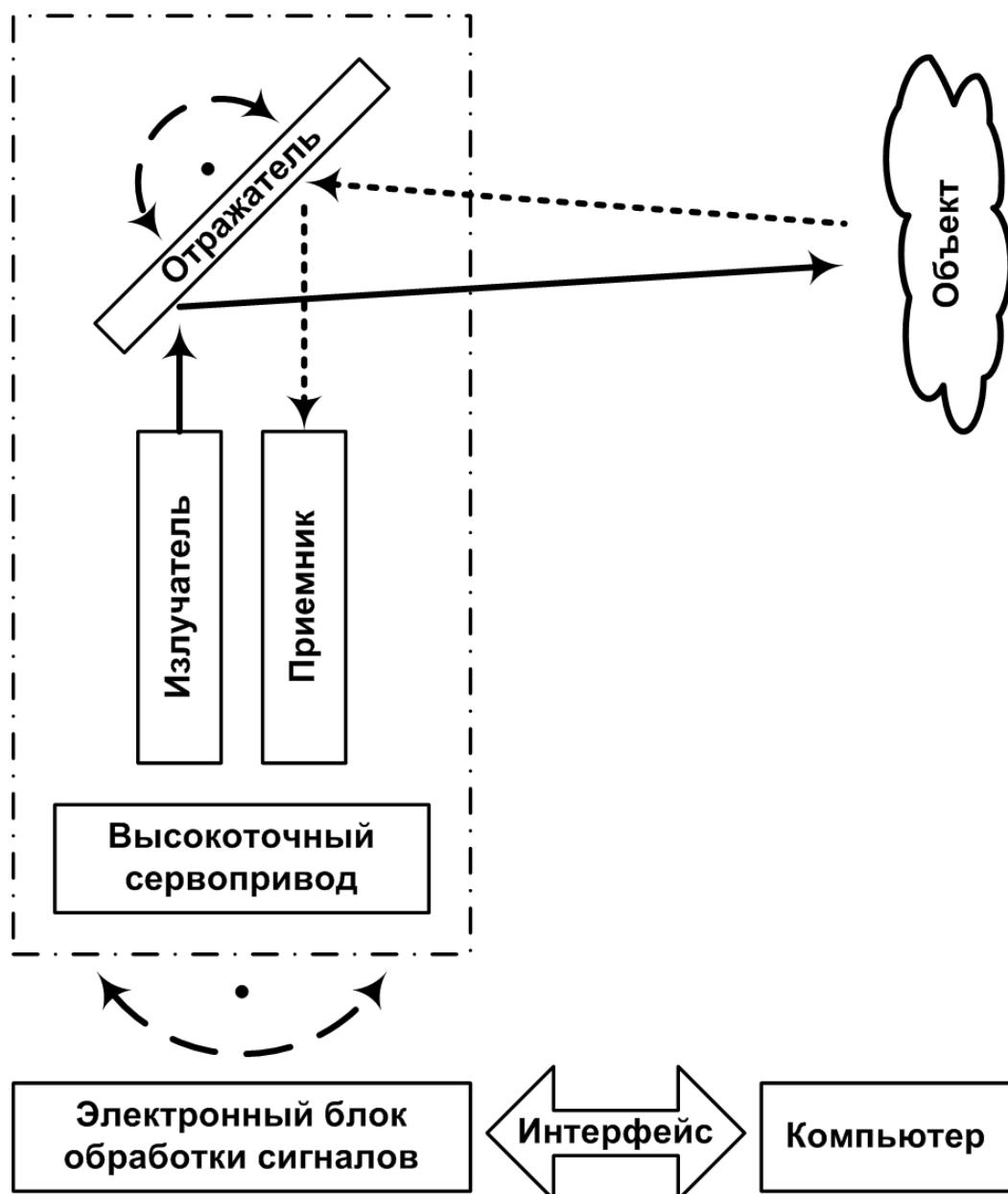


Рисунок 23 - Принцип работы лазерного сканера

Вращающаяся призма или зеркало распределяет лазерный пучок по вертикали с заранее заданным шагом, например 0.1° . Таким образом, в отдельно взятом вертикальном скане будут измерены все точки с дискретностью 0.1° , что при вертикальном угле сканирования, равном 140° , даст 1400 съемочных точек. Затем высокоточный сервопривод поворачивает блок измерительной головки на угол, равный шагу измерения, и цикл измерений повторяется снова. При такой же дискретности 0.1° полный оборот сканера состоит из 3600 отдельных вертикальных плоскостей. Таким образом, полная цифровая картина пространства будет представлена в виде набора из более чем 5 миллионов (5040000) точек с известными пространственными координатами, для получения которой необходимо затратить около 30 минут времени. Как правило, весь процесс съемки полностью автоматизирован, оператору необходимо только ввести параметры съемки – граничные углы в вертикальной и горизонтальной плоскостях и дискретность съемки. Данные измерений в реальном времени записываются на внешний или внутренний

накопитель, а встроенная система визуализации выдают изображение на дисплей специального компьютера.

Схематично любой лазерный сканер можно разделить на несколько основных блоков:

1. Измерительная головка, в которой расположены лазерный излучатель и приемник, обеспечивающие измерение расстояния до объекта.
2. Вращающееся зеркало или призма, которое обеспечивает распределение лазерного пучка в вертикальной плоскости.
3. Высокоточный сервопривод горизонтального круга, который обеспечивает вращение измерительной головки в горизонтальной плоскости.
4. Электронно-вычислительный блок обработки сигналов со встроенным прецизионным таймером обеспечивает высокоточное измерение расстояний до объекта.
5. Внешний или внутренний компьютер, который предназначен для управления процессом съемки и записи данных на носитель.

Типовая система лазерного сканирования способна проводить работы по получению трехмерной цифровой модели с точностью от долей миллиметра до 5 см на расстоянии от нескольких десятков до 2500 метров за время от нескольких секунд до десятков минут. Лазерный сканер имеет поле зрения от $40^\circ \times 40^\circ$ до $360^\circ \times 180^\circ$ и подходит для съемки и моделирования местности и инженерных объектов.

После того, как произведены измерения в полевых условиях, начинается процесс обработки. Изначально «сырые измерения» представляют собой набор – «облако» точек, имеющих трехмерные координаты и дополнительные характеристики, такие как цвет и интенсивность отраженного сигнала. Облако точек, полученное при лазерном сканировании участка трансформаторной подстанции, приведено на рис. 24. Однако для практического применения результатов съемки облако точек необходимо представить в виде чертежей и схем в CAD форматах и на твердых носителях. В настоящий момент времени никакое программное обеспечение не может успешно решить проблему распознавания образов в автоматическом режиме с той степенью достоверности, которая нужна пользователю, поэтому весь процесс обработки требует участия человека и без кропотливого ручного труда в ближайшем будущем не обойтись.

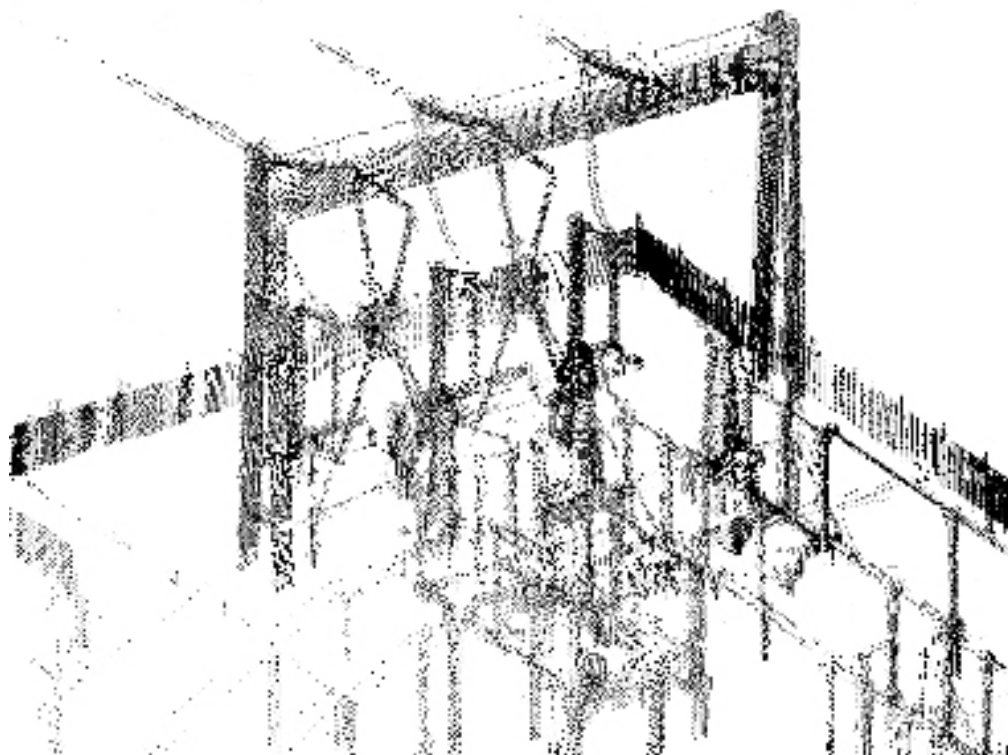


Рисунок 24 - Облако точек, полученное при лазерном сканировании объекта

Процесс обработки во многом зависит от желаемого результата, оттого, что конкретно нужно получить. Это может быть само облако точек, пространственная сеть триангулированных ячеек (TIN), набор сечений, план, сложная 3D-модель, либо просто набор измерений, таких как длины, периметры, диаметры, площади, объемы. В целом, камеральная обработка результатов лазерного сканирования состоит из нескольких основных этапов:

1. *Предварительная обработка сырых сканов.* На этом этапе обработки определяется качество полученных пространственных сканов, удаляются некачественные измерения, шумы и «фантомные» объекты. Причиной шумов в большинстве случаев являются атмосферные условия измерений – осадки в виде дождя и снега, влияние которых можно исключить с использованием системы фильтрации помех. Фантомные объекты возникают при кратковременном нахождении в зоне сканирования людей, животных, работающих механизмов. Поскольку лазерный сканер на определенных установках съемки способен «пробивать» частично прозрачные объекты – например травянистую растительность до почвенного слоя, фантомные поверхности могут возникать при таких видах съемки.

2. *Объединение или «сшивка» сканов.* Как правило, во время съемки объекта, проводится несколько сканов для полного покрытия поверхности. Для создания единого скана необходимо произвести объединение – «сшивку» единичных сканов. Существует множество методов сшивки сканов, с различной степенью автоматизации. Наиболее часто используется метод совмещения сканов по опорным точкам, которые отображаются на смежных сканах. В качестве таких точек могут быть использованы четко идентифицируемые

объекты местности, специальные марки, призмы, светоотражающие пластины или наклейки, имеющие более высокий коэффициент отражения и поэтому вполне однозначно определяемые.

3. *Трансформирование координат.* Для точного представление чертежа, плана или схемы необходимо задание определенной единой системы координат. Начало системы координат каждого отдельного скана, производимого с определенной точки, находится в центре измерительной головки сканера, и при каждом изменении его положения, оно меняет свое положение в пространственной системе координат. Для связи координат объекта, полученных из разных сканов, необходимо выбрать единую систему координат, определить в ней центр сканирования для каждого отдельного скана и трансформировать все полученные координаты в единую систему. В случае если лазерное сканирование объекта выполняется с точек съемочного обоснования горного предприятия, особых проблем операция трансформирования координат не вызывает, в этом случае необходимо только указать в программе обработки координаты точек стояния прибора и высоту установки. В остальных случаях потребуется дополнительно закоординировать точки стояния прибора, например, при помощи электронного тахеометра.

4. *Создание поверхностей.* Основной и наиболее сложный процесс камеральной обработки, заключается в представлении облаков точек математически описываемыми поверхностями. Как правило, математический аппарат прикладного программного обеспечения позволяет создавать простейшие правильные математические поверхности, такие как плоскость, сфера, цилиндр и пр., либо аппроксимировать поверхность триангуляционным методом в виде TIN-поверхности. Созданные подобным образом поверхности вполне представимы в стандартных форматах типа DXF, и соответственно, могут быть экспортированы в любые CAD-приложения, в которых полученные поверхности можно трансформировать в планы и схемы, выделить характерные геометрические элементы, такие как откосы, бровки уступов, назначить отдельным объектам условные знаки, построить изолинии, распечатать полученный чертеж на бумажном носителе. В случае если сканирование сопровождается цифровой видео- или фотосъемкой, то на этапе обработки можно совместить сканированное изображение объекта с его видеозаписью, придав скану реальные цвета и структуру. Эта возможность позволяет попутно выполнять геологическое картирование при топографических съемках карьеров.

Основой любой технологии производства геодезических съемок является ее приборное обеспечение. В настоящее время на рынке представлено несколько моделей лазерных сканеров, различающихся как по области их применения, так и по основным техническим характеристикам. Лазерные сканеры наземного сканирования по сфере их применения условно можно разделить на две большие группы:

1. Для работы в помещениях, внутри зданий, подземных выработок, для съемок резервуаров и насыпных объектов и еще целого ряда работ, где требуется высокая точность измерений, широкий диапазон сканирования и небольшая дальность измерений.

2. Для работы вне помещений, топографической съемки площадок, зданий, фасадов, дорог, мониторинга состояния сложных строительных объектов, создания 3D-моделей сложных технологических производств, где требуется большая дальность измерений.

Достаточно широкое применение систем лазерного сканирования в горной промышленности в основном обусловлено тем, что геометрические параметры объектов горного производства – карьеров, отвалов и рудных складов постоянно изменяются во времени, при этом существует необходимость в постоянном пополнении горно-графической документации, вычислении объемов горной массы и учете ее движения. В связи с этим основными сферами использования систем лазерного сканирования при открытом способе разработки являются топографо-геодезические съемки горных выработок, мониторинг геомеханического состояния бортов карьеров и отвалов и определение объемов.

Крупномасштабные съемки являются самыми трудоемкими, требующими немалого количества времени и ресурсов. При ведении горных работ съемке подлежат не только геометрические элементы уступов, но и рельсовые пути, семафоры, здания, трубопроводы, линии электропередач и другие объекты. Топографическую съемку зачастую приходится производить в то время, когда ведутся работы на объекте, активно перемещается технологический транспорт. К тому же специфика горного производства требует постоянного обновления горно-графической документации. Использование для решения подобных задач систем лазерного сканирования позволяет во много раз снизить затраты труда на проведения съемки, получать полностью обновленную 3D-модель карьера или отвала за короткие промежутки времени. Так, полная съемка карьера и вычисление объемов на площади около 20 га требует затрат времени 3 дня. Выполнение полевых работ занимает 1 день, в течение которого производится рекогносцировка местности, геодезическая привязка четырех точек съемочного обоснования и выполнение с этих точек четырех лазерных сканов. На выполнение цикла камеральных работ, включающих в себя построение 3D-модели карьера, оформление графической документации и вычисление объемов уходит 2 дня. Результаты съемок получаются сразу в цифровом виде, что позволяет, сравнив данные предшествующих съемок, проследить динамику развития горных работ на карьере (рис.25).

а.



б.

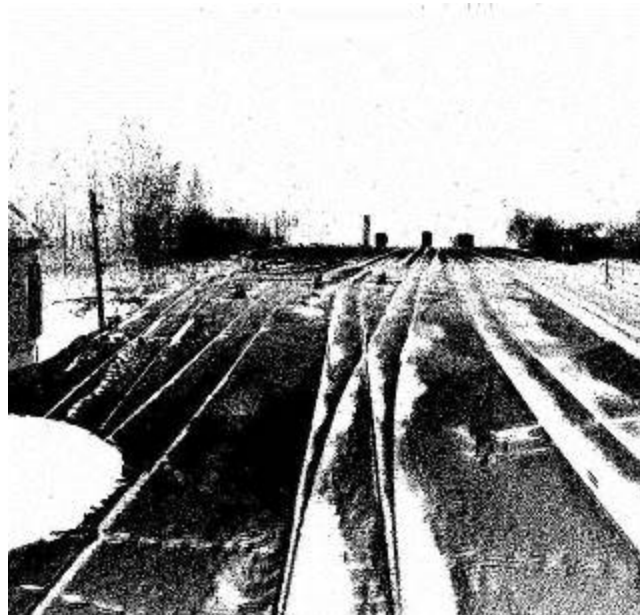


Рисунок 25 - Цифровая 3D-модель карьера (а) и облако точек съемки подъездных путей (б), полученные методом лазерного сканирования

В зарубежной практике ведения открытых горных работ имеются случаи, когда один или несколько лазерных сканеров, установленных на постоянные наблюдательные пункты, в непрерывном режиме ведут сканирование участка карьера, результаты которого по кабельным системам передаются в диспетчерский пункт. Такая технология позволяет в режиме реального времени контролировать не только развитие горных работ, но и отслеживать передвижение технологического оборудования.

В зарубежной практике системы лазерного сканирования широко используются для детального геологического картирования горных выработок. В этом случае для получения детальной 3D-модели борта сканер устанавливается на уступе, в непосредственной близости от объекта съемки, для уменьшения ошибок измерения длин линий и получения более качественного цифрового снимка поверхности. В дальнейшем, при специальной обработке скана, выявляются структурно-тектонические особенности массива, контакты руды и породы, заполнитель контактов, типы руд и пород, слагающих массив. По результатам картирования отстраивается объемная геологическая модель участка месторождения, которая используется для подсчета запасов и выбора оптимальной технологии ведения горных работ. В случае, когда прибортовой массив находится в неустойчивом состоянии, совмещение сканов, выполненных в различные периоды времени, позволяет определить скорость и характер деформирования массива, раскрытие трещин и другие геомеханические особенности, что позволяет более обоснованно подходить к решению задач по обеспечению устойчивости бортов карьера (рис. 26).

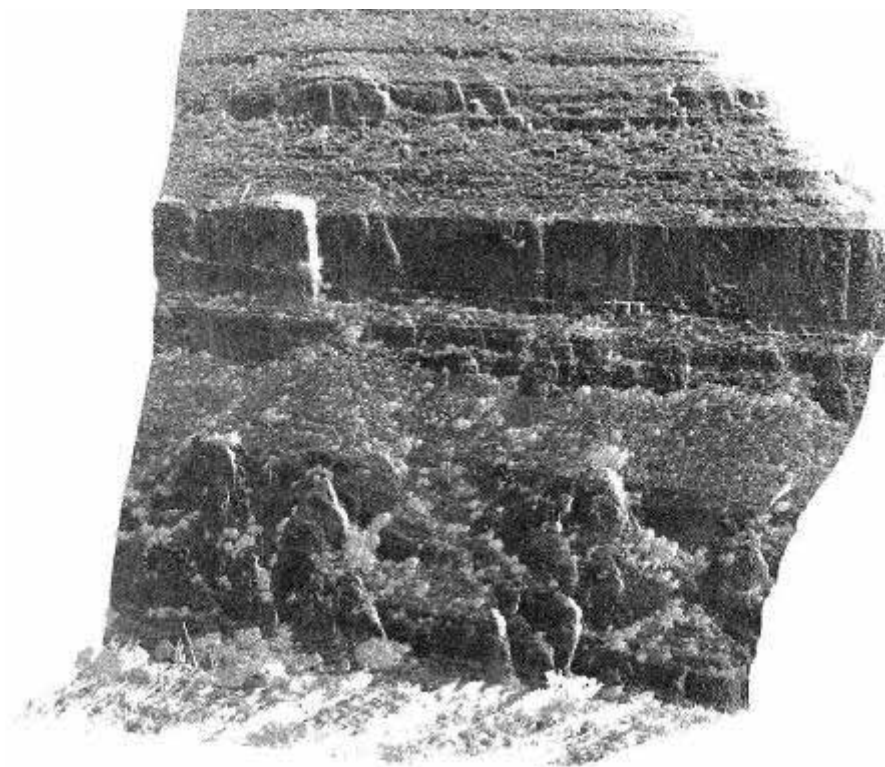


Рисунок 26 - Скан участка борта карьера с элементами геологической структуры

Типовая система лазерного сканирования геодезического класса способна проводить работы по получению трехмерной цифровой модели с точностью от одного миллиметра до первых сантиметров на расстоянии от нескольких десятков до 2500 метров за время от нескольких секунд до десятков минут. Наиболее высокоточные модели сканеров работают в диапазоне от 2 до 200 метров. Результатом лазерного сканирования является трехмерный массив точек с пространственными координатами в системе, направление осей которой определяется конструкцией прибора и его ориентировкой в пространстве.

Для обеспечения широкого фронта съемочных работ и избежания теневых зон, обусловленных выступающими элементами поверхности объекта, сканирование производится с двух и более станций (рис. 27). При объединении данных измерений, полученных с двух и более станций, увеличивается плотность массива точек за счет перекрытия сканов с разных станций. Увеличение плотности измерений позволяет после фильтрации и разрежения данных в процессе обработки получить массив точек, наиболее точно и полно описывающий поверхность исследуемого объекта.

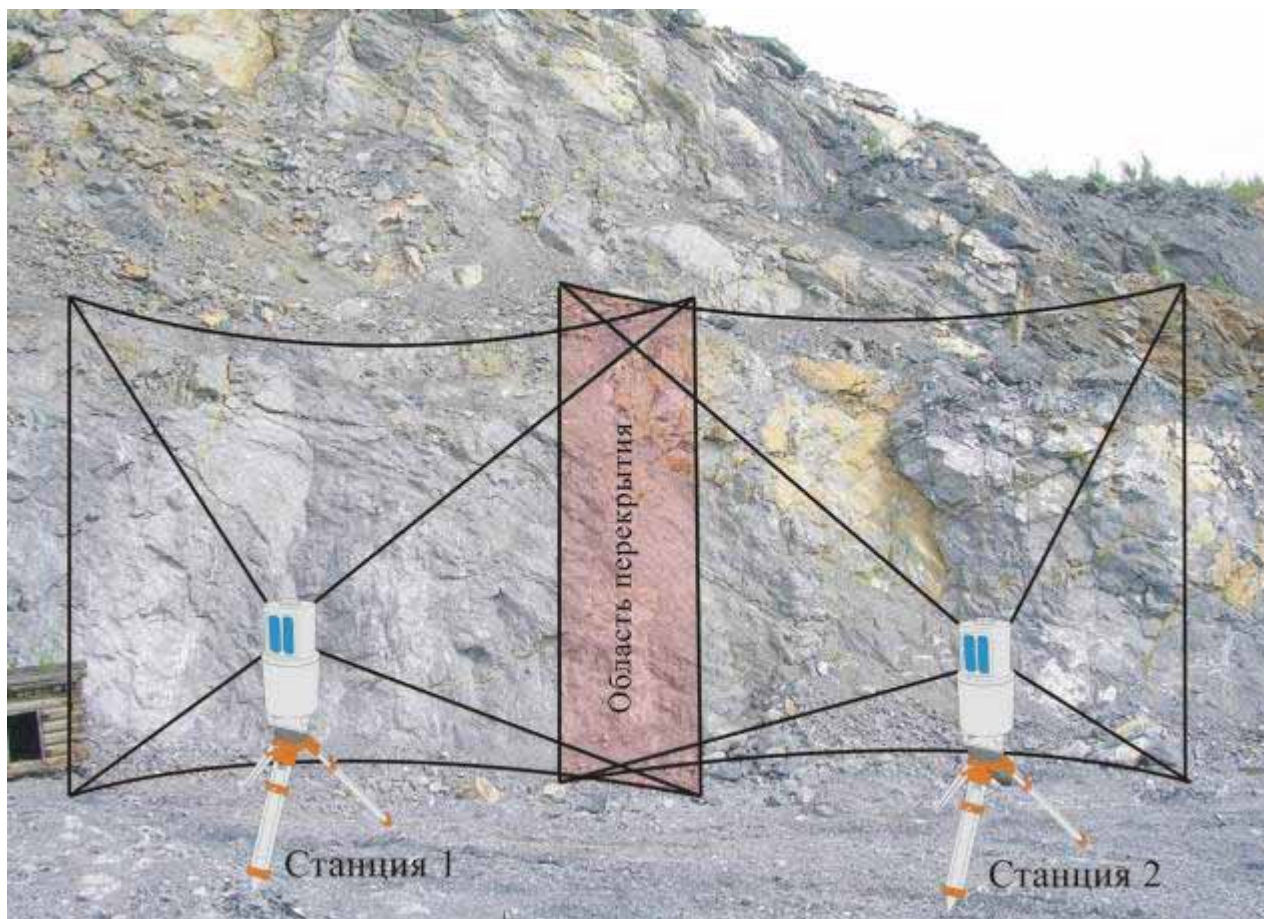


Рисунок 27 – Схема расположения сканерных станций на объекте для объемной съемки

Поскольку сканирование производится с нескольких станций, перед началом съемочных работ их необходимо закоординировать в принятой на предприятии системе

координат. Передача координат на станции лазерного сканирования осуществляется с использованием комплекса спутниковой геодезии GPS от маркшейдерско-геодезической сети. После окончания полевых работ по сканированию объекта производится камеральная обработка данных лазерного сканирования.

С разных точек стояния сканера получают по одному и более скану – массиву точек с трёхмерными координатами в системе координат сканера. Все сканы, таким образом, получаются в разных системах координат, и каждый описывает только часть поверхности снимаемого объекта. На первом этапе камеральной обработки необходимо сориентировать все сканы в единую внешнюю систему координат, чтобы иметь представление об объекте в целом и обрабатывать данные со всех станций совместно.

В зависимости от принятой системы лазерного сканирования, сшивка сканов в единую цифровую модель может производиться с использованием общих маркируемых опорных точек – плоских и сферических мишеней. В практике лазерного сканирования широкое распространение получила комбинированная система сшивки сканов – с использованием как плоских, так и сферических мишеней. Плоские мишени устанавливаются на смежные со станцией сканирования репера, координаты которых определены с высокой точностью. Сферические мишени расставляются рядом с объектом сканирования с таким расчетом, чтобы с каждой станции обеспечивалась видимость на четыре общих сферических мишени. В результате сшивка производится по общим точкам на соседних перекрывающихся сканах (сферическим мишеням). Для центрирования и ориентирования сшитой модели в трехмерном пространстве используются плоские мишени с известными координатами.

На методику сканирования при проведении полевых работ оказывают влияние, во-первых, размеры и форма объекта. Протяженные объекты требуют большого числа станций, с которых производится съемка, что в свою очередь может повлечь увеличение ошибки уравнивания сканерного хода. Влияние объекта съемки на точность получения пространственной информации, в основном, проявляется в погрешности измеряемых расстояний. Большая высота исследуемого объекта может привести к неравноточности измерений, так как расстояние до верхней части объекта будет больше по сравнению с расстоянием до нижней. Если объект имеет форму цилиндра или шара, то существует опасность искажения его формы под влиянием ошибки в измерении расстояния, вызванной формой фронта волны лазера (Гауссовой).

Во-вторых, непосредственное влияние на результаты сканирования оказывает отражающая способность поверхности объекта, которая определяется текстурой, цветом. Лазерный луч рассеивается на неоднородных поверхностях, вызывая шумы в облаке точек. Кроме того, возникают ситуации, когда материалы имеют полупрозрачное покрытие, вызывающее преломление и переотражение лазерного луча. Этот эффект приводит к дополнительной прибавке к измеренному расстоянию. Для очень темных поверхностей (черных), которые поглощают большую часть оптической области спектра, отраженный сигнал будет очень слабым. Таким образом, измерение будет подвержено ошибкам. Поверхности с высокой степенью отражения (например, белые) хорошо отражают сигнал.

Однако, если отражательная способность объекта слишком высока (например, поверхность блестящая), лазерный луч полностью отражается в зеркальном направлении и может встретиться с другой поверхностью или рассеяться. При сканировании объекта, одна часть которого окрашена в белый цвет, а другая в – черный, результат сканерной съемки может иметь большую шумовую составляющую на границе различных цветов. Влажность поверхности объекта оказывает влияние на интенсивность отраженного сигнала, и, возможно, на ошибку в измеряемом расстоянии до объекта.

Параметры сканирования должны выбираться в соответствии с требуемой точностью и детальностью создания модели объекта. Основными параметрами сканирования являются разрешение и количество измерений на одну точку, а также расстояние от инструмента до объекта.

Разрешение – это среднее расстояние между точками в облаке. Определяется шагом сканирования по горизонтали и вертикали, который может задаваться в угловой или линейной мере. Для объектов сложной формы, либо имеющих сложную декоративную отделку, а также в иных случаях, когда необходимо обеспечить высокую детальность съемки (например, для съемки трещин в зданиях), необходимо выбирать высокое разрешение сканирования (с небольшим шагом). В целях экономии времени, для сканирования относительно простых участков объекта, таких как, например, плоские стены, допускается уменьшить разрешение. Параметр количества измерений на одну точку устанавливается для последующего усреднения измеренного расстояния. Установление количества измерений на точку свыше 25 едва ли способно внести заметные улучшения в качество данных, при этом приводя к большим временным потерям. Важно отметить также, что повторное сканирование объекта в одной серии наблюдений с последующим усреднением нескольких сканов способно повысить точность определения положения точек на величину $\sqrt{n}$, где n – количество повторных измерений.

Перед началом сканирования необходимо провести рекогносцировку местности. С учетом конкретных условий местности выбирается рациональный способ создания и сгущения съемочного обоснования. Также во время рекогносцировки намечаются точки расположения сканера, места размещения специальных марок и т.п.

Перед проведением сканирования вокруг здания необходимо построить геодезическую опорную сеть, которая послужит основой для привязки марок лазерного сканера. Если нет точек съёмочного обоснования, необходимо закрепить на местности наблюдательные реперы – точки стояния сканера, которые, в свою очередь, должны быть закоординированы – привязаны к ближайшим знакам государственной или городской геодезической сети (рис. 28). Устойчивое положение этих знаков должно быть подтверждено данными многолетних наблюдений. Координаты наблюдательных реперов относительно опорных должны периодически переопределяться.

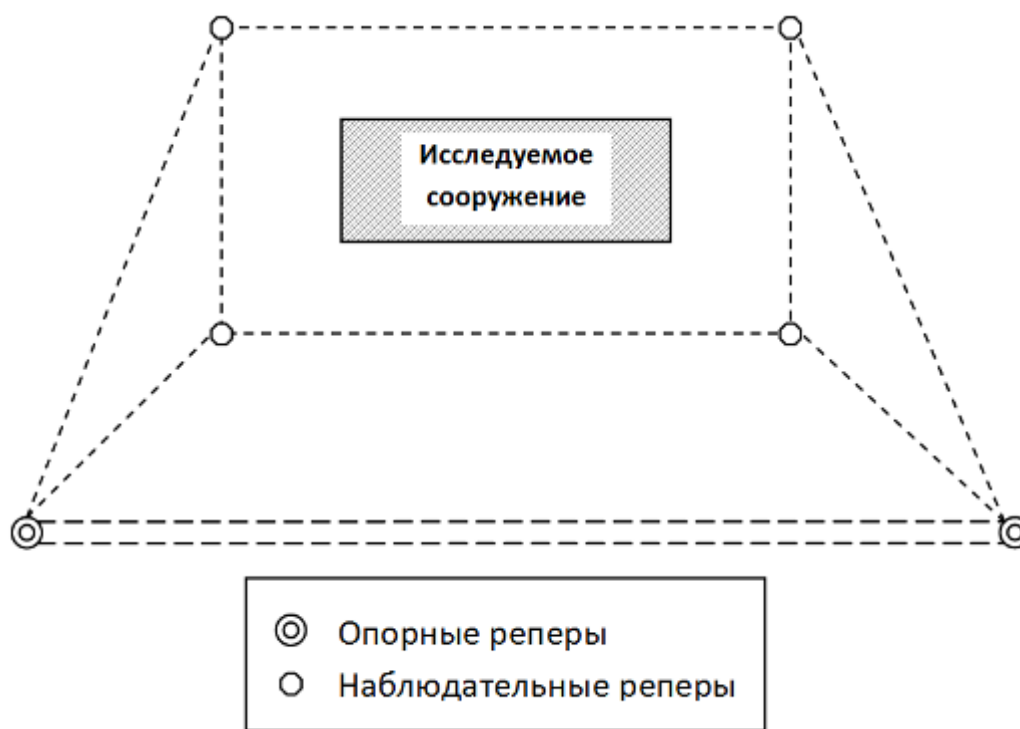


Рисунок 28 - Схема размещения опорных и наблюдательных реперов

Точки стояния сканера должны быть равномерно распределены по территории вокруг объекта для обеспечения равноточности измерений. При этом должна обеспечиваться видимость с каждой станции на предыдущую и последующую. Количество станций и их расположение должны обеспечивать полное покрытие поверхности сканируемого объекта.

Выбор сканерных станций должен обеспечивать отображение на одном скане максимальной площади снимаемого объекта. При этом, чем ближе сканер расположен к объекту, тем меньше проекция лазерного луча на поверхность объекта, а, следовательно, выше точность определения положения точек. Однако при этом уменьшается площадь захватываемой поверхности. Кроме того, существует опасность того, что верхние части здания не попадут в область действия сканера (при ограниченном вертикальном угле инструмента). Таким образом, рационально расположить станции можно только после обследования местности, исходя из конкретных её условий.

После выбора точек стояния сканера необходимо установить специальные марки для последующего взаимного ориентирования (сшивки) сканов. Марки должны располагаться в поле видимости каждой двух смежных станций, их количество должно быть не менее трех. Марки сканируются с каждой станции с максимальным разрешением, чтобы с предельно возможной точностью определить координаты их центров в системе координат скана.

Также стоит отметить, что внешние условия окружающей среды могут оказать влияние на результаты сканирования. Ошибки, вызванные влиянием окружающей среды, зависят от вариаций температуры, давления и влажности. Эти факторы влияют на показатели преломления и длину электромагнитной волны.

В настоящее время большая часть программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования дает возможность учесть параметры атмосферы, такие как температура и давление, позволяя сократить влияние ошибок, вызванных условиями наблюдений. Максимальная точность измерений обеспечивается, когда температура и давление вдоль пути распространения лазерного луча постоянны. Поэтому выполнять измерения нужно в периоды, когда турбулентность атмосферы минимальная, т.е. в периоды спокойных изображений.

Яркое солнечное освещение может привести к неравномерному нагреванию инструмента (или штатива) и расширению одной из его частей, что вызовет искажение данных. Если поверхность сканируемого объекта горячая, излучение, отраженное от него, сокращает соотношение сигнал-шум, что приводит к снижению точности измерения расстояния. Кроме того, сильное влияние на результаты наблюдений оказывает вибрация. Поэтому сканер необходимо устанавливать на устойчивой опоре, а также избегать проведения наблюдений при сильном ветре, а также в часы интенсивного дорожного движения, ведения строительных работ и т.п. Однако, в последних сканирующих системах применяется двухосевой компенсатор, позволяющий компенсировать движения в процессе сканирования.

Подземное лазерное сканирование горных выработок может осуществляться двумя типами лазерных сканеров:

- наземными лазерными сканерами, сущность сканирования которыми была приведена выше;
- специальными лазерными сканерами, адаптированными для применения в подземных условиях.

Во всех случаях принцип лазерного сканирования – построения трехмерной модели на основе облака точек, имеющих пространственные координаты, остается неизменным.

В случае применения наземных лазерных сканеров для сканирования подземных выработок, станции лазерного сканирования размещаются вдоль оси горных выработок, центрируются и ориентируются в пространстве от пунктов маркшейдерского опорного или съемочного обоснования, с точек стояния лазерного сканера производится сканирование внутренней поверхности горной выработки.

В случае применения для сканирования систем мониторинга недоступных поверхностей – лазерных сканеров, адаптированных для применения в подземных условиях, сканирующая головка размещается в горной выработке с использованием системы вертикальных распорных и горизонтальных телескопических штанг.

Основной задачей мониторинга за деформированием подземных горных выработок является контроль за их геометрическими формой и размерами. По результатам лазерного сканирования производится анализ трехмерных цифровых моделей горной выработки, полученных в различные серии инструментальных наблюдений.

Контроль деформирования подземной выработки может осуществляться двумя способами:

- по полному анализу трехмерной модели производится совмещение облаков точек, полученных в различные серии сканирования с построением трехмерной модели деформирования, при этом в выходном материале задается способ отображения информации о величинах смещений – в виде градиентов зон деформирования выделяемых различными цветами;

- по сечениям подземной выработки сопоставляются параметры контура горной выработки, определенные в различные серии сканирования, при этом определяются отклонения сечений от исходных как по знаку, так и по величине.

При размещении станций сканирования в подземных горных выработках возникают ограничения, связанные с их размерами и конфигурацией. В общем случае размещение станций лазерного сканирования, для решения ряда проблем, связанных с их привязкой к принятой на предприятии системе координат, следует приурочивать к реперам подземной маркшейдерской сети и располагать вдоль оси выработок.

В случае использования для съемочных работ сканеров наземного лазерного сканирования его центрирование производится под маркшейдерской опорной или съемочной точкой, а ориентирование на смежные точки маркшейдерской сети.

Сшивка сканов (облаков точек) может производиться по характерным точкам облака, по специальным маркам или с использованием геопривязки. Для сшивки по характерным точкам необходимо отметить одни и те же точки на двух смежных сканах. При сшивке по маркам в качестве связующих точек выступают центры специальных марок, которые отображаются на смежных сканах и после сканирования определяются автоматически. Для осуществления геопривязки точкам на сшиваемых сканах можно присвоить известные координаты, полученные с помощью стандартных геодезических инструментов. Эти точки могут быть как центрами марок, так и какими-либо характерными точками на объектах съемки. Трехмерная модель, построенная по данным лазерного сканирования, позволяет выполнить множество измерений, давая возможность учесть различные виды деформаций зданий и сооружений.

Результатом проведения единичной серии наблюдений является высокоточная цифровая модель участка борта карьера стыке открытых и подземных работ, с которой можно проводить различные математические операции. В результате операции «вычитание» двух цифровых моделей, полученных в различные периоды времени, результирующая модель будет являться объемной моделью сдвижения двух поверхностей. Объемная модель процесса деформирования отражает как величины пространственных смещений точек породного массива, так и их направления, что позволяет решать весь комплекс геомеханических задач.

Построение сечений модели объекта в различных плоскостях с последующей векторизацией (если сечение строилось по облаку точек) и экспортом в какую либо САПР позволяет контролировать правильность геометрической формы объекта: произвести

измерение размеров объекта, величин углов, а также выявить и измерить величину прогиба, выгиба и прочих деформаций.

Кроме того, существует возможность сравнения результатов сканирования с созданными эталонными объектами – плоскостями, линиями и т.п. с целью измерения расхождений между ними. Этот метод дает возможность контролировать кривизну стен, их отклонение от вертикали и другие изменения конструкции зданий и сооружений.

Помимо сравнения с эталоном, можно сравнивать между собой различные поверхности, например, полученные в разные серии наблюдений. Такое сравнение можно дополнить сеткой, в узлах которой будут отображаться численные значения расхождений между поверхностями. Главным условием выполнения таких измерений является соблюдение единой системы координат для разных серий наблюдений.

Современное программное обеспечение предоставляет широкие возможности для визуализации полученных результатов наблюдений.

При построении разрезов для наглядности нужно увеличить масштаб деформаций, для того, чтобы они были различимы в масштабе чертежа. В случае сравнения поверхности с эталонной плоскостью существует возможность построения карты отклонений – либо в виде изолиний отклонений с указанием их численных значений, либо окрашенной в соответствии с их величиной.

Для мониторинга развития деформаций объекта необходимо иметь минимум две серии наблюдений, разделенных установленным временным интервалом и представленных в единой системе координат. В данном случае результаты съемок могут рассматриваться совместно. Для наглядности расхождений между данными различных серий они могут быть окрашены в разные цвета.

В случае проведения мониторинговых наблюдений за изменением параметров зданий и сооружений конечным результатом являются диаграммы отклонения элементов зданий (как правило стен и кровли) от вертикальной и горизонтальной плоскостей.

Полученные в результате лазерного сканирования трехмерные модели исследуются для решения следующих задач:

- дистанционного исследования структурного строения откосных сооружений на стыке открытых и подземных работ для определения элементов залегания пород, слагающих скальный массив и тектонических нарушений;
- дистанционного мониторинга проблемных участков массива и породной подушки, для получения параметров деформирования в виде объемной геомеханической модели, плотность которой, в отличие от дискретной по реперам наблюдательной станции, может варьироваться в широких пределах.

Одним из достоинств метода трехмерного лазерного сканирования является то, что отпадает необходимость закладки на уступах реперов долговременной сохранности, поскольку координаты пунктов сканирования определяются непосредственно во время проведения съемочных работ. Также имеется возможность для широкого варьирования детальности наблюдения – во время проведения исходной серии наблюдений сканируются с заранее завышенной плотностью, проведение рабочих серий наблюдений, для сокращения

трудоемкости полевых работ, производится по разреженной сетке, в случае необходимости производится уплотнение трехмерной модели.

Для мониторинга за деформированием прибортовых массивов на стыке открытых и подземных работ с использованием трехмерного лазерного сканирования размещение станций производится на уступах карьера, расположенных в общем случае выше предполагаемой области сканирования. В данном случае для построения трехмерной модели будет производиться нижележащих уступов, расположенных на противоположном борту придонной части карьера и откосов уступа, на котором расположена станция лазерного сканирования.

Всего на уступе по нижнему контуру размещается ряд станций лазерного сканирования таким образом, чтобы обеспечивалась взаимная оптическая видимость на смежные станции, а также благоприятные условия для координирования станций методом спутниковой геодезии GPS. Точки лазерного сканирования могут как закрепляться на уступах долговременными грунтовыми реперами с использованием оптического или принудительного центрирования, так и не закрепляться жестко на местности, в этом случае их пространственные координаты будут определяться во время ведения съемочных работ.

При составлении проекта наблюдательной станции для мониторинга деформирования прибортовых массивов следует учесть следующие рекомендации при размещении станций:

- место размещения станции должно быть безопасным для нахождения людей и оборудования;
- станции следует располагать на уступе в зоне прямой оптической видимости на расстоянии 100-150 метров друг от друга;
- площадка, предназначенная для размещения станции лазерного сканирования, должна быть ровной и обеспечивать как размещение необходимого оборудования, так и определения пространственных координат станции методами спутниковой геодезии;
- на станции должна обеспечиваться прямая оптическая видимость на объекты съемки: прибортовой массив, выходы тектонических нарушений в откосные сооружения карьера.

Поскольку пространственная привязка съемочных станций трехмерного лазерного сканирования к геодезической сети, принятой на предприятии, производится непосредственно во время выполнения серий мониторинговых наблюдений, возможно использование станций без специального оборудования. С другой стороны, для обеспечения идентичных условий съемки в разные серии мониторинговых измерений, рекомендуется оборудовать станции долговременными реперами грунтового заложения. Тип репера определяется специальным проектом и может быть глубинного заложения с оптическим центрированием или в виде тумбы-стойки с принудительным центрированием.

Для проведения работ по трехмерному лазерному сканированию прибортовых массивов возможно применение лазерных сканеров геодезического класса точности, позволяющих проводить съемку с субсантиметровым уровнем точности на дальности от одного до 100-150 метров.

Состав оборудования определяется типом используемого лазерного сканера и в общем случае состоит из самого сканера, штатива для его установки, электрогенератора и управляющего компьютера или контроллера. Для координирования станции лазерного сканирования в принятой на предприятии системе координат используется комплекс спутниковой геодезии GPS геодезического класса точности.

При составлении проекта наблюдательной станции для мониторинга деформирования подземных горных выработок следует учесть следующие рекомендации при размещении станций:

- место размещения станции должно быть безопасным для нахождения людей и оборудования;
- станции следует располагать по оси горной выработки в зоне прямой оптической видимости на расстоянии не более 50 метров друг от друга;
- площадка, предназначенная для размещения станции лазерного сканирования, должна быть ровной и обеспечивать как размещение необходимого оборудования, так и определения координат точки сканирования и визирных марок от пунктов маркшейдерской сети;
- на станции должна обеспечиваться прямая оптическая видимость на объекты съемки: стенки, кровлю и пол выработки.

Поскольку пространственная привязка съемочных станций трехмерного лазерного сканирования к точкам маркшейдерской сети производится непосредственно во время выполнения серий мониторинговых наблюдений, возможно использование станций без специального оборудования.

При этом в случае использования наземного лазерного сканера, прибор центрируется под маркшейдерской точкой и ориентируется по смежным точкам. В случае использования для съемочных работ сканеров адаптированных для подземных работ, центрирование и ориентирование съемки производится электронным тахеометром по специальным маркам горизонтальной телескопической штанги от маркшейдерских опорных или съемочных точек.

Для проведения работ по трехмерному лазерному сканированию подземных горных выработок возможно применение как наземных лазерных сканеров геодезического класса точности, так и специально адаптированных лазерных сканирующих систем для съемки горных выработок.

Состав оборудования определяется типом используемого лазерного сканера и в общем случае состоит из самого сканера, штатива для его установки или набора установочных штанг, аккумуляторной батареи и управляющего компьютера или контроллера. Для координирования станции лазерного сканирования от точек маркшейдерского обоснования используется электронный тахеометр с функцией безотражательного измерения расстояний.

2.4 Выводы по разделу

1. Целью ведения инструментального мониторинга геомеханического состояния породного массива является информационное обеспечение органов управления государственным фондом недр, надзорных органов и недропользователя о состоянии геологической среды и развивающихся в ней процессов и явлений в период недропользования. Федеральный Закон «О недрах», определяет права и обязанности пользователя недр и требует, чтобы пользователь недр обеспечил соблюдение норм и правил по охране недр, а также зданий и сооружений от вредного влияния работ, связанных с использованием недр. Для выполнения этого требования и обеспечения безопасности ведения работ, связанных с использованием недр, Законом предписывается проведение комплекса геологических и иных наблюдений, достаточных для обеспечения нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций, своевременное определение и нанесение на планы горных работ опасных зон.

2. Принятый метод инструментальных измерений спутниковой геодезии GPS позволяет определять полные пространственные координаты реперов наблюдательной станции на различные эпохи измерений, смещения реперов между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного тензора деформаций. Предложенный площадной принцип построения наблюдательной станции в отличие от традиционного, линейного, позволяет получить пространственный тензор деформаций: по двум осям деформируемой площади и в вертикальном направлении. Охват инструментальными измерениями внешней и внутренней областей деформирования обеспечивает получение полной картины процесса сдвижения с учетом дискретности строения породного массива, анизотропии и аномалий в развитии процесса сдвижения.

3. Использование комплексов спутниковой геодезии для исследования процесса сдвижения на горных предприятиях является оправданным, поскольку по критерию допустимых погрешностей результатов измерений они удовлетворяют требованиям действующей нормативной документации. Возможное снижение точности измерений, вызванное условиями применения спутникового оборудования на горных предприятиях, надежно контролируется, поскольку контроль фактических погрешностей измерений осуществляется по трехуровневой системе в процессе камеральной обработки результатов измерений. В результате мониторинговых измерений определяются пространственные координаты реперов наблюдательной станции, при сопоставлении которых из различных эпох измерений производится расчет векторов сдвижений, и, следовательно, определяются главные компоненты плоского тензора деформаций в различных вариантах расчета.

4. Основным недостатком классических и спутниковых методов геомеханического мониторинга является дискретность полученных данных, поскольку определяются смещения только для некоторого числа точек (реперов), тогда как концентрация деформаций может происходить на узких локальных участках объекта. Использование комплексов трехмерного лазерного сканирования открывает уникальные возможности контроля и мониторинга состояния зданий и сооружений, расположенных на подработанных территориях. По отстроенной трехмерной модели охраняемого сооружения задаются эталонные вертикальные и горизонтальные плоскости, на которые проецируется фактическое положение конструктивных элементов здания. По математическим разностям фактической и эталонной объемных моделей здания возможно построение карт отклонения геометрических параметров здания от исходных.

5. Принятый метод инструментальных измерений объемного лазерного сканирования позволяет определять полные трехмерные модели исследуемых объектов с высокой точностью, необходимой для определения смещений облаков точек между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного деформирования. При этом определения деформаций производятся дистанционно, при этом не требуется нахождение персонала непосредственно вблизи исследуемого объекта, который может представлять опасность внезапного обрушения. Гибкость метода объемного лазерного сканирования позволяет получать универсальные трехмерные модели деформируемых объектов любой заданной конфигурации и разрешения, с которыми можно производить математические операции объединения, вычитания друг из друга поверхностей, полученных в различные серии мониторинга, отклонение фактической модели от эталонной вертикальной и горизонтальной плоскостей. Универсальность метода объемного лазерного сканирования позволяет применять его в различных условиях – при открытой и подземной разработке полезных ископаемых для исследования деформирования откосных сооружений бортов карьеров, подземных камер и пустот, а также снаружи и внутри зданий и сооружений для исследования их деформаций.

3 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс

При разработке программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс проанализированы:

- собственно результаты, достигнутые при выполнении научно-исследовательской работы;
- действующий Государственный образовательный стандарт и рабочие учебные планы высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированных специалистов «Горное дело» и «Маркшейдерское дело» Уральского государственного горного университета.

Анализ полученных основных материалов и анализ учебных планов подготовки специалистов по указанным направлениям показал возможность использования полученных результатов данной НИР в данных учебных программах, а также по дисциплинам дополнительного факультативного образования.

Выполненный анализ свидетельствует о том, что новый Государственный образовательный стандарт, при сохранении преемственности и общей структуры изучаемых дисциплин, предусматривает, с одной стороны, повышение степени стандартизации рабочих учебных планов, а с другой – предусматривает значительную гибкость подготовки специалистов за счет выделения блока «Дополнительное факультативное образование» и создания значительного резерва самостоятельной работы.

Использование в учебном процессе результатов настоящей НИР может быть реализовано путем:

- корректировки учебных программ и включения них соответствующих вопросов и материалов;
- введения в блок «Дополнительное факультативное образование» спецкурсов и факультативов;
- создания новых дисциплин по выбору по ряду технологических специальностей или специализаций;
- внедрения результатов исследований в качестве методических элементов при выполнении курсовых проектов;
- использования полученных материалов в качестве методических указаний по дипломному проектированию при выполнении студентами специальных частей дипломных проектов.

Наиболее эффективным и быстрым способом внедрения результатов работ в учебный процесс, по нашему мнению, является выполнение реальных дипломных проектов по заказам предприятий, проектных или научно-исследовательских институтов.

Элементы методик проектирования систем мониторинга и автоматизированной обработки и визуализации расчетов могут быть с успехом применены в качестве реальных учебных материалов при организации дистанционного обучения и переподготовки специалистов.

Полученные результаты НИР могут быть использованы:

- при подготовке специалистов по очной и заочной формам обучения, в т.ч. и с организацией дистанционного обучения;
- при переподготовке инженерных кадров (технологов, маркшейдеров, специалистов по проектированию горных предприятий и пр.);
- при организации дополнительной подготовки (переподготовки) специалистов со среднетехническим и высшим образованием;
- при подготовке специалистов высшей квалификации через аспирантуру.

Результаты исследований, выполненных в ходе данной работы, вошли в программу повышения квалификации специалистов Института дополнительного профессионального образования Уральского государственного горного университета (УГГУ), утвержденную 22.11.2010 г., содержание которой представлено в табл. 4 и 5.

Таблица 4 - Программа профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов предприятий по направлению «Снижение риска природно-техногенных катастроф при недропользовании»

Код группы	Наименование программы повышения квалификации профессиональной подготовки	Продолжительность обучения, дней/часов	Время проведения занятий	Изучаемые дисциплины и итоговые документы
2-26	Снижение риска природно-техногенных катастроф при недропользовании	72	По мере накопления группы слушателей	Современное состояние аварийности при недропользовании. Термины и понятия в области природно-техногенных катастроф. Теоретические основы природно-техногенных катастроф. Нормативные требования, пути и методы снижения риска аварий и катастроф. Диагностика опасности природно-техногенных аварий и катастроф. Мероприятия по снижению риска природно-техногенных аварий и катастроф в различных областях недропользования. Выдается удостоверение о краткосрочном повышении квалификации.

Занятия проводятся на базе ИГД УрО РАН по адресу: Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, аудитория 406.

Таблица 5

№ п/п	Тема занятий	Количество о часов
1	Современное состояние аварийности и проявления природно-техногенных катастроф при недропользовании	2
2	Термины и понятия в области природно-техногенных аварий и катастроф	2
3	Теоретические основы природно-техногенных катастроф при недропользовании	4
3.1	Современные модельные представления о массиве горных пород	4
3.2	Современные представления о геодинамических движениях земной коры	4
3.3	Явления деструкции и самоорганизации в массиве горных пород	4
3.4	Трансформация свойств массива горных пород	
3.5	Механизм воздействия современных геодинамических движений на объекты недропользования	
4	Пути и методы снижения риска аварий и катастроф	2
5	Нормативные требования к обеспечению геодинамической безопасности	2
6	Диагностика опасности природно-техногенных катастроф	
6.1	Инженерно-геофизические изыскания по определению структуры участков недропользования	8
6.2	Инженерно-геодезические изыскания по определению параметров современных геодинамических движений	8
7	Мероприятия по снижению риска аварий и катастроф в различных областях недропользования:	6
7.1	-При строительстве и эксплуатации стволов капитальных горных выработок подземных предприятий	6
7.2	-При строительстве и эксплуатации объектов подземного пространства мегаполисов	6
7.3	-При строительстве и эксплуатации протяженных объектов (магистральных нефтегазопроводов, водоводов, коллекторов и т.п.)	6
7.4	-При строительстве и эксплуатации транспортных сооружений и коммуникаций	6
7.5	-При строительстве и эксплуатации энергетических объектов (АЭС, ГЭС и др.)	
Итого:		72

Руководители курса:
Зав. отделом геомеханики
ИГД УрО РАН, д.т.н.

А.Д. Сашурин

Зав. кафедрой
УГГУ, д.т.н.

В.Б. Болтырев

Кроме этого, на основании результатов исследований, выполненных в ходе данной работы, разработаны:

Методические указания по проведению мониторинга на геодинамических полигонах при эксплуатации месторождений нефти и газа

Общие положения. Одним из мероприятий по обеспечению безопасности в процессе эксплуатации месторождений нефти и газа является предусмотренный законодательством мониторинг деформационных процессов на геодинамическом полигоне, по результатам которого могут быть приняты меры по предотвращению и нейтрализации опасных ситуаций.

Большие площади лицензионных участков, составляющие более 1000 квадратных километров, обуславливают специфичные принципы построения наблюдательной сети геодинамического полигона. Во-первых, в рассматриваемых условиях единственно возможным является площадной принцип построения наблюдательной сети, обеспечивающей получение полной информации о параметрах деформационного поля. Площадной принцип наблюдений, в отличие профильного построения наблюдательных сетей, дает возможность получить тензорную информацию о деформационных процессах на каждом участке исследуемой территории, включающую вертикальные деформации (наклоны), главные (максимальные и минимальные) горизонтальные деформации, их направление.

Во-вторых, в соответствии со спецификой неоднородности освоенности и использования территории, целесообразно применить многоуровневый принцип построения наблюдательной сети. На первом уровне геодезические пункты наблюдательной сети обеспечивают общий охват лицензионных участков и всего месторождения в целом. Второй уровень предусматривает сгущение геодезических пунктов наблюдательной сети на территориях охраняемых объектов для детализации о деформационных полях на этих участках.

Введение третьего уровня наблюдательной станции возможно в процессе проведения мониторинга в случае выявления аномального развития деформационных процессов на участках ответственных охраняемых объектов. Третий уровень представляется специальной наблюдательной станцией из грунтовых и стенных реперов в охраняемом объекте.

Наблюдения по сети первого и второго уровней производятся с использованием технологий спутниковой геодезии GPS. На специальных наблюдательных станциях третьего уровня могут использоваться традиционные маркшейдерские методы наблюдений.

В процессе мониторинга исследованию подлежат трендовые и циклические геодинамические движения, а также техногенные движения, вызванные разработкой месторождения. Для исследования циклических геодинамических движений требуется проведение кратковременных непрерывных наблюдений методами спутниковой геодезии. Трендовые геодинамические и техногенные движения определяются с помощью периодических наблюдений.

Деформационные поля строятся по каждому виду движений отдельно синтезируются в суммарные деформационные процессы, обусловленные всеми тремя видами движений.

Принятые принципы построения геодинамического полигона и методика проведения наблюдений обеспечивают оптимизацию затрат на проведение мониторинга при получении необходимого объема информации для обеспечения безопасности разработки месторождения и удовлетворения требований действующего законодательства и нормативных документов.

Разработка состава геодинамического полигона и программы проведения наблюдений произведены в соответствии с требованиями нормативных документов Ростехнадзора:

- РД 07-309-99 «Положение о порядке выдачи разрешений на застройку площадей залегания полезных ископаемых» (пп.42,43,48);
- РД 07-408-01 «Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр» (п.16);
- РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» (пп.262-267).

Кроме того, использована дополнительная информация ряда отраслевых документов:

- «Руководство по геодинамическим наблюдениям и исследованиям для ТЭК» (М.: Минтопэнерго РФ, 1997г.);
- «Концепция. Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России» (м.: Минтопэнерго РФ, РАН, 2000г.)
- СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства» (Принят Госстроем России №9-4/116 от 11.10.1997г.).

Программа мониторинга Маркшейдерский мониторинг является наиболее ответственной частью общей системы мониторинга геологической среды в процессе

недропользования, так как в его задачу входит обеспечение сохранности и безопасности объектов, попадающих в область влияния работ по использованию месторождения. Программа создания и ведения мониторинга разрабатывается в соответствии с требованиями к мониторингу, установленными в лицензии на недропользование и должна содержать следующие разделы:

- цель и конкретные задачи мониторинга;
- выделение основных объектов наблюдений и состава наблюдаемых показателей;
- размещение пунктов наблюдательной сети и их конструкцию;
- методику проведения наблюдений;
- обработку данных и прогнозирование;
- состав, форму и сроки передачи данных в органы управления фондами недр и органы надзора.

Мониторинг деформационных процессов должен охватывать три зоны влияния эксплуатации нефтегазового месторождения:

I зона – зона непосредственного ведения работ по откачке флюидов и отбору газа, условно очерчиваемая проекцией границы газо-водяного контакта месторождения на поверхности;

II зона – зона существенного влияния, распространяющаяся за пределы границ эксплуатационных работ, в пределах которой техногенные деформации оказывают фиксируемое инструментально влияние на состояние недр и расположенные в ней объекты;

III зона – периферийная зона, примыкающая к зоне существенного влияния или зона фоновых деформаций.

Деформационные процессы в первой и второй зонах определяются техногенной деятельностью по эксплуатации месторождения и фоновыми современными геодинамическими движениями. В периферийной зоне проявляются только фоновые современные геодинамические движения. На охраняемые объекты, попадающие в зоны влияния работ по эксплуатации месторождения, воздействуют суммарные деформации, проявляющиеся на конкретных участках их расположения.

Современные фоновые геодинамические движения подразделяются на трендовые движения (крип), имеющие относительно постоянные направление и скорость в течение года и более, и циклические движения полигармонического характера с продолжительностью циклов от нескольких секунд до нескольких часов и месяцев. Комплекс наблюдений в процессе мониторинга должен обеспечивать определение параметров суммарного тензора деформаций, включающего тензоры трендовых, циклических и техногенных деформаций.

Результаты мониторинга должны обеспечить получение данных о степени воздействия всего комплекса постоянных и переменных деформаций на охраняемые объекты, оценку текущего состояния безопасности объектов и прогноз их безопасности на последующие периоды эксплуатации месторождения. При необходимости результаты мониторинга должны обеспечивать разработку мер предупреждения аварийных ситуаций на охраняемых объектах.

В соответствии с требованиями СП 11-104-97 пункт 10.64 геодезические наблюдения на геодинамических полигонах в районах проявления геодинамических движений по разрывным тектоническим смещениям должны выполняться в комплексе со структурно-геоморфологическими и геофизическими исследованиями.

Концепция построения наблюдательной станции. Наблюдательная станция, предназначенная для проведения мониторинга деформационных процессов, вызванных эксплуатацией месторождения, создается с учетом горно-геологических условий и параметров занимаемой территории.

Условия залегания месторождений нефти газа и протекающие при их разработке геомеханические процессы создают специфичные закономерности деформирования массива горных пород и земной поверхности, существенно отличающиеся от закономерностей сдвижения горных пород на месторождениях твердых полезных ископаемых. Во-первых, месторождения нефти и газа, как правило, занимают большие территории. Во-вторых, при разработке месторождений углеводородов в массиве горных пород не образуются масштабные пустоты, способные вызвать развитие процесса обрушения вмещающих пород и налегающей толщи, поэтому априори зона обрушения на поверхности отсутствует. В-третьих, процесс сдвижения, вызываемый уплотнением пород коллекторов в результате изменения начального порового давления, носит плавный характер деформирования, но захватывает большие территории.

Одновременно с отмеченными особенностями в развитии процесса сдвижения сохраняются общие закономерности, такие как, проявление ступенчатого сдвижения по тектоническим нарушениям, неоднородное распределение деформаций по прилегающим к ним зонам и др.

В этих условиях построение геодинамического полигона по принципам конструирования наблюдательных станций на месторождениях твердых полезных ископаемых не обеспечивает решения задач мониторинга. Профильный принцип расположения реперов наблюдательной станции и традиционные методы проведения наблюдений в виде нивелировок и измерений изменений расстояний между реперами не отражают реальных процессов деформирования территорий, требуют несоразмерных

трудовых и материальных затрат и, самое главное, не дают требуемой полноты информации о параметрах деформаций. 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 поставленных задач и принятия решений по охране объектов от влияния работ по отбору-закачке газа необходима достоверная информация о распределении деформаций в трехмерном пространстве, которую можно получить лишь с использованием площадного принципа построения наблюдательной станции и современных технологий спутниковой геодезии для определения полных трехмерных векторов смещений реперов, распределенных по исследуемой территории.

Применение площадного принципа построения наблюдательной станции обеспечивает достижение целей, поставленных перед деформационным мониторингом при приемлемых затратах. Вместе с тем, площадной принцип не препятствует, в случае выявления на определенном этапе аномальных зон деформирования, сгущение сети реперов наблюдения, в том числе и расположению их по профильным линиям.

Виды инструментальных наблюдений. В условиях месторождений нефти и газа, характеризующих обширной территорией залегания, осложненной развитой речной сетью, заболоченностью, разнообразием растительности, применение традиционных геодезических методов для наблюдений проблематично по трудовым затратам и может не обеспечить необходимой достоверности результатов. Рубка просек на залесенных участках для обеспечения прямой видимости, проблемы проложения нивелирных ходов по заболоченным зонам, передача высотных отметок через водные объекты – все это делает задачу проведения мониторинга нереальной.

Единственным приемлемым методом проведения инструментальных наблюдений в этих условиях являются технологии спутниковой геодезии в дифференциальном режиме. Применение их не требует прямой видимости между наблюдаемыми пунктами, они не чувствительны к погодным условиям и времени суток (светлое и темное время). При этом одновременная работа трех и более спутниковых приемников геодезического класса обеспечивает определение полных значений трехмерных (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) векторов смещений наблюдаемых пунктов с субмиллиметровой точностью в пределах $1 \div 5$ мм.

Инструментальные наблюдения выполняются в двух режимах – дискретные или периодические (1-2 раза в год) и непрерывные в течение короткого периода (4-6 часов). Периодические наблюдения проводятся для получения трендовых геодинамических и

техногенных смещений, накапливающихся за промежуток времени между смежными наблюдениями.

Для получения параметров циклических геодинамических движений проводятся непрерывные кратковременные наблюдения в течение нескольких часов по 5-7 приемникам, обеспечивающим непрерывный контроль за 15-20 разнонаправленными интервалами.

Периодичность наблюдений трендовых движений по всей исследуемой территории должна коррелироваться с интенсивностью откачки флюидов и отбора газа, а также проведения мероприятий по поддержанию пластового давления. Обычно достаточно одного раза в год. В случае появления аномальных зон с интенсивным развитием деформаций или установления безопасного характера деформационных процессов периодичность может быть изменена.

Наблюдения за циклическими геодинамическими движениями проводятся на разных участках исследуемой территории с тем, чтобы определить пределы изменения их параметров. Больше внимание при этом следует уделять застроенным участкам с ответственными охраняемыми объектами.

По времени непрерывные наблюдения могут проводиться и самостоятельно, и совмещаться со временем проведения наблюдений за трендовыми смещениями.

Основными результатами инструментальных наблюдений являются векторы техногенных и трендовых геодинамических движений, а также максимальные амплитуды и частоты циклических короткопериодных геодинамических движений. Они являются исходными данными для дальнейшей обработки и анализа развивающихся процессов. По ним отстраиваются карты распределения современных трендовых (техногенных и геодинамических) движений и карты распределения максимальных амплитуд циклических движений.

Для дальнейшего анализа текущего состояния наблюдательная сеть реперов разбивается в систему треугольников разных размеров и разных сочетаний пунктов, по которым определяются величины и направления главных линейных деформаций «растяжение – сжатие» в горизонтальной плоскости и наклонов в вертикальной. По ним отстраиваются соответствующие карты.

Распределение параметров деформаций по территории и сопоставление их с критериями допустимых деформаций для охраняемых объектов позволяет оценить уровень негативного воздействия деформаций, вызванных разработкой месторождения, на охраняемые объекты и окружающую среду. Скорости развития деформационных процессов дают возможность осуществить прогноз на последующие периоды разработки.

В случае выявления зон с высокими деформациями, наблюдательная станция дополнительно развивается для более глубокой детализации информации и оперативного принятия необходимых мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации жилых и промышленных объектов.

Конструкция геодинамического полигона.

- Методы проведения инструментальных наблюдений

Мониторинг геомеханических и геодинамических процессов заключается в периодическом переопределении высотных и плановых координат закрепленных точек горного массива. Для этого на поверхности закладывают специальные знаки – реперы, между которыми измеряют изменения длин интервалов и превышений. Измерения осуществляются геодезическими приборами и инструментами.

Маркшейдерская служба должна осуществлять контроль состояния реперов наблюдательной станции, и, в случае уничтожения одного или части реперов, своевременно предпринимать меры по восстановлению целостности наблюдательной станции.

Традиционно при наблюдениях за деформационными процессами на земной поверхности для измерения превышений и длин интервалов между реперами используются нивелиры и стальные компарированные рулетки, либо светодальномеры.

В соответствии с опытом выполнения инструментальных наблюдений за процессом сдвижения горных пород при разработке нефтяных и газовых месторождений и требованиями инструктивных материалов, при выполнении геодезических работ на геодинамическом полигоне для определения высотного положения реперов используют нивелиры, применяемые при нивелировании II класса. Допустимый периметр полигона нивелирования II класса составляет 20 км. Нивелирование II класса выполняют в прямом и обратном направлениях; невязки в полигонах и по линиям допускаются не более $5\sqrt{L}$, мм, где L – длина хода, км.

Измерение длин интервалов между реперами может быть выполнено светодальномером со средней квадратической погрешностью измерения не более ± 5 мм. Последовательность выполнения операций по измерению расстояний светодальномером регламентируется инструкциями по эксплуатации конкретного прибора.

Для выполнения традиционных наблюдений необходимо заложить на поверхности месторождений профильные линии с интервалом реперов не более 500 м. Учитывая размеры площади лицензионных участков по простиранию и падению, общая протяженность профильных линий составит более 250 км, а общее количество реперов – более 500 шт. Это приведет к значительным экономическим затратам, связанным с изготовлением реперов, их

закладкой в натуре и обеспечением прямой видимости между смежными реперами (порубкой просек).

Большая часть территории лицензионных участков ОАО «ТНК-Нягань» расположена в заболоченной местности. Это сильно влияет на точность взятия отчета, сложность в соблюдении равенства плеч при нивелировании, и как показывает опыт при выполнении данного вида работ на газовых и нефтяных месторождениях традиционные инструментальные наблюдения в данных условиях малоэффективны. Кроме того, при таких размерах наблюдательной станции объемы полевых работ окажутся колоссальными и экономически не оправданными.

При выполнении инструментальных наблюдений на геодинимических полигонах в данных условиях целесообразно традиционную методику наблюдений по реперам профильных линий заменить технологией дифференциальной спутниковой геодезии. Применение данной технологии позволяет по результатам инструментальных наблюдений определить полные тензоры деформаций и изменения напряжений на исследуемом участке, определить полный вектор смещения точек поверхности.

Применение данной технологии позволяет увеличить расстояние, между реперами исходя из условий местности до 15-20 км, без обеспечения прямой видимости. Кроме того, технология спутниковой геодезии позволяет отказаться от закладки профильных линий. Вместо них реперы наблюдательной станции закладываются по площади месторождения вблизи от объектов, подлежащих охране от вредного влияния геомеханических и геодинимических процессов.

Таким образом, применение технологий спутниковой геодезии обеспечивает получение информации о деформационных процессах на более высоком информационном уровне и сокращает затраты на оборудование геодинимического полигона и проведение мониторинга

- **Схема наблюдательной сети**

При проектировании конструкции геодинимического полигона за основу принимается принцип построения геодезических сетей «от общего к частному». В соответствии с ним, развитие геодезической сети должно производиться от пунктов более высокого класса к пунктам низших разрядов. Исходя из этого, наблюдательная станция будет иметь двухуровневую структуру:

1. Государственная Геодезическая Сеть (ГГС);
2. Рабочие реперы геодинимического полигона.

Первый уровень геодинимического полигона включает пункты триангуляции местной Государственной геодезической сети и пункты полигонометрии. Сеть состоит из

пунктов, охватывающих всю территорию лицензионных участков, попадающую в границы прогнозируемой мульды сдвижения. Часть геодезических пунктов располагается за пределами мульды сдвижения, прогнозируемой от эксплуатации лицензионных участков.

Такое расположение пунктов решает одновременно две задачи. Во-первых, удовлетворяет требованию нормативных документов по построению традиционных систем наблюдений, а именно выносу опорных пунктов за пределы мульды сдвижения. Во-вторых, пункты, расположенные за границами мульды сдвижения позволяют контролировать уровень фоновых геодинамических движений, не связанных с эксплуатацией месторождения. Предшествующий опыт проведения мониторинга на геодинамических полигонах свидетельствует, что фоновые геодинамические движения могут превосходить по уровню техногенные. Принятое размещение наблюдательной сети позволит получить информацию об уровне тех и других смещений и деформаций.

Периодическое переопределение координат пунктов ГГС позволяет диагностировать современную геодинамическую активность территории с определением трендовых и циклических движений. Кроме того, ГГС служит для привязки к ней геодезических построений низших классов.

Рабочие реперы геодинамического полигона служат для определения деформаций поверхности и объектов, подлежащих охране, выделения потенциально опасных участков повышенной аварийности трубопроводной системы и эксплуатационных скважин.

Наблюдательные станции из рабочих реперов оборудуются на промплощадках промышленных объектов. Рабочие станции оборудуются четырьмя, пятью рабочими реперами, охватывающими с внешней границы территорию охраняемого объекта. При четырех реперах напряженно-деформированное состояние контролируется четырьмя треугольниками, дублирующими друг друга, что обеспечивает высокую надежность полученных данных о деформированных участках.

Принятый принцип построения геодезической наблюдательной сети оптимизирует объемы работ по проведению мониторинга, обеспечивающего полной информацией о развивающихся деформационных процессах на территории эксплуатируемого месторождения. В процессе проведения мониторинга при выявлении аномальных зон деформирования, представляющих потенциальную опасность для охраняемых объектов, наблюдательная сеть позволяет вводить дополнительные элементы, производить сгущение сети наблюдаемых пунктов и предпринимать другие меры по детализации полученной информации.

- **Конструкция и способы закладки реперов**

Закладка пунктов геодинимического полигона производится в соответствии с требованиями нормативных документов. Реперы изготавливают и закладывают с условием их долговременной сохранности, обеспечивая прочную связь реперов с грунтом.

Глубина закладки грунтового репера должна быть больше глубины промерзания грунтов не менее чем на 150 см. Следует избегать закладки реперов в торфяниках. При распространении торфяников на большие пространства необходимо, чтобы якорь репера был заклублен в минеральный грунт не менее чем на 150 см. Грунтовой репер (тип 188) для заболоченных территорий представляет собой буровую трубу с внутренним диаметром 60 мм, с толщиной стенок не менее 5 мм и длиной 3,60 м, к нижнему концу которой приварен винтовой якорь (шнек) диаметром 20 см. Верхняя часть репера должна иметь сферическую поверхность с нанесённым центром диаметром $1 \pm 1,5$ мм.

Репер закладывается в пробуренную скважину глубиной 3 м и завинчивается в слой плотной породы не менее чем на 30 см. Внешнее оформление репера выполняется в виде трубчатого металлического опознавательного столба с приваренной пластиной 20×30 см, обращенной в сторону репера. Металлические конструкции окрашиваются масляной краской красного цвета. На опознавательной пластине белой масляной краской указываются номер репера и год закладки.

Реперы изготавливают и устанавливают специализированные организации и подразделения. При закладке реперов должны соблюдаться все требования «Правил по технике безопасности на топографо-геодезических работах» и общеобязательных инструкций по видам работ. Контроль и приемка работ по закладке центров и реперов должны осуществляться в соответствии с требованиями действующей «Инструкции о порядке контроля и приемки топографо-геодезических и картографических работ».

На создаваемом геодинимическом полигоне наблюдательная сеть первого уровня образуется из действующих триангуляционных пунктов местной полигонометрии, соответствующих приведенной выше конструкции грунтовых реперов. В целях облегчения проведения полевых работ на пунктах первого уровня дополнительно устанавливаются опознавательные знаки с обозначением пункта, присвоенного в геодинимическом полигоне.

Рабочие репера, размещаемые на территории охраняемых объектов, используются забивного типа с установкой опознавательного знака.

Вынос запроектированных грунтовых реперов в натуру выполняются с учетом особенностей рельефа и технологических сооружений, подлежащих охране. При этом допускается проводить корректировку проекта геодинимического полигона и устанавливать окончательные места закладки реперов непосредственно на местности.

При закладке рабочих реперов необходимо обращать внимание на удобство доступа к реперу при выполнении полевых измерений. Наиболее благоприятным местом для закладки реперов является повышенная форма рельефа со слабоувлажненным грунтом и глубоким залеганием грунтовых вод. Следует избегать закладки реперов в торфяниках, вблизи дорог с интенсивным движением. Запрещается закладывать реперы в местах предполагаемых застроек.

Привязка заложенных реперов к опорной геодезической сети осуществляется в процессе производства мониторинговых наблюдений. Обычно при выполнении наблюдений привязку реперов к опорной геодезической сети называют нулевой серией наблюдений.

Методика осуществления мониторинга. Основная идея мониторинга геомеханических и геодинамических процессов на земной поверхности заключается в периодическом переопределении пространственных координат пунктов геодинамического полигона. В результате сопоставления координат наблюдаемых пунктов геодинамического полигона, измеренных через определенные временные интервалы, получают полные векторы смещений пунктов, величины вертикальных и горизонтальных деформаций горного массива.

Измерения осуществляются при помощи приборов и методов спутниковой геодезии.

- **Полевые работы**

Все полевые измерения с использованием комплексов спутниковой геодезии GPS должны предваряться планированием времени и продолжительности спутниковых измерений. Данная процедура осуществляется с использованием специализированного программного обеспечения, поставляющегося вместе с GPS приемниками. Для производства наблюдений необходимо выбирать промежутки времени, в которые количество видимых над горизонтом спутников максимально и составляет не менее 6 спутников.

Основная задача в проведении инструментальных наблюдений и последующей камеральной обработке определения координат всех пунктов наблюдательной станции является выбор базы. В качестве такой базы принимается пара геодезических пунктов ГГС, между которыми взаимные изменения координат минимальны. Выбор такой базы обеспечивает повышенную достоверность результатов мониторинга.

На первом этапе полевых работ производится наблюдение сети пунктов ГГС. Время наблюдений на каждом пункте сети должно составлять не менее 45 минут. На последующих этапах полевых измерений осуществляется привязка от пунктов ГГС узловых пунктов опорной сети рабочих реперов наблюдательной станции. Возможна увязка пунктов опорной сети одновременно с наблюдениями пунктов ГГС, что обеспечивает более жесткие геодезические построения. В этом случае в качестве исходных пунктов сети для оптимизации временных затрат следует использовать пункты ГГС, расположенные в

центральной части участка. Поскольку при работе в центральной части участка длины векторов сети уменьшаются, то возможно использование одночастотной GPS-аппаратуры и сокращение времени наблюдений на репере до 15-20 минут.

- **Инструменты и допустимые погрешности**

Для производства измерений используются комплексы спутниковой геодезии GPS, состоящие из 3 и более одно- и двухчастотных фазовых приемников.

Двухчастотные GPS приемники целесообразно использовать для переопределения пространственных координат пунктов ГГС, привязки рабочих реперов наблюдательной станции к пунктам ГГС, когда длины векторов превышают 5 км. В этом случае качественный результат можно получить за меньший промежуток времени наблюдений. При производстве наблюдений на базах от нескольких сотен метров до первых километров допускается применение одночастотной GPS аппаратуры, поскольку на длинах векторов менее 5 километров все вычисления производятся только по одной частоте.

В случае производства измерений в неблагоприятных условиях, таких как зона действия линий электропередач, многолучевой ход радиосигнала и проч. необходимо использовать помехоустойчивые антенны и приборы, в которых на аппаратном уровне реализована защита от неблагоприятных электромагнитных и многолучевых шумовых воздействий.

Наиболее рациональной схемой выполнения измерений является схема, когда 3 или 4 GPS-приемника устанавливаются в качестве базовых на пунктах ГГС, а одним или двумя приемниками производятся наблюдения на соседних пунктах геодезической сети. Общее количество одновременно работающих приемников может составлять при этом более 5 шт. Использование такого количества одновременно работающих приемников позволяет в результате выполнения измерений получить замкнутые геодезические построения и с высокой степенью надежности оценить качество полевых измерений.

При условии одновременной работы более 2-х базовых GPS-приемников по результатам разности фаз спутникового радиосигнала компоненты вектора между двумя и более реперами наблюдательной станции определяются с миллиметровой точностью. Точность определения координат пунктов относительно базовых составляет 2-3 мм. Жесткое требование условия одновременной работы более 2-х приемников спутникового радиосигнала в технологиях дифференциальной GPS обусловлено необходимостью исключения из результатов обработки погрешностей, вызванных влиянием ионосферы и тропосферы Земли.

- **Периодичность наблюдений**

Периодичность проведения наблюдений на лицензионных участках ОАО «ТНК-Нягань» следует увязать со стадией разработки месторождения. Освоение его было начато в 1981-1982 годы. В настоящее время месторождение эксплуатируется более 25 лет. Процессы сдвижения массива горных пород и земной поверхности к этому времени должны войти в определенный установившийся режим.

В связи с этим, на данном этапе целесообразно ограничиться периодичностью проведения наблюдений один раз в год. После двух-четырех лет наблюдений с такой периодичностью, в зависимости от характера и интенсивности развития деформаций, возможна корректировка периодичности как в целом по полигону, так и по отдельным участкам и охраняемым объектам.

Наблюдения выполняются в благоприятное для полевых работ время года.

- **Обеспечение безопасности при осуществлении геодезических работ**

При производстве полевых геодезических работ необходимо выполнять требования к технике безопасности, которые регламентируются действующими «Правилами по технике безопасности на топографо-геодезических работах».

- **Камеральная обработка**

Камеральная обработка результатов полевых измерений, выполненных с использованием GPS-аппаратуры, логически распадается на два этапа:

- 1) обработку GPS измерений и определение координат пунктов ГГС, опорной сети и рабочих реперов наблюдательной станции;
- 2) определение полных векторов смещений и деформаций породного массива.

На первом этапе камеральной обработки с использованием специального программного обеспечения вычисляются вектора пространственной GPS сети, по замыканиям векторов вычисляются невязки замкнутых полигонов, по величинам которых делаются выводы о качестве выполненных измерений. В дальнейшем полученное геометрическое построение уравнивается свободно без фиксации каких-либо пунктов сети. В результате такого уравнивания, с одной стороны, вторично проверяется качество выполненных измерений, а с другой стороны, определяются такие геометрические элементы сети как длины линий и превышения между пунктами сети. С использованием этих данных выбирается пара пунктов ГГС, взаимное положение которых не претерпело изменений.

На втором этапе уравнивания определяются координаты всех остальных пунктов деформационной сети от исходных условно-неподвижных пунктов. По изменениям пространственных координат пунктов вычисляются величины и направления векторов горизонтальных и вертикальных смещений.

- **Результаты камеральной обработки наблюдений**

В результате камеральной обработки спутниковых данных, полученных в процессе производства полевых геодезических работ, формируется каталог координат, каталог длин линий и превышений между пунктами геодинамического полигона.

Для анализа геомеханических и геодинамических процессов, сопровождающих эксплуатацию лицензионных участков месторождения, наблюдательная сеть реперов разбивается в систему треугольников разных размеров и разных сочетаний пунктов, по которым с помощью математического аппарата определяются величины и направления главных линейных деформаций «растяжение–сжатие» в горизонтальной плоскости, т. е. полный тензор деформации, наклонов в вертикальной. По ним отстраиваются соответствующие схемы и карты, горизонтальных и вертикальных смещений и деформаций.

- **Графическое представление**

Запроектированная конструкция геодинамического полигона позволяет одновременно рассматривать геометрию наблюдательной станции как площадную, и как линейную. Поэтому деформации территории, подверженной негативному влиянию добычи газа, могут быть представлены по-разному: либо в виде графиков по профильным линиям, либо в площадном представлении, в виде изолиний.

Результаты измерений хранятся и выдаются в цифровом формате ГИС, в графическом и табличном виде на бумажных носителях информации и в электронном виде.

- **Анализ и прогноз развития деформационных процессов и негативных явлений**

Оценка текущего состояния и прогноз безопасности дальнейшей разработки

Сопоставление координат пунктов, длин и превышений между ними за различные промежутки времени дает информацию об изменениях деформационного поля на экспериментальном участке. По величине и пространственному направлению вектора полных смещений определяются закономерности деформирования массива и потенциальная опасность отдельных его участков. Проектируемая конструкция наблюдательной станции позволит также получить данные об изменении напряженно-деформированного состояния массива как на больших базах, так и на локальных участках массива.

Площадное распределение реперов наблюдательной станции также позволяет по величинам фактических деформаций и их ориентации в пространстве вычислить компоненты тензоров напряжений, вызвавших эти деформации, и их пространственную ориентировку. Полученные величины векторов смещений, значения деформаций и компоненты тензоров напряжений в дальнейшем используются для оценки состояния деформируемой территории и расположенных на них охраняемых объектов.

Уровень негативного воздействия отбора флюидов и газа и проведения мероприятий по поддержанию пластового давления и нефтеотдачи на состояние сооружений и природных объектов оценивается путем сопоставления фактически измеренных деформаций и их распределения по территории с критериями допустимых деформаций. Скорости развития деформационных процессов дают возможность осуществить прогноз на последующие периоды разработки.

- **Предложения по необходимым мерам охраны**

Меры охраны объектов от вредного влияния работ по недропользованию должны быть выбраны и отражены в специальном разделе отчета о проведении мониторинга геомеханических и геодинамических процессов.

Меры охраны должны быть экономически и технически целесообразными и обеспечивать:

- а) безопасность людей, находящихся в местах расположения охраняемых объектов, занятых на их эксплуатации или проживающих в них;
- б) сохранность объектов, возможность их постоянной эксплуатации;
- в) недопущение неоправданного преждевременного сноса или переноса сооружений.

Мерами охраны объектов от вредного влияния работ по недропользованию являются:

- а) конструктивные меры, позволяющие сохранить постоянно или продлить срок эксплуатации сооружений при деформациях основания, превышающих критические значения (разделение здания деформационными швами, усиление несущих конструкций, установка компенсаторов и др.)
- б) проведение ремонтно-восстановительных работ (выравнивание крена и подъем наиболее просевших частей здания, выравнивание крена опор ЛЭП и другие работы по приведению объектов в состояние, удовлетворяющие требованиям технической документации);
- в) временное изменение характера эксплуатации деформирующегося объекта;
- г) перемещение объекта на другие участки.

Выбор и применение мер охраны осуществляется на основе фактических достигнутых деформаций фундамента и прогнозе дальнейшего развития деформационных процессов.

Таким образом, использование в учебном процессе результатов настоящей НИР может быть реализовано путем корректировки учебных программ по дисциплинам; введения в блок «Дополнительное факультативное образование» спецкурсов и факультативов; создания новых дисциплин по выбору по ряду технологических специальностей или специализаций; внедрения результатов исследований в качестве методических элементов при выполнении курсовых проектов; использования полученных материалов в качестве методических указаний по дипломному проектированию при выполнении студентами специальных частей дипломных проектов.

Наиболее эффективным и быстрым способом внедрения результатов работ в учебный процесс, по нашему мнению, является выполнение реальных дипломных проектов по заказам предприятий, проектных или научно-исследовательских институтов.

Результаты научных исследований, полученные в ходе выполнения НИР, используются в образовательном процессе в виде курса профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов предприятий по направлению «Снижение риска природно-техногенных катастроф при недропользовании».

В научно – методическом плане, обеспечивающем повышение эффективности работ по предотвращению аварийных ситуаций при недропользовании, результаты исследований в области геомеханики внедрены в «Методические указания по проведению мониторинга на геодинамических полигонах при эксплуатации месторождений нефти и газа».

4 Опытнo-промышленная проверка технологии мониторинга деформационных процессов на горных предприятиях

4.1 Проведение мониторинга с использованием комплексов спутниковой геодезии на Высокогорском ГОКе

Высокогорское месторождение является крупнейшим железорудным месторождением Урала. За трехсотлетний период разработки месторождения горные работы достигли глубины 750 метров и ведутся в черте города Нижний Тагил. Территория Высокогорского месторождения представляет собой сложный комплекс техногенного ландшафта, созданного добычей железной руды открытым и подземным способами (рис. 29). Основные техногенные объекты месторождения, участвующие в формировании напряженно-деформированного состояния породного массива на участке ведения современных горных работ, занимают территорию более 200 гектар [67].

В геологическом отношении Высокогорское месторождение включает два пояса оруденения – Западный и Восточный, отличающиеся по условиям залегания и формам рудных тел. Рудные тела залегают согласно с вмещающими породами, их выклинивание по падению и простиранию постепенное.

В структурно-геологическом формировании месторождения большую роль играют тектонические нарушения. Сместителями I порядка – сбросо-сдвигом «Главным», взбросо-сдвигом «Средним» и сбросом «Диагональным» месторождение разбито на три крупных тектонических блока (рис. 30). Их границы устанавливаются по резкому обрезанию сместителями рудно-скарновых зон и залегающих в них рудных тел. Структура крупных тектонических блоков значительно усложняется многочисленными нарушениями II и III порядков, которые создают мелкоблоковую структуру месторождения [68].

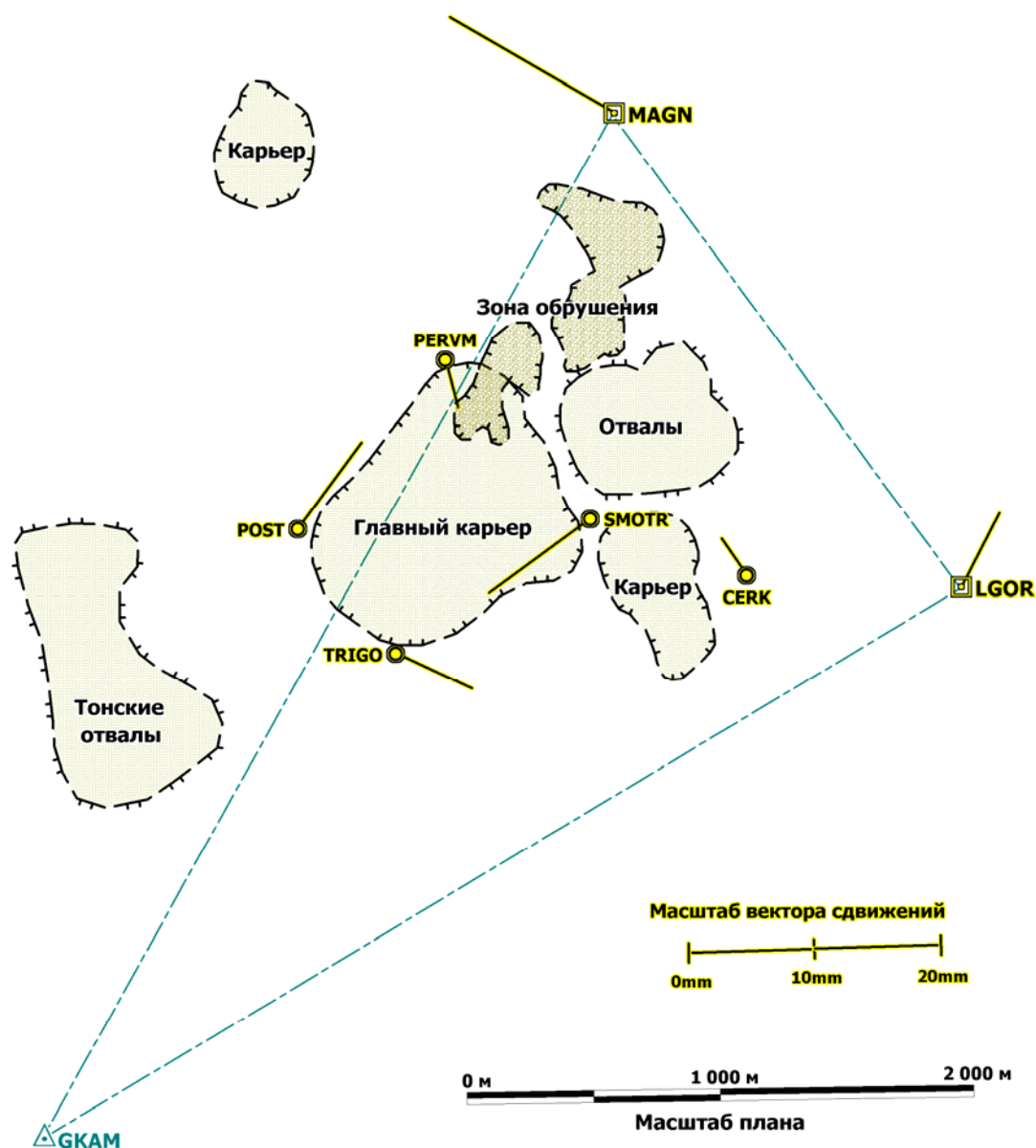


Рисунок 29 – Вектора смещений реперов наблюдательной станции

Таким образом, сочетание сложных горно-геологических условий с накопившимся техногенным воздействием в условиях развивающейся урбанизации территории породили сложнейший узел геомеханических проблем, игнорирование которых может повлечь природно-техногенные катастрофы с тяжелыми экономическими последствиями.

Мониторинг геомеханических процессов в геологической среде Высокогорского месторождения и изучение их влияния на безопасность горных работ, объектов инфраструктуры и населения г. Нижний Тагил осуществляется на основе натурных геодезических измерений с 1957 года. До 2001 года измерения на наблюдательной станции

производились с использованием традиционной методики измерений – по 11 профильным линиям, заложенным в мульде сдвижения в лежащем и висячем боках месторождения. Начиная с 2001 года инструментальные наблюдения стали производиться одновременно по двум методикам – традиционной, обеспечивающей определение деформаций в направлении профильной линии с получение угловых параметров процесса сдвижения и по площадной наблюдательной станции, обеспечивающей определение параметров объемного тензора деформаций.

На Выкоггорском месторождении мониторинг процесса сдвижения проводится во внутренней зоне деформирования – мульде сдвижения, в которой находится множество охраняемых объектов I-III категории охраны – сооружения промплощадки, в том числе подъемные стволы, железная дорога, территория завода ВМЗ и 3 – 5- этажные жилые дома (рис. 30) [68].

При мониторинге процесса сдвижения в качестве условно-стабильных базисов сети используются пункты ГГС, расположенные все зоны влияния горных разработок, в 3-5 км от зоны обрушения [48, 49]. Эти пункты используются, с одной стороны, для изучения общей геодинамической обстановки в г. Нижний Тагил на больших пространственно-временных базах, а с другой стороны, являются основой для развития деформационной геодезической сети.

В результате выполнения геодезических работ с использованием комплексов спутниковой геодезии GPS по переопределению пространственных координат опорных реперов наблюдательной станции, расположенных в непосредственной близости от источников техногенных нагрузок – карьеров, отвалов и выходов зоны обрушения на земную поверхность (рис. 30), определяются их полные вектора сдвижений.

Опорные репера площадной наблюдательной станции, в свою очередь, являются геодезической основой для определения координат рабочих реперов наблюдательной станции более низкого иерархического уровня.

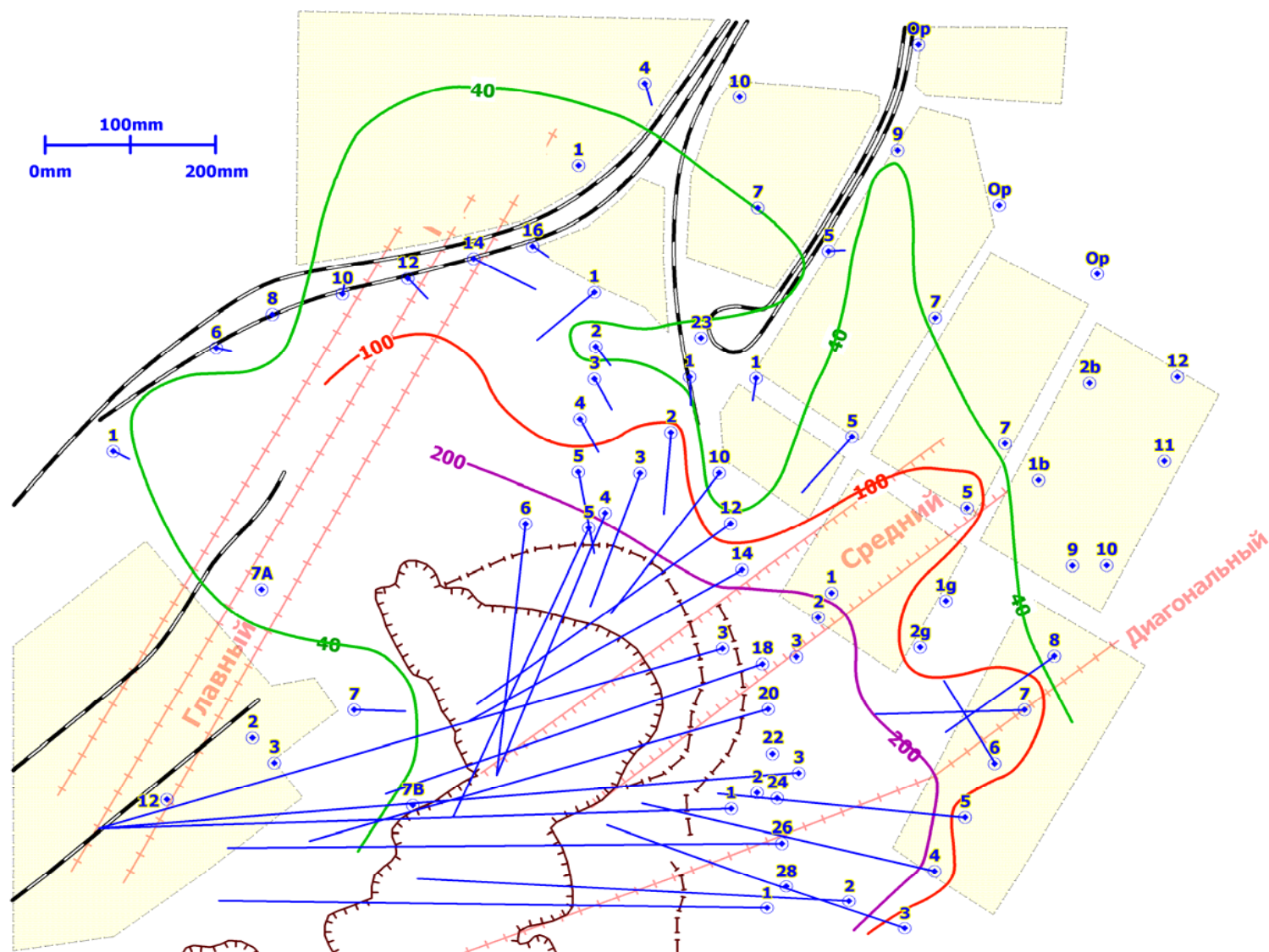


Рисунок 30 – Вектора горизонтальных и изолинии вертикальных сдвижений во внутренней области деформирования на Высокогорском месторождении

Координирование рабочих реперов площадной наблюдательной станции производится по методике полевых и камеральных работ, изложенной во 2 разделе данной работы. Путем комбинации реперов площадной станции в базовые треугольные элементы определяются тензоры деформаций на различных пространственно-временных базах. Конструкция и геометрические параметры наблюдательной станции, заложенной в мульде сдвижения Высокогорского месторождения, позволяет определять параметры тензора деформаций на базах от 50 до 500 метров (рис. 30).

Поскольку предложенная для исследования процесса сдвижения площадная наблюдательная станция базировалась на реперах традиционной наблюдательной станции, наблюдения по которой до настоящего времени дублируются с использованием линейного принципа измерений, результаты инструментальных наблюдений, полученные с применением различных методик измерений, были сопоставлены для общих интервалов. Сопоставлению подвергались интервалы длиной 50-100 метров, измеренные непосредственно с использованием электронного тахеометра (светодальномера) и двухчастотных GPS-приемников. Расхождения горизонтальных проложений, полученных разными способами, составили 1:50000 – 1:25000, что удовлетворяет требованиям нормативных документов.

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 для исследования процесса сдвижения на Высокогорском месторождении позволило провести сравнительный анализ условий их применения, выявить преимущества и недостатки разработанной методики определения трехмерных векторов сдвижения площадной наблюдательной станции перед существующей традиционной методикой. Эти преимущества заключаются в возможности получения объемных параметров тензора деформаций в условиях ограниченной прямой оптической видимости между соседними реперами наблюдательной станции с необходимым уровнем точности.

4.2 Проведение объемного лазерного сканирования объектов на деформированных территориях горных предприятий

В качестве экспериментального объекта выбрано здание травматологии в городе Нижний Тагил. Центральная его часть двухэтажная, крылья – одноэтажные. В плане имеет относительно несложную форму (рис. 31). Строение достигает около 75 м в длину. Здание больницы было построено в середине 1950-х годов и находится в зоне негативного влияния подземных горных работ приблизительно с 1960 г. Больница расположена длинной осью вдоль простирания рудных тел, а короткой – вкрест. Кроме влияния на здание горных работ, в центральной части его пересекает одно из трех главных тектонических нарушений Высокогорского месторождения – взбросо-сдвиг «Средний», который проявляет постоянную геодинамическую активность, как в подземных выработках, так и на поверхности.

Травматология оборудована тремя реперами для наблюдения за оседанием здания (рис. 31). При этом деформации здания, определенные традиционным методом (нивелирование), близки к нулю, из-за равномерного оседания реперов, расположенных в разных частях здания. Несмотря на это, здание претерпевает активное трещинообразование, которое сопровождается периодическим отпадением от стен и потолков штукатурки. Таким образом, инструментальные наблюдения свидетельствуют о низком уровне деформаций, в то время как визуальные – о высоком.

Вокруг здания были заложены 7 наблюдательных реперов, которые были использованы как точки стояния сканера (рис. 32). Наблюдательные реперы были привязаны к реперам G1 и G2 основной наблюдательной станции г. Нижний Тагил, которые выступили в качестве опорных. Такая конфигурация наблюдательной станции выбрана с учетом конструктивных особенностей здания и топографических условий местности. Конструкция наблюдательной станции обеспечивает видимость с каждого репера станции на предыдущий и последующий.

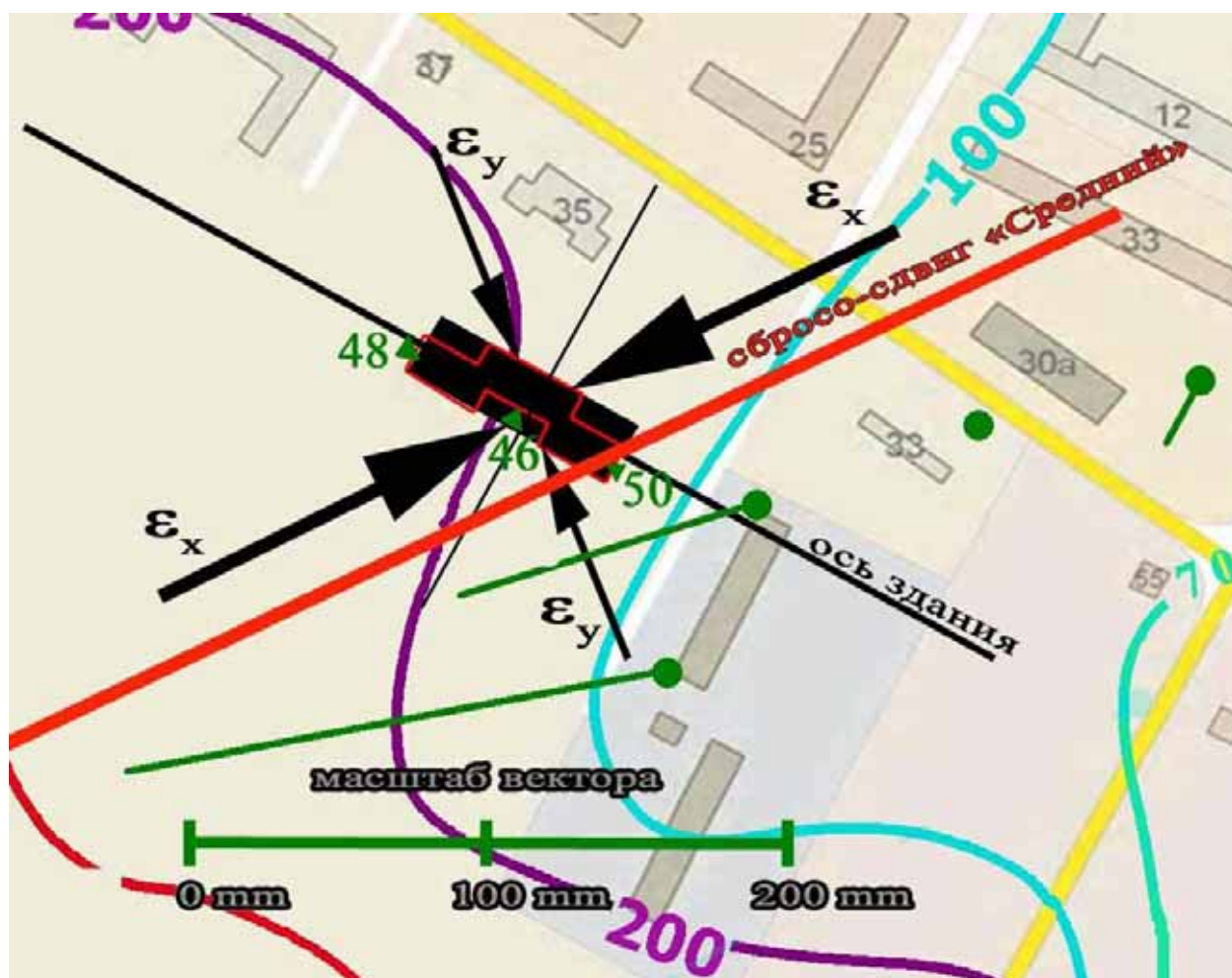


Рисунок 31. Схема главных деформаций, расположения здания, тектонического нарушения и реперов наблюдательной станции с нанесенными изолиниями оседаний поверхности, векторами сдвижения реперов

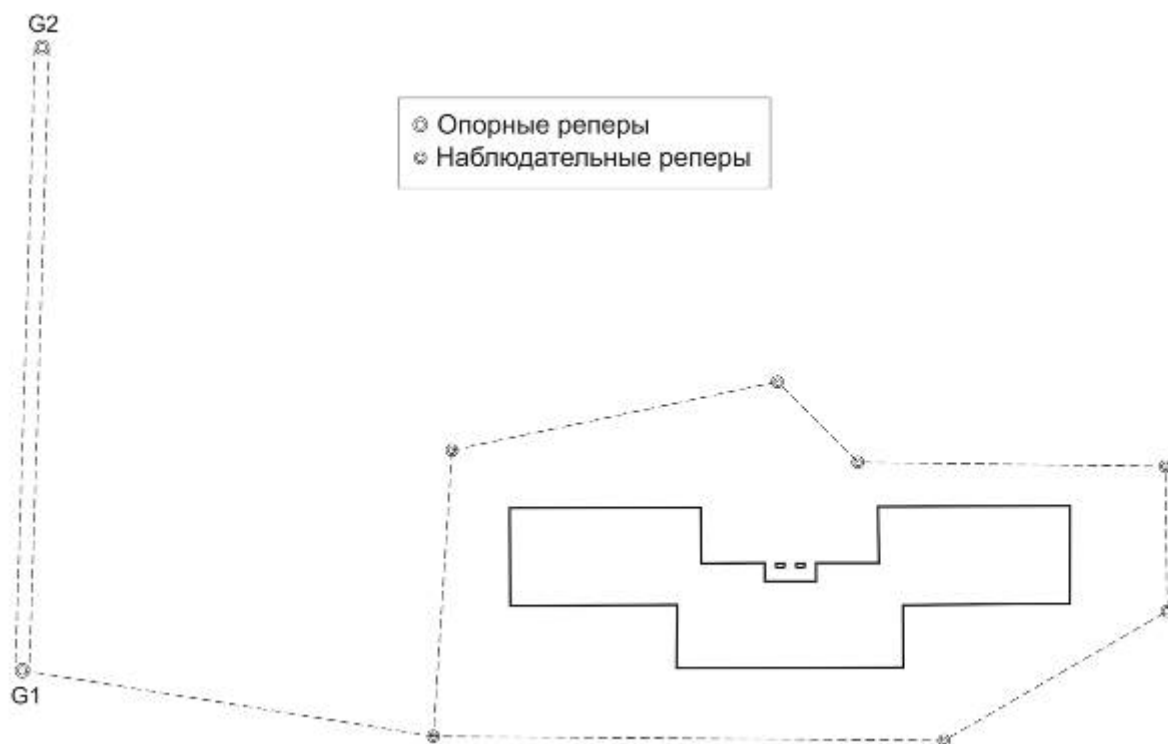


Рисунок 32. Наблюдательная станция вокруг здания травматологии

После рекогносцировки местности и закладки наблюдательных реперов вокруг здания был проложен тахеометрический ход, с помощью которого была выполнена привязка наблюдательных реперов станции к опорным G1 и G2, которые, в свою очередь, были закоординированы с помощью GPS-приемников.

После этого по зданию были равномерно распределены специальные сферические марки, которые затем были использованы для сшивки сканов, выполненных с разных точек стояния. Данные марки располагались в областях перекрытия смежных сканов, и их геометрические центры выступали в роли связующих точек. Для каждой пары соседних сканов использовалось не менее трех сферических марок.

Далее сканер поочередно устанавливался над каждым репером, тщательно центрировался и горизонтировался, после чего выполнялось сканирование части здания, попадающей в поле зрения сканера. Специальные сферические марки сканировались отдельно с высоким разрешением, чтобы максимально точно определить их геометрические центры. Кроме того, с высоким разрешением сканировались трещины в здании, что обеспечит при выполнении последующей серии наблюдений возможность контроля их роста и раскрытия. В целях экономии времени стены здания сканировались с меньшим разрешением.

На первом этапе камеральной обработки была произведена чистка полученных сканов – удаление лишних объектов, шумов и т.п.

Далее было выполнено объединение сканов, полученных с разных станций, т.е. их сшивка, которая производилась с помощью специальных сферических марок. Для каждой пары связующих марок была вычислена ошибка их совмещения: максимальная ошибка сшивки составила 34 мм, минимальная – 1 мм. Средняя ошибка для всех пар сферических марок составила 8 мм, причем для 79% точек ошибка составила от 1 до 9 мм, а для 62% точек – не превысила 5 мм.

После сшивки сканов и обработки облака точек путем аппроксимации наружных стен вертикальными плоскостями построена трехмерная модель здания (рис. 33).

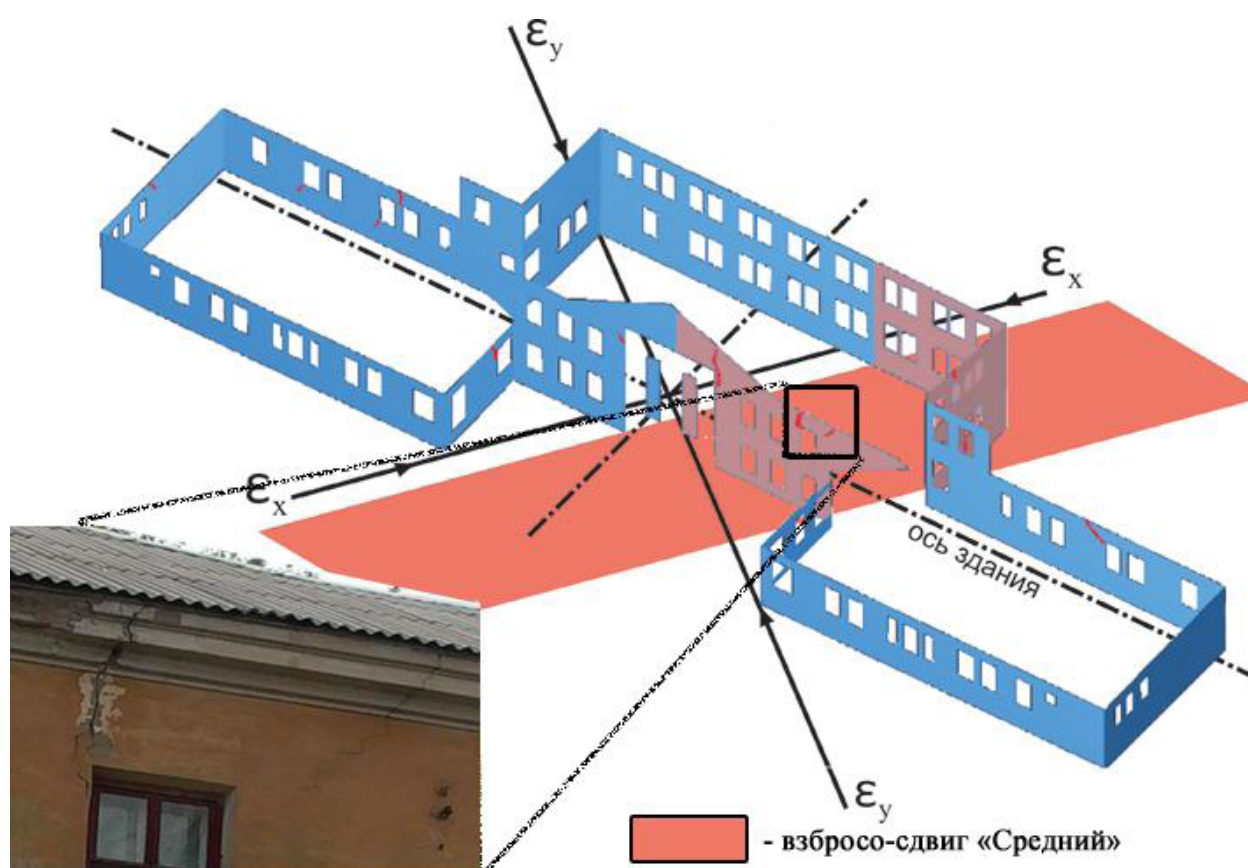


Рисунок 33. Трехмерная модель внешних стен здания и распределение трещин

Кроме того, в левое крыло здания была вписана эталонная плоскость и построена проекция левого и правого крыльев здания на эту плоскость. Это позволило наглядно продемонстрировать отклонение стен от эталонной плоскости с помощью цветовой градации (рис. 34). Также по облаку точек был построен горизонтальный разрез крыльев здания, совмещенный с цветовой картой отклонений.

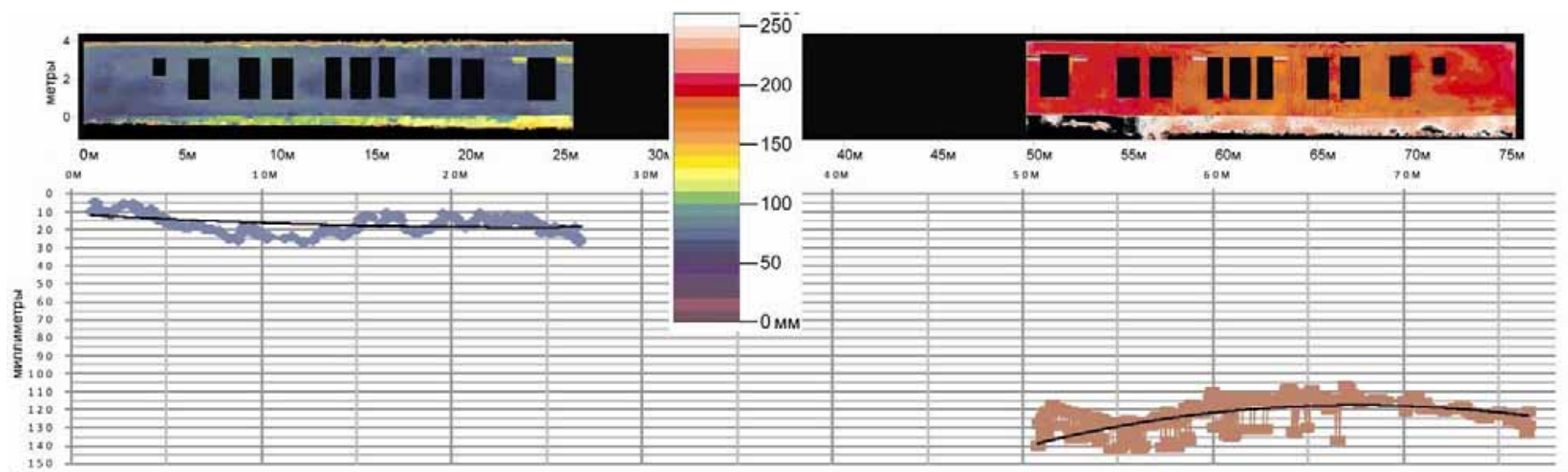


Рисунок 34. Градиентное отражение неровности стен крыльев здания и графики их смещения в горизонтальной плоскости относительно эталонной вертикальной плоскости

В результате была построена модель здания, на которой отражены трещины, раскрытие которых превышает 10 мм (рис. 33). Установлено, что большая часть трещин, причем наибольшего раскрытия, концентрируются в центральной двухэтажной части. Объединение отдельных трещин в область позволило обрисовать зону, совпадающую с направлением и местом залегания взбросо-сдвига «Средний» (Рис. 31).

Графики и карта отклонений (рис. 34) показывают, что крылья здания имеют как собственную кривизну, так и смещены относительно друг друга. Неровность крыльев в вертикальной плоскости отражает верхняя часть рисунка 34, а в горизонтальной плоскости – нижняя, где точки крыла, попавшие на горизонтальную плоскость, аппроксимированы кривой. Кривые крыльев здания имеют выпуклый вид – правое и вогнутый – левое крыло.

Смещение правого крыла относительно левого в разных точках составляет 90-110 мм. Сопоставимую величину горизонтального смещения (150 мм) имеют два репера (рис. 31), расположенные на том же крыле взбросо-сдвига «Средний», что и правое крыло здания. Удаление этих реперов от здания составляет 50 и 70 м, что говорит о корреляции смещений крыла здания, измеренных методом лазерного сканирования, и смещений грунтовых реперов, измеренных методом спутниковой геодезии. Следовательно, бóльшую, чем горные работы нагрузку на здание оказывает неравномерность движений крыльев взбросо-сдвига, которая реализуется в форме сдвига одной части здания относительно другой в горизонтальной плоскости в среднем на 100 мм. Принимая во внимание направление векторов сдвижения грунтовых реперов, становится очевидным, что направление главных деформаций ϵ_x и ϵ_y в районе здания травматологии расположено под углом к осям здания (рис. 31), что и обусловило неэффективность традиционного метода наблюдений.

Таким образом, одна лазерная съемка сложно- или аномально-деформирующегося объекта позволяет определить ориентировку главных деформаций, то есть, мониторинг зданий и сооружений сканером дает возможность использовать их в качестве «маяков» и индикаторов, характеризующих направление главных деформаций, их величину и участки реализации в виде трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шестой, заключительный этап работы посвящен разработке инновационной технологии мониторинга процессов деформирования территорий и объектов в районах ведения горных работ с использованием технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования. На этом этапе, в соответствии с календарным планом, получены следующие результаты:

1. Разработаны концептуальные положения мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых:

- Установлено, что проблема сдвижения массива горных пород и земной поверхности под влиянием горных разработок приобретает все более высокую актуальность в связи с тем, что при увеличении масштабов горного производства в область вредного влияния горных разработок попадает все большее количество охраняемых объектов. При этом уровень смещений земной поверхности от воздействия техногенных факторов сопоставим с величинами смещений, фиксируемыми на территориях происшедших крупных землетрясений.

- Показано, что техногенное воздействие горных разработок вносит серьезные изменения в напряженно-деформированное состояние больших участков земной коры и может послужить причиной геодинамических явлений с катастрофическими последствиями. Исследование закономерностей развития деформационных процессов в земной коре под влиянием добычи полезных ископаемых весьма актуально в прикладной сфере для обеспечения экологической безопасности при освоении недр.

- Обосновано, что методология проведения инструментальных измерений отстает от современных теоретических представлений, основанных на закономерностях формирования анизотропного напряженно-деформированного состояния в иерархически-блочном породном массиве и численных методах моделирования. Это приводит к тому, что данные, получаемые с использованием методов инструментальных исследований, не обеспечивают полноты данных о процессе сдвижения.

- Выявлено, что особенности возникновения и развития процесса сдвижения при разработке рудного месторождения определяются группами факторов, характеризующих свойства массива горных пород, его напряженное состояние и геометрические параметры разрабатываемого месторождения. Геомеханическая модель месторождения состоит из двух специфичных областей деформирования – внутренней, образованной воздействием уравновешенной системы сил, и внешней, образованной за счет перемещения масс

добываемого полезного ископаемого, добычи и складирования в отвалы вскрышных пород, а также откачки подземных вод.

- Показано, что сфера недропользования включает весь спектр человеческой деятельности, связанный с использованием массива горных пород и его земной поверхности. При этом объектом недропользования является любое сооружение, непосредственно контактирующее с горным массивом, размещённое на его дневной поверхности, а также частично или полностью находящиеся в горном массиве.

2. Разработан регламент проведения мониторинга деформационных процессов в районах ведения горных работ:

- Показано, что целью ведения инструментального мониторинга геомеханического состояния породного массива является информационное обеспечение органов управления государственным фондом недр, надзорных органов и недропользователя о состоянии геологической среды и развивающихся в ней процессов и явлений в период недропользования. Федеральным Законом «О недрах» предписывается проведение комплекса геологических и иных наблюдений, достаточных для обеспечения нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций, своевременное определение и нанесение на планы горных работ опасных зон.

- Обосновано, что принятый метод инструментальных измерений спутниковой геодезии GPS позволяет определять полные пространственные координаты реперов наблюдательной станции на различные эпохи измерений, смещения реперов между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного тензора деформаций.

- Показано, что использование комплексов спутниковой геодезии для исследования процесса сдвижения на горных предприятиях является оправданным, поскольку по критерию допустимых погрешностей результатов измерений они удовлетворяют требованиям действующей нормативной документации.

- Установлено, что основным недостатком классических и спутниковых методов геомеханического мониторинга является дискретность полученных данных, поскольку определяются смещения только для некоторого числа точек (реперов), тогда как концентрация деформаций может происходить на узких локальных участках объекта. Использование комплексов трехмерного лазерного сканирования открывает уникальные возможности контроля и мониторинга состояния зданий и сооружений, расположенных на подработанных территориях.

- Обосновано, что принятый метод инструментальных измерений объемного лазерного сканирования позволяет определять полные трехмерные модели исследуемых объектов с высокой точностью, необходимой для определения смещений облаков точек между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного деформирования. При этом определения деформаций производятся дистанционно, при этом не требуется нахождение персонала непосредственно вблизи исследуемого объекта.

3. Разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс:

- Показано, что использование в учебном процессе результатов настоящей НИР может быть реализовано путем корректировки учебных программ по дисциплинам; введения в блок «Дополнительное факультативное образование» спецкурсов и факультативов; создания новых дисциплин по выбору по ряду технологических специальностей или специализаций; внедрения результатов исследований в качестве методических элементов при выполнении курсовых проектов; использования полученных материалов в качестве методических указаний по дипломному проектированию при выполнении студентами специальных частей дипломных проектов.

- Результаты научных исследований, полученные в ходе выполнения НИР, используются в образовательном процессе в виде курса профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов предприятий по направлению «Снижение риска природно-техногенных катастроф при недропользовании».

- В научно – методическом плане, обеспечивающем повышение эффективности работ по предотвращению аварийных ситуаций при недропользовании, результаты исследований в области геомеханики внедрены в «Методические указания по проведению мониторинга на геодинамических полигонах при эксплуатации месторождений нефти и газа».

4. Проведена опытно-промышленная проверка разработанной инновационной технологии мониторинга деформационных процессов на горных предприятиях. Проведен мониторинг с использованием комплексов спутниковой геодезии на Высокогорском ГОКе по площадной наблюдательной станции, расположенной в области негативного влияния горных работ. Там же объемная лазерная съемка сложно- или аномально-деформирующегося объекта позволила определить ориентировку осей главных деформаций, а также оценить текущее состояние деформирующегося объекта – здания травматологии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 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.
- 2 Кузнецов М.А., Акимов А.Г., Кузьмин В.И., Пантелеев М.Г., Чернышев М.Ф. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях. - М.: Недра, 1971. - 224 с.
- 3 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.
- 4 Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне: Утв. Минчермет СССР 08.07.7. - Л.: ВНИМИ, 1975. - 67 с.
- 5 Методические указания по определению параметров процесса сдвижения горных пород, охране сооружений и горных выработок на месторождениях цветных металлов. - Л.: ВНИМИ, 1974. - 66 с.
- 6 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. - Л.: ВНИМИ, 1986 - 74 с.
- 7 Руководство по расчету и проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. - М.: Стройиздат, 1977. - 141 с.
- 8 Sashourin A.D. Formation of centres of technogeneous catastrophes in area of intense mineral mining //Mining in the Arctic, Trondheim, Norway, 1996, P.201-206.
- 9 Сашурин А.Д. Явления изостазии при разработке месторождений полезных ископаемых //Приложение результатов исследования полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. –Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1985. –С.27-31.
- 10 Николаев Н.И. О применении исторических, археологических и палеосейсмических методов при изучении исторических проявлений землетрясений //Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. Наука, М.: 1977. –С.1979-182.
- 11 Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. –М.: Наука, 1955

- 12 Королев В.И. Упруго-пластические деформации оболочек. –М.: Машиностроение, 1971.
- 13 Sashourin A.D. On the parameteres of the first invariant of the stress state in the upper part of the earth crust: The 1-st/ International Seminar “Stresses in the lithospere (global, regional, local)”. Abstract of papers, Moskow, 1994, P.162.
- 14 Rikitake T. Prediction of earthquakes. Translation from English, Moskow, “Mir” publishing house, 1979.
- 15 Авершин С. Г. Обработка и использование результатов наблюдений за сдвижением поверхности – М.: Гостоптехиздат, 1941. – 225 с.
- 16 Турчанинов И. А. Основы механики горных пород. - Л.: Недра, 1989.- 488 с.
- 17 Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. - М.: Недра, 1988. - 271 с.
- 18 Руппенейт К. В. Деформируемость массивов трещиноватых пород. – М.: Недра, 1975. - 223 с.
- 19 Сашурин А. Д. Геомеханические модели и методы расчета сдвижения горных пород при разработке месторождений в скальных массивах: дис. ... д-ра техн. наук; ИГД УрО РАН. –Екатеринбург, 1995. – 357 с.
- 20 Боликов В. Е. Создание методов обеспечения устойчивости горных выработок рудников в условиях формирующегося поля напряжений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук; ИГД УрО РАН. – Тула, 1998. –45 с.
- 21 Сашурин А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 262 с.
- 22 Панжин А. А. GPS-технологии в геодезическом мониторинге НДС техногенного участка // Геомеханика в горном деле: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. –1999. – С. 68 – 85.
- 23 Панжин А. А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS // Геомеханика в горном деле – 2000: докл. междунар. конф. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000. – С. 320 - 324.
- 24 Панжин А. А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий // Горный информ.-аналит. бюл. – 2003. - № 7. – С. 34 – 38.

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

26 Сашурин А. Д. Явления изостазии при разработке месторождений полезных ископаемых // Приложение результатов исследования полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии: сб. ст./ ГоИ КФ АН СССР. – Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1985. – С. 27 - 31..

27 Сашурин А. Д. Наведенные геомеханические процессы от масштабной техногенной деятельности по добыче полезных ископаемых. // Межотраслевое координационное совещание по проблемам геодинамической безопасности, X: материалы. - Екатеринбург: УГГГА, 1997. - С. 155 – 158.

28 Сашурин А. Д. Геомеханическая модель литосферы, подверженной воздействию от разработки месторождений полезных ископаемых // Управление напряженно-деформированным состоянием массива скальных пород при разработке месторождений полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений: Междунар. конф. Геомеханика в горном деле – 96: тез. докл./ ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. - С. 29 – 30.

29 Сашурин А. Д. Масштабное техногенное воздействие горных разработок на участок литосферы // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): докл. междунар. конф.: в 4т: т.1. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1998. - С 170 – 178.

30 Sashourin A. D. Formation of Centers of Technogeneous Catastrophes in Area of Intense Mineral Mining // Mining in the Arctic: Proceedings of the Fourth international symposium, Longyearbyen, Svalbard, Norway. - Trondheim; SINTEF Rock and Mineral Engineering, 1996. - P. 201 - 206.

31 Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород. – М.: Наука, 1975. – 212 с.

32 Ржевский В. В. Основы физики горных пород: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1978. - 390 с.

33 Панжина Н. А. Роль дискретности деформирования в охране подрабатываемых сооружений // Геомеханика в горном деле: сб. науч. тр. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. - С. 187 – 195.

34 Кашкаров А. А. Геоэлектрический контроль геомеханических явлений // Маркшейдерский вестник. – 1998. - № 2(24). - С. 17 – 20.

- 35 Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. – М.: Недра, 1994. – 207 с.
- 36 Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при поземной разработке рудных месторождений / утв. Госгортехнадзором СССР 03.07.86. - М.: Недра, 1988. – 111 с.
- 37 Панжин А. А. Состояние выработанного пространства и подработанной толщи шахты Молодежной // 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.
- 38 Панжин А. А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях // Горный информ.-аналит. бюл. – 2007. - № 3. – С. 171 – 183.
- 39 Панжин А. А. Геомеханическое обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений в области влияния горных работ // Горный информ.-аналит. бюл. – 2004. - № 6. – С. 179 – 184.
- 40 Исследование характера деформаций обводненной толщи пород и разработка мероприятий по обеспечению сохранности стволов и сооружений подъемного комплекса Соколовского подземного рудника: отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР; рук. Беркутов В. А. - Свердловск, 1981. – 111 с.
- 41 Панжин А. А. Экспериментальные исследования масштабного техногенного воздействия горных разработок на участок литосферы // Третья уральская молодежная школа по геофизике: сб. докл. -Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - С. 78 - 81.
- 42 Панжин А. А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии // Геодинамика – напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф./ ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001. – С. 158 – 162.
- 43 Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана: утв. Минметом СССР 02.08.90. – Свердловск: ИГД Минмета СССР, 1990. – 64 с.
- 44 Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. – М.: Наука, 1955. – 379с.
- 45 Королев В. И. Упруго-пластические деформации оболочек. – М.: Машиностроение, 1971. – 124 с.

46 Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Основные решения. Плоская теория упругости. Кручение и изгиб. – М.: Наука, 1966. – 417 с.

47 Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1961. – 521 с.

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

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

50 Методические рекомендации к экспериментально-аналитическим измерениям напряжений на больших участках горного массива / сост. А. Д. Сашурин и др. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1977. – 37 с.

51 Панжин А. А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий на горных предприятиях и урбанизированных территориях // Состояние и перспективы развития маркшейдерского дела на Урале: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Д. Н. Оглоблина / УГГУ. – Екатеринбург, 2005. – 102 – 119.

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

53 Инструкция по производству маркшейдерских работ. РД 07-603-03. Выпуск 15 Охрана недр и геологический контроль. Серия 07. Нормативные документы по вопросам охраны недр и геолого-маркшейдерского контроля. Госгортехнадзор России. М., 2003. 117 с.

54 Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей СССР (ГКИНП-07-016-91). М., ЦНИИГА-иК, 1991, 127с.

55 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов Утв. Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР 20.03. 88. М., «Недра» 1990, 174с.

56 Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений /МЦМ СССР. Горное управление: Введ. 03.07.86. – Разраб. ВНИМИ, НИПИгорцветмет. – М.: Недра. 1988.

57 Ашихмин С.Г. Научные основы методов прогноза напряженно-деформированного состояния месторождений газа. Диссертация доктора наук. Пермь 2008 г. 315 с.

58 Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения. Л., 1986. 76 с. (М-во угольной промышленности СССР. ВНИМИ).

59 Правила по технике безопасности на топографо-геодезических работах. ПТБ-88 (утв. Коллегией ГУГК СССР 09.02.1989 № 2/21)

60 Инструкции о порядке контроля и приемки топографо-геодезических и картографических работ. ГКИНП (ГНТА) – 17-004-99.

61 Захаров А. И. Геодезические приборы: справочник. – М.: Недра, 1989. – 314 с.

62 Генике А. А. Глобальная система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. – М.: Геотехиздат, 1999. - 272 с

63 Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: т 1. / К. М. Антонович. - М.: Картоцентр, Новосибирск: Наука, 2005. – 334 с.

64 Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: т. 2. / К. М. Антонович. - М.: Картоцентр, Новосибирск: Наука, 2006. – 360 с.

65 Unguendoli M. A Rational approach to the use of a large number of GPS Receivers // Bulletin Geodesique.- 1990. - № 64(4). – P. 38 – 47.

66 Frei E., G. Beutler. Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach: the alternative to kinematic positioning. Proc. Second Int. Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System, Ottawa, Canada. September 3-7. 1990. – P. 53 – 68.

67 Мониторинг сдвижений и деформаций земной поверхности и разработка рекомендаций по безопасной эксплуатации объектов в зоне вредного воздействия подземных разработок на месторождениях ВГОКа: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин. – Екатеринбург, 2001. – 161 с.

68 Исследование влияния геодинамической активности основных тектонических нарушений на развитие геомеханических процессов при разработке Высокогорского месторождения: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин. – Екатеринбург, 2004. – 233 с.

ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (по шести этапам)

В ходе проведения исследований в рамках темы: «Исследование и разработка инновационных технологий спутниковой геодезии и объемного лазерного сканирования для мониторинга деформационных процессов территорий и объектов в районах добычи полезных ископаемых» получены следующие научные результаты.

В области исследования и моделирования геодинамических процессов, сопровождающих разработку полезных ископаемых:

1. Показано, что современные методы исследования и прогноза процесса сдвижения, позволяют решить ряд проблем, но далеко не полный их спектр, который присутствует на подработанных площадях. Прогноз параметров процесса сдвижения после окончания горных работ крайне сложен и на сегодняшний день не имеет теоретически обоснованных решений. Для оценки безопасности территории необходимы натурные исследования подработанного массива, что является гарантом правильности принятых решений. На основе натурных инструментальных исследований состояния процесса сдвижения создается геомеханическая модель современной стадии развития опасных процессов.

2. Установлено, что геомеханическая модель разрабатываемого месторождения состоит из двух специфичных областей деформирования – внутренней, образованной воздействием уравновешенной системы сил, возникающей по контурам выработанных пространств и зон обрушений, и внешней, образованной за счет перемещения масс добываемого полезного ископаемого, добычи и складирования в отвалы вскрышных пород, а также откачки подземных вод. 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. Геометрические параметры модели сдвижения горных пород определяются, с одной стороны, существующими представлениями о строении верхней части земной коры, а с другой – размерами, формой и взаимным расположением техногенных объектов. При этом их реальные границы заменяются правильными геометрическими фигурами, а техногенные нагрузки внутри объекта распределяются по определенным математическим законам.

3. Выявлены основные факторы, определяющие развитие деформационных процессов массива горных пород земной поверхности. Установлены общность и специфика деформационных процессов в зависимости от вида полезного ископаемого, параметров залегания рудных тел, систем разработки и других факторов. В области влияния подземной разработки месторождений полезных ископаемых выделены характерные области и зоны на

земной поверхности с их спецификой проявления деформационных процессов и воздействием на подрабатываемые объекты. Обосновано применение тензорного математического описания деформационных процессов к процессам деформирования массива горных пород и земной поверхности на подработанных территориях.

В области охраны земной поверхности, зданий и сооружений от негативного влияния горных работ:

1. Установлено, что при оценке безопасности подработанных территорий, зданий и сооружений необходимо руководствоваться тем, что процесс сдвижения может на каждом отдельном участке развиваться по различным схемам, при этом параметры воронок обрушения и плавных сдвижений на поверхности могут также существенно отличаться. Схема и этап процесса сдвижения определяются геометрическими параметрами развития зоны обрушения. Исходя из этого, назрела необходимость корректировки методики оценки безопасности сооружений и природных объектов в областях влияния горных разработок и разработки руководства по проведению мониторинга деформационных процессов земной поверхности методами спутниковой геодезии и охраняемых объектов методами объемного лазерного сканирования.

2. Выявлен механизм воздействия деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности на различные виды подрабатываемых объектов с учетом их конструктивных особенностей. В соответствии с механизмом воздействия процесса сдвижения на охраняемые объекты и их конструктивными особенностями, обоснованы критерии безопасности охраняемых объектов. Выделены категории допустимых и предельных деформаций, принятие в практике охраны объектов от вредного влияния подземных разработок.

В области методологии проведения инструментальных измерений при исследовании процесса сдвижения:

1. Установлено, что методология проведения инструментальных измерений отстает от современных теоретических представлений, основанных на закономерностях формирования анизотропного напряженно-деформированного состояния в иерархически-блочном породном массиве и численных методах моделирования. Это приводит к тому, что современные теоретические методы исследований опираются на экспериментальные данные, получаемые с использованием методов инструментальных исследований, не обеспечивающих полноты данных о процессе сдвижения. В результате измерений, выполняемых по традиционным методикам инструментальных исследований, информация о развитии процесса сдвижения на месторождении не в полном объеме отражает реальные геомеханические процессы, происходящие в подработанном массиве горных пород. К

настоящему времени сложилась реальная необходимость пересмотра и совершенствования методики инструментальных измерений и приведения ее в соответствие с современными теоретическими представлениями о развитии процесса сдвижения породного массива и земной поверхности.

2. Обосновано, что изучение современных движений и деформаций, происходящих в массиве, требует проведения в мониторинговом режиме высокоточных геодезических измерений смещений реперов специально оборудованных наблюдательных станций – геодинамических полигонов и использования при проведении исследований современного высокоточного и производительного геодезического оборудования.

3. Разработана новая, инновационная конструкция наблюдательной станции, основанная на площадном принципе построения, которая в отличие от традиционного, линейного, позволяет получить пространственный тензор деформаций: по двум осям деформируемой площади и в вертикальном направлении. Сформулирован основной принцип построения площадной наблюдательной станции, включающий создание системы базовых треугольных элементов – деформационных розеток с реперами в вершинах, покрывающих исследуемых участков, что обеспечивает получение необходимой информации о параметрах формирования напряженно-деформированного состояния породного массива. В площадной принцип построения наблюдательной станции изначально заложен эффективный механизм модернизации и сгущения сети путем вставки дополнительных реперов в существующую сеть с образованием новых треугольных базовых элементов. Плотность сети реперов наблюдательной станции зависит от расположения охраняемых объектов, градиентов деформирования и структуры массива горных пород.

4. Показано, что изучение деформационных процессов, происходящих на различных базах измерений – от десятков километров до нескольких метров, – позволяет получить полные пространственные вектора смещений и полные пространственные тензоры деформаций для всех иерархически-блочных уровней реального массива горных пород. Принятый метод инструментальных измерений спутниковой геодезии GPS позволяет определять полные пространственные координаты реперов наблюдательной станции на различные эпохи измерений, смещения реперов между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного тензора деформаций.

5. Обосновано, что существующий на сегодняшний день ассортимент высокоточных геодезических GPS-приемников для полевых измерений и программного обеспечения для камеральной обработки данных GPS-съемок позволяет с высокой точностью и надежностью определять пространственные координаты реперов наблюдательной станции, смещения реперов между сериями инструментальных наблюдений, что позволяет использовать их при

инструментальных исследованиях процесса сдвижения. Использование комплексов спутниковой геодезии для исследования процесса сдвижения на горных предприятиях является оправданным, поскольку по критерию допустимых погрешностей результатов измерений они удовлетворяют требованиям действующей нормативной документации. Возможное снижение точности измерений, вызванное условиями применения спутникового оборудования на горных предприятиях, надежно контролируется, поскольку контроль фактических погрешностей измерений осуществляется по трехуровневой системе в процессе камеральной обработки результатов измерений.

6. Установлено, что основным недостатком классических методов является дискретность полученных данных, поскольку определяются смещения только для некоторого числа точек (реперов), тогда как концентрация деформаций может происходить на узких локальных участках объекта. Использование комплексов трехмерного лазерного сканирования открывает уникальные возможности контроля и мониторинга состояния зданий и сооружений, расположенных на подработанных территориях. По отстроенной трехмерной модели охраняемого сооружения задаются эталонные вертикальные и горизонтальные плоскости, на которые проецируется фактическое положение конструктивных элементов здания. По математическим разностям фактической и эталонной объемных моделей здания возможно построение карт отклонения геометрических параметров здания от исходных.

7. Принятый метод инструментальных измерений объемного лазерного сканирования позволяет определять полные трехмерные модели исследуемых объектов с высокой точностью, необходимой для определения смещений облаков точек между сериями наблюдений, а по полученным величинам смещений вычислять компоненты полного пространственного деформирования. При этом определения деформаций производятся дистанционно, при этом не требуется нахождение персонала непосредственно вблизи исследуемого объекта, который может представлять опасность внезапного обрушения.

8. Показано, что одним из достоинств метода трехмерного лазерного сканирования является то, что отпадает необходимость закладки вблизи исследуемых объектов реперов долговременной сохранности, поскольку координаты пунктов сканирования определяются непосредственно во время проведения съемочных работ. Гибкость метода объемного лазерного сканирования позволяет получать универсальные трехмерные модели деформируемых объектов любой заданной конфигурации и разрешения, с которыми можно производить математические операции объединения, вычитания друг из друга поверхностей, полученных в различные серии мониторинга, отклонение фактической модели от эталонной вертикальной и горизонтальной плоскостей. Универсальность метода объемного лазерного сканирования позволяет применять его в различных условиях – при открытой и подземной

разработке полезных ископаемых для исследования деформирования откосных сооружений бортов карьеров, подземных камер и пустот, а также снаружи и внутри зданий и сооружений для исследования их деформаций.

9. Обосновано, что использование комплексов трехмерного лазерного сканирования для исследования процесса сдвижения на горных предприятиях является оправданным, поскольку по критерию допустимых погрешностей результатов измерений они удовлетворяют требованиям действующей нормативной документации. Возможное снижение точности измерений, вызванное условиями отражения лазерного луча надежно контролируется, поскольку контроль фактических погрешностей измерений осуществляется по сшивке соседних облаков точек.

Практическая проверка решений, разработанных в рамках данной НИР, проведена при решении комплексной проблемы обеспечения безопасности промышленным, жилым и общественным объектам инфраструктуры г. Нижнего Тагила, в черте которого ведутся подземные горные работы на шахте Магнетитовой, отрабатывающей Высокогорское железорудное месторождение, при обеспечении устойчивости бортов карьеров на Качканарском и Гусевогорском месторождениях. Мониторинг деформационных процессов проводился с использованием комплексов спутниковой геодезии по площадным наблюдательным станциям, расположенным в области негативного влияния подземных горных работ и в прибортовом массиве при открытых горных работах. Применение метода объемного лазерного сканирования сложно- или аномально-деформирующегося объекта позволила определить ориентировку осей главных деформаций, а также оценить текущее состояние деформирующегося объекта – здания травматологии.

Разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

1. Показано, что использование в учебном процессе результатов настоящей НИР может быть реализовано путем корректировки учебных программ по дисциплинам; введения в блок «Дополнительное факультативное образование» спецкурсов и факультативов; создания новых дисциплин по выбору по ряду технологических специальностей или специализаций; внедрения результатов исследований в качестве методических элементов при выполнении курсовых проектов; использования полученных материалов в качестве методических указаний по дипломному проектированию при выполнении студентами специальных частей дипломных проектов.

2. Результаты научных исследований, полученные в ходе выполнения НИР, используются в образовательном процессе в виде курса профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов предприятий по направлению «Снижение риска природно-техногенных катастроф при недропользовании».

3. В научно – методическом плане, обеспечивающем повышение эффективности работ по предотвращению аварийных ситуаций при недропользовании, результаты исследований в области геомеханики внедрены в «Методические указания по проведению мониторинга на геодинамических полигонах при эксплуатации месторождений нефти и газа».

По результатам выполненных исследований защищено пять кандидатских и две докторские диссертации, представлены к защите одна кандидатская и одна докторская диссертация.

Результаты НИР востребованы:

1. В фундаментальной сфере наук о Земле для углубления познаний геомеханических процессов и явлений, играющих первостепенную роль в обеспечении эффективности и безопасности природопользования;

2. Разработанные технологии мониторинга деформационных процессов необходимы для ряда объектов недропользования, оказавшихся в области влияния горных пород:

- объектов минерально-сырьевого комплекса (наземные и подземные сооружения горных предприятий, нефтегазовые скважины и магистральные нефтегазопроводы и др.);
- объектов градопромышленных агломераций (наземные здания и подземные сооружения, АЭС и промышленные объекты с опасными технологическими процессами);
- инженерных и транспортных коммуникаций;
- высотных сооружений;
- водных объектов;

3. В образовательном процессе полученные результаты востребованы в подготовке специалистов горно-геологического профиля, строительного комплекса для проведения всех видов изысканий и проектирования.