

Российская академия наук
Уральское отделение
Учреждение Российской Академии Наук
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

На правах рукописи

УДК 550:82

Шеменов Роман Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ОБЪЕКТАХ
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ**

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук,
Панжин Андрей Алексеевич

Екатеринбург 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Современное состояние проведения мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования	8
1.1 Проблемы обеспечения устойчивости и безопасности объектов недропользования (статистика и примеры нарушений)	8
1.2 Мировой и отечественный опыт мониторинга деформационных процессов объектов недропользования.....	13
1.3 Законодательная и нормативная база, регламентирующая проведение мониторинга.....	24
1.4 Задачи проведения исследований	29
Выводы.....	32
2. Теоретические и модельные основы развития деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений	34
2.1 Структура массива горных пород.....	34
2.2 Современные геодинамические движения и их параметры	39
2.3 Явление вторичного структурирования и его роль в концентрации параметров современных геодинамических движений	44
2.4 Механизм взаимодействия объектов недропользования с массивом горных пород.....	48
Выводы.....	53
3. Разработка системы мониторинга деформационных процессов объектов недропользования	55
3.1 Обоснование требований к результатам проведения мониторинга деформационных процессов	55
3.2 Конструкция наблюдательной станции	62
3.3 Выбор средств измерений	69
3.4 Методика мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования.....	79
Выводы.....	89
4. Опытно-промышленная апробация сформированной системы мониторинга на объектах недропользования	91
4.1 Геологическая характеристика участка наблюдаемых объектов	91
4.2 Конструкция наблюдательной станции на исследуемых объектах	96
4.2 Используемая аппаратура, методика, обработка данных.....	100
4.3 Результаты мониторинга горизонтальных деформаций сооружений.....	106
4.4 Результаты мониторинга вертикальных деформаций сооружений	120
4.5 Сопоставление данных мониторинга вертикальных и горизонтальных деформаций	129
Выводы.....	134
Заключение.....	136
Список использованных источников.....	139

Введение

Развитие человеческой цивилизации непрерывно сопровождается ростом численности населения земного шара. Шаг за шагом, осваивая новые участки недр Земли, строя города и мегаполисы, ведя добычу полезных ископаемых, человек расширил ареал своего обитания на большую часть планеты. Одной из главных особенностей развития человечества является его тесное взаимодействие с приповерхностной твердой частью планеты Земля – с верхней частью литосферы.

На планете Земля очень много опасных мест, которые вовлекаются в нашу жизнь за счет стремительного развития цивилизации. Землетрясения, извержения вулканов, цунами – это лишь небольшой перечень опасностей, подстерегающих человека на осваиваемых или уже освоенных территориях. Строительство сложноконструктивных техногенных объектов на новых участках недр сопровождается ростом риска возникновения катастроф природно-техногенного характера, способных повлечь за собой экономические и материальные убытки, а также человеческие жертвы.

Техногенные объекты, созданные человеком, располагаются на земной поверхности или в массиве горных пород. Все процессы, протекающие в массиве горных пород, оказывают влияние на устойчивость и безопасность объектов недропользования.

Одним из важнейших факторов, определяющих развитие опасных процессов в массиве горных пород, являются современные геодинамические движения, которые в сочетании с иерархически-блочной структурой массива инициируют процессы вторичного структурирования и самоорганизации. В результате действия современных геодинамических движений напряженно-деформированное состояние приобретает дискретный характер, неоднородное строение и мозаичную структуру. Таким образом, воздействуя на объекты недропользования, современные геодинамические движения играют одну из важнейших ролей в нарушении их устойчивости.

Для обеспечения безопасности объектов недропользования необходимо иметь информацию о степени влияния современных геодинамических движений на их устойчивость.

Решению задачи по учету степени воздействия современных геодинамических движений на объект недропользования мог бы способствовать мониторинг деформационных процессов, позволяющий учитывать роль геодинамических движений в нарушении устойчивости. Однако, все методы мониторинга деформационных процессов, которые существуют на сегодняшний день, несмотря на свое многообразие, не учитывают неоднородность деформирования, присущую современным геодинамическим движениям, что затрудняет получение объективной информации об истинных причинах возникновения деформаций. Отсутствие данных о степени влияния современных геодинамических движений на устойчивость объекта недропользования приводит к необъективной оценке возможности дальнейшей эксплуатации объекта без принятия соответствующих контрмер, или к запоздалому их применению.

Задачей диссертационной работы является обоснование методики мониторинга деформационных процессов, возникающих в объектах недропользования, вызванных воздействием современных геодинамических движений, позволяющей выявлять опасность влияния неоднородности деформирования, вызванного геодинамическими движениями, и принимать своевременные меры по предотвращению аварийных ситуаций при дальнейшей эксплуатации.

Использование сформированной методики мониторинга позволяет учитывать фактор влияния геодинамических движений на устойчивость техногенных сложноконструктивных объектов различного назначения.

Основная идея работы заключается в учете неоднородности, дискретности и мозаичности напряженно-деформированного состояния, формирующегося в массиве горных пород и объектах недропользования под действием современных геодинамических движений.

Объектом исследования является система взаимодействия объектов недропользования и промышленной деятельности человека с геодинамическими процессами и явлениями, протекающими в массиве горных пород.

Предметом исследования является неоднородность деформационных процессов, протекающих в объектах недропользования, подверженных воздействию современных геодинамических движений.

Целью проведения исследований является повышение безопасности эксплуатации объектов недропользования за счет проведения на них мониторинга деформационных процессов в условиях воздействия современных геодинамических движений и принятия мер по предотвращению аварийных ситуаций.

Защищаемые научные положения:

1. Применение в качестве критерия величины модуля относительных горизонтальных деформаций позволяет определить место расположения граничных зон вторичных структур, локализующихся в верхней части литосферы массива горных пород и концентрирующих на своей границе современные геодинамические движения.

2. Модули величин относительных горизонтальных деформаций упругой геологической среды, возникающих под воздействием современных геодинамических движений в граничных зонах самоорганизующихся структур массива горных пород, более чем в 3 раза превышают величины относительных горизонтальных деформаций, протекающих во внутриблоковых областях вторичных структур.

Научная новизна работы состоит в том, что разработанная методика мониторинга деформационных процессов позволяет выделить степень воздействия современных геодинамических движений из всей совокупности геомеханических факторов, влияющих на формирование деформационных процессов на объектах недропользования.

Практическое значение заключается в разработке и обосновании системы мониторинга, позволяющей выявлять деформационные процессы, вызванные

влиянием современных геодинамических движений, на объектах недропользования различного назначения. Это позволит определять степень воздействия современных геодинамических движений на устойчивость техногенного объекта, обеспечивая возможность своевременного и объективного реагирования на процессы возникновения деформаций на различных стадиях его эксплуатации.

Методы исследования, используемые для достижения результатов диссертационной работы: системный анализ, статистические методы обработки данных, сопоставительный анализ, а также инструментальные методы проведения мониторинга деформационных процессов.

Достоверность научных положений подтверждается результатами анализа сопоставления итогов проведения мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков в различных регионах России с результатами мониторинга, полученными во внутриблоковых областях.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в проведении инструментальных измерений, в разработке и обосновании системы мониторинга деформационных процессов, анализе, обобщении и сопоставлении результатов.

Апробация работы. Основные положения результатов исследования докладывались и обсуждались на международных конференциях «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, 2013, 2017 гг.), «Неделя горняка» (Москва, 2017, 2020 г.г.), «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (Санкт-Петербург, 2017 г.); на технических совещаниях по вопросам проведения геомониторинга в г. Сочи (ПСП ДВП ОАО «РЖД Строй»).

По теме исследования опубликовано 8 печатных работ, в том числе 4 – в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержит 150 страниц машинописного текста, в том числе 19

таблиц и 69 рисунков. Список использованных источников включает в себя 107 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.т.н. А.А. Панжину за помощь и высокопрофессиональное руководство в работе над диссертацией, коллективу ИГД УрО РАН за помощь и консультации по теме диссертационной работы, В.К. Бушкову, Д.Е. Малофееву, а также сотрудникам лаборатории геомеханики и инженерных исследований ООО «Полнос Проект» за сотрудничество и поддержку, оказанные в период выполнения исследований, Ю.Л. Юнакову за содействие и рекомендации в подготовке диссертационной работы. С особой теплотой автор отмечает большую роль профессора, д.т.н. А.Д. Сашурина – своего первого научного руководителя и наставника, предопределившего общее направление исследования.

1. Современное состояние проведения мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования

1.1 Проблемы обеспечения устойчивости и безопасности объектов недропользования (статистика и примеры нарушений)

Население земного шара постоянно увеличивается, и поэтому для обеспечения жизнедеятельности человечества возникает потребность в разработке новых месторождений полезных ископаемых, в строительстве жилья, в создании сложноконструктивных техногенных объектов различного назначения. Строительство ведется повсеместно, как на еще не освоенных и малоизученных территориях, так и в густо населенных и застроенных городах.

Устойчивость и безопасность вновь возводимых или эксплуатируемых объектов недропользования зависит от опасных процессов, протекающих в верхней части литосферы [1]. Одним из важнейших факторов, определяющих развитие опасных процессов в массиве горных пород, являются современные геодинамические движения. Опасность их влияния на устойчивость объектов недропользования обуславливается спецификой воздействия, заключающейся в формировании неоднородности деформирования и неравномерности распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Поэтому, в целях безопасности эксплуатации техногенных сооружений, необходим тщательный контроль за состоянием массива горных пород и размещаемых в нем объектов, подверженных воздействию современных геодинамических движений. Эта задача должна решаться с помощью инструмента мониторинга деформационных процессов, протекающих под воздействием современных геодинамических движений.

В настоящее время существует множество методик, применяемых для мониторинга деформационных процессов, возникающих в сложноконструктивных объектах различного назначения. Они используются как во время строительства, так и на стадии эксплуатации объектов. Но, к сожалению, на сегодняшний день

отсутствуют методики мониторинга, позволяющие выделить степень влияния современных геодинамических движений на безопасность эксплуатации объектов недропользования.

Так, например, при эксплуатации Саяно-Шушенской ГЭС использовалась беспрецедентная система мониторинга, включающая в себя более 10500 точек съема информации [2]. Но даже при таких масштабах мониторинга опасная активность массива горных пород под воздействием современных геодинамических движений не была выявлена в нужное время, что привело к известным печальным последствиям.

Помимо аварии на Саяно-Шушенской ГЭС история человечества насчитывает немало количество аварий, произошедших по причине воздействия геодинамической активности. Несмотря на известное разнообразие систем мониторинга деформационных процессов, развитие опасных процессов не было зафиксировано вовремя, вследствие чего эти аварии имели катастрофические последствия, повлекшие за собой даже человеческие жертвы. Приведем примеры лишь некоторых из них:

1991 г. – разрушение 50 м основного тоннеля на строительстве большого Серпуховского ускорителя;

2004 г. – разрушение аквапарка «Трансвааль» в Москве с гибелью 26 человек;

2005 г. – обрушение перекрытия в плавательном бассейне г. Чусовского Пермской области с гибелью 13 детей;

2006 г. – разрушение Басмановского рынка в Москве с гибелью людей;

2006 г. – разрушение на завершающей стадии строительства моста – путепровода через ул. Восточную и Транссибирскую железную дорогу в г. Екатеринбурге;

2009 г. – крупная авария на Саяно-Шушенской ГЭС привела к гибели 75 человек, и причинила вред экологической обстановке акватории и колоссальный экономический ущерб региону в целом [3].



Рисунок 1.1 – Деформация в жилом доме в Красноярске



Рисунок 1.2 – Деформация в жилом доме в Екатеринбурге

Под влиянием современных геодинамических движений, концентрирующихся на границах вторичных структурных блоков, в массиве горных пород произошло перераспределение напряженно-деформированного состояния, придав ему мозаичную и неоднородную структуру, в результате чего и произошло неравномерное развитие деформационных процессов, которое привело к описанным катастрофам.

Вышеперечисленные аварии можно было бы избежать, если бы при проектировании и выборе мест расположения техногенных объектов учитывалась специфика воздействия современных геодинамических движений на их устойчивость. Например, при проектировании объектов недропользования с позиции геомеханики наиболее безопасен выбор места их расположения на внутриблоковых участках, где уровень геодинамической активности значительно ниже. А на эксплуатируемых объектах недропользования, расположенных на границах вторичных структурных блоков, то есть там, где уровень геодинамической активности значительно выше, необходимо проведение усиливающих мероприятий, позволяющих повысить устойчивость и безопасность эксплуатации сооружений. Однако, для проведения указанных выше мероприятий нужна достоверная информация о параметрах действующих в районе современных геодинамических движений.

Информацию об уровне геодинамической активности на конкретном участке недр может предоставить своевременный и информативный способ проведения геомеханического мониторинга деформационных процессов, позволяющий учитывать воздействие современных геодинамических движений, что позволит предупредить возникновение потенциальных аварий путем проведения защитных мероприятий или, во всяком случае, поможет избежать гибели людей [4].

Под своевременным и информативным способом проведения геомеханического мониторинга деформационных процессов, учитывающим воздействие геодинамических движений, понимается проведение инструментальных измерений, в результате которых определяется характер и

неравномерность распределения современных геодинамических движений в массиве горных пород.

Одним из ярких примеров действия геодинамических движений является Главный карьер Коршуновского ГОКа, а точнее его северо-западный борт. В этом борту с 1975 года периодически возникают деформации в виде оползней, и это при том, что угол наклона борта, сложенный осадочными породами, составляет 22° . По расчетным оценкам устойчивость борта должна обеспечиваться при углах наклона $28-30^\circ$ с нормативным коэффициентом запаса устойчивости 1,3.

При проведении периодических наблюдений за смещениями маркшейдерских пунктов, расположенных по контуру карьера, были обнаружены их циклические смещения с деформациями растяжения и сжатия массива. Таким образом, установлено, что геодинамические движения, действующие в разломной зоне северо-западного борта карьера, являются первопричиной развития аварий северо-западного борта Коршуновского карьера [5].

Интересен пример неравномерного оседания здания третьей ступени пульпонасосной станции хвостохранилища на Качканарском ГОКе. Северная часть здания оседает со скоростью 45-50 мм в год, а южная – 95-100 мм в год. При исследовании причины такого оседания было установлено, что в подстилающих материнских породах, на которых отсыпан откос дамбы хвостохранилища, расположен крупный тектонический разлом. Таким образом, колебания материнских пород в зоне тектонического разлома создают соответствующие квазитексотропные состояния в изначально однородных хвостах. Это и является причиной большей интенсивности оседания зданий в зоне разлома.

Таким образом, геодинамические движения являются одним из важнейших факторов, который посредством формирования неоднородности процессов деформирования, в совокупности с геомеханическими факторами инициирует возникновение аварийных ситуаций при эксплуатации объектов недропользования различного назначения.

Несмотря на разнообразие применяющихся систем мониторинга деформационных процессов, необходима разработка методики, позволяющей

выявлять деформации объектов недропользования, возникающие с учетом воздействия современных геодинамических движений.

1.2 Мировой и отечественный опыт мониторинга деформационных процессов объектов недропользования

Термин «Мониторинг» произошел от латинского слова «monitor» – напоминающий, надзирающий.

Под мониторингом деформационных процессов понимается процесс определения смещений и деформаций исследуемых объектов, а также их частей. Эффективная разработка и эксплуатация объектов недропользования невозможна без организации систематических инструментальных наблюдений за устойчивостью массива горных пород [6].

В России и за рубежом весомый вклад в развитие геомеханики в целом, а также в развитие геомеханического мониторинга деформационных процессов внесли такие ученые, как Г.Л. Фисенко, А.М. Гальперин, И.М. Бахурин, С.Г. Авершин, Н.П. Влох, А.Д. Сашурин, А.В. Зубков, О.В. Зотеев, С.В. Корнилков, Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, А.Б. Макаров, А.Е. Балек, А.А. Панжин, Ю.О. Кузьмин, А.А. Козырев, Д.В. Жиров, В.В. Рыбин, Ю.Л. Юнаков, П.С. Шпаков, Ю.А. Кашников, М.А. Иофис, О.Н. Малинникова, В.А. Трофимов, Ю.И. Кутепов, М.Д. Ильинов, В.Н. Опарин, А.В. Леонтьев, Ю.И. Рассказов, А.А. Карлсон, А. Костехель (Румыния), Х. Бок, Абузар Вакили, Ф. Дайт и др.

Инструментальные натурные наблюдения начали использоваться с развитием теории горного давления, которую ввел в 1907 г. профессор М.М. Протоdjяконов. Изначально они применялись в основном на горных предприятиях.

В 1912 году П.М. Леонтовским были выпущены работы, освещающие вопросы геомеханического сдвигения горных пород и проведения инструментальных наблюдений на Донбассе [7]. Им была представлена программа проведения мониторинга деформационных процессов, возникающих на угольных рудниках Кривого Рога и Донбасса. Но из-за отсутствия финансирования программа не получила дальнейшего развития.

Первые известные сведения об инструментальных наблюдениях в промышленном строительстве датируются 1927 годом. Именно в этот период начали производиться измерения осадок при строительстве Свирской гидроэлектростанции [8].

В 1930 году С.Г. Авершин предложил способ расчета сдвижения земной поверхности на основе результатов инструментальных натурных измерений.

В 40-е годы XX века для мониторинга деформаций и напряжений начали использовать тензометрические датчики. В это же время были разработаны первые геофоны для сейсмоакустической оценки нагруженного состояния горных пород.

В СССР в 60-х годах XX века при президиуме Академии наук СССР была развернута обширная программа проведения геодезических измерений движений земной коры. С этого времени изучением современных движений литосферы начали заниматься непосредственно на геодинамических полигонах различного целевого назначения.

Первые геодинамические полигоны располагались в сейсмически активных регионах. По результатам измерений смещений на этих полигонах с периодичностью от месяцев до нескольких лет позволили выявить наличие интенсивных, локальных движений в зонах разломов, которые имели пульсационный и короткопериодный характер.

Геодинамические полигоны располагались в таких регионах СССР, как Башкирия, Белоруссия, Западная Сибирь, Камчатка, Прикаспийская впадина и др. [9].

Опираясь на полученные результаты, в начале 70-х годов под руководством Миннефтепрома СССР была начата работа длительной программы по изучению движений земной коры в нефтегазоносных осадочных бассейнах. Эта программа в большей степени была предназначена для геологического изучения и оценки нефтегазоносности выбранных бассейнов на основе геодинамических наблюдений [10].

Теоретические основы геодезических методов мониторинга деформационных процессов широко освещены в ряде работ С.В. Марфенко [11],

Г.П. Левчука [12], А.А. Карлсона [13], П.С. Шпакова, Ю.Л. Юнакова [14], Ю.П. Гуляева [15] и др.

В этих работах описана суть таких основополагающих методов, применяющихся при мониторинге деформационных процессов, как геометрическое, гидростатическое и тригонометрическое нивелирование, микро nivelирование, фотограмметрические и стереофотограмметрические методы.

Стоит отметить, что сегодня на основе этих методов, благодаря развитию высокоточной измерительной аппаратуры (электронно-оптические тахеометры, цифровые нивелиры и др.) разрабатываются новые методики, позволяющие решать геомеханические задачи контроля смещений и деформаций с более высокой точностью.

Так, учеными лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН во главе с А.В. Зубковым на основе выявления связи изменения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород с циклическими сжатием и расширением Земли, определены преимущества применения средств измерений деформационных процессов, основанных на физических принципах измерений [16].

На земной поверхности при отработке месторождений активно применяется метод измерений по профильным линиям [17]. Суть этого метода заключается в определении отметок и координат рабочих реперов относительно исходных с заданной периодичностью. В основе данного подхода лежит методика тригонометрического нивелирования. Использование современных электронно-оптических тахеометров позволяет существенно сократить скорость выполнения съемочных работ и увеличить точность результатов измерений [18].

Для производства измерений по этой методике при ведении подземных горных работ на земной поверхности закладывается сеть реперов, составляющих наблюдательную станцию. Они закладываются, как правило, вкрест простирания и по простиранию рудного тела (рисунок 1.3), при открытой разработке – перпендикулярно борту карьера (рисунок 1.4).

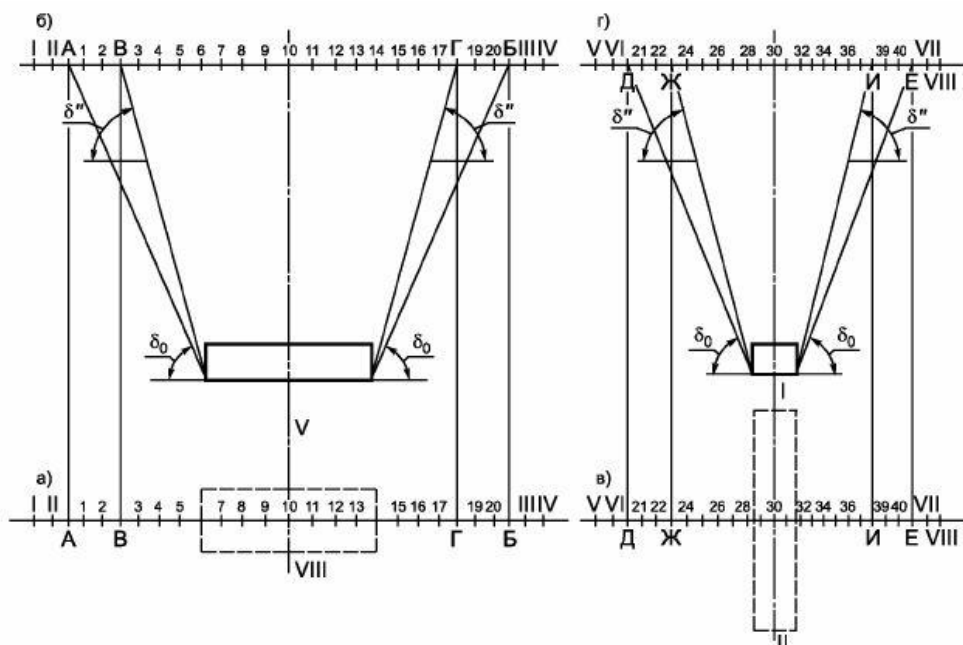


Рисунок 1.3 – Расположение реперов по профильным линиям вкрест и по простиранию рудного тела при подземных горных работах [19]

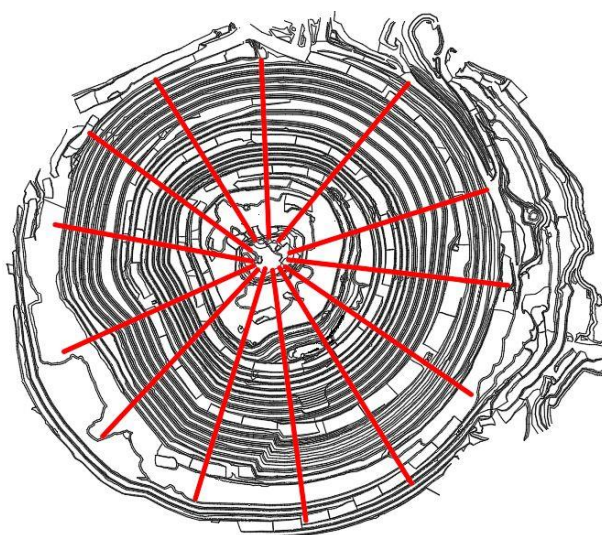


Рисунок 1.4 – Расположение реперов по профильным линиям при открытых горных работах на карьере Восточный Олимпиадинского ГОКа

Повышение точности методик мониторинга деформационных процессов в геомеханике происходит также за счет усовершенствования методов обработки результатов измерений.

Например, на участке Московского метрополитена вблизи станции «Манежная площадь» при строительстве были обнаружены деформации, принятые за аномальные. После их обнаружения были организованы систематические геодезические наблюдения за плановыми и высотными смещениями тоннелей.

Наблюдения производились на участках от станции «Охотный ряд» до участка, расположенного в пределах 100 м от станции «Библиотека им. Ленина», от участка за камерой съездов, расположенной около Манежа, до камеры съездов, расположенной вблизи станции «Площадь революции».

Геодезические наблюдения производились инженерами ТОО «Радиус-М» с весны 1994 г. с заданной периодичностью примерно один раз в месяц. Плановые смещения определялись путем построения отдельных ходов основной подземной полигонометрии, а высотные — путем проложения высокочастотных нивелирных ходов. Наблюдения велись в связи с изучением проблемы влияния котлована на динамические характеристики метрополитена.

Для решения этой задачи Ю.О. Кузьминым была разработана специальная методика уравнительных вычислений, которая является разновидностью параметрического уравнивания геодезических построений с координатной привязкой. Благодаря использованию данной методики была достигнута средняя квадратическая ошибка в определении смещений знаков в плане не более 9 мм, а по высоте 1-1,5 мм. Всего при анализе использовались координаты более чем 70 геодезических знаков, полученные за 1,5 года [20].

За рубежом также известен ряд современных ученых-геомехаников, занимающихся разработкой методик мониторинга деформационных процессов. К ним можно отнести таких исследователей, как Питер Стейси, Марк Холи, Скотт Марисетт, Джеф Бил и др.

Стоит отметить, что западные специалисты используют зачастую более смелые и прогрессивные методы мониторинга деформационных процессов, которые постепенно внедряются в последнее время в практику геомеханических служб и на российских предприятиях.

В большей степени это связано с тем, что высокоточное лазерное оборудование начали использовать в западной практике с начала 70-х годов прошлого столетия, что на несколько десятилетий опередило этот процесс в России. Это безусловно не могло не отразиться на различиях в практике

применения методов мониторинга деформационных процессов, используемых на Западе и в России.

Например, широко используемый в России метод измерений по профильным линиям на Западе практически не используется. Вместо него наибольшей популярностью пользуется мониторинг с применением роботизированных электронных тахеометров с сервоприводами (рисунок 1.5). Согласно этой методике тахеометры программируются и производят измерения по заранее заданной программе с автоматическим обнаружением целевых отражателей, рассредоточенных на борту карьера (рисунок 1.6). Данная система измерений может работать в непрерывном режиме и с минимальной степенью участия персонала, что является серьезным преимуществом [21].



Рисунок 1.5 – Обзорный вид автоматизированной станции (АСДМ), включающий: укрытие для защиты; метеостанцию (для ввода поправок в тахеометр); компьютер для обработки данных мониторинга; GNSS приемник (для корректировки по позиционированию АСДМ); реперы с отражательными призмами (в различных вариантах исполнения и типах установки и крепления)

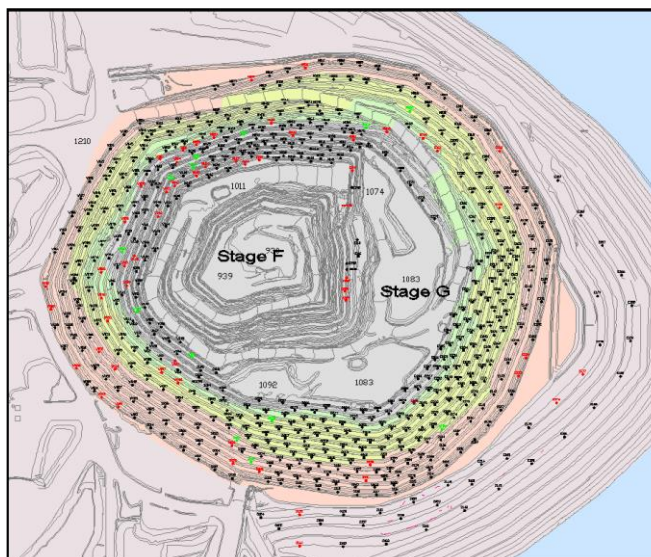


Рисунок 1.6 – Расположение призм для проведения мониторинга с помощью роботизированного тахеометра на предприятии Баррик, Австралия

С 1950-х годов с появлением спутниковой геодезии появились новые возможности проведения мониторинга деформационных процессов. С 1980-х годов спутниковые системы уже начали использоваться, помимо геодезии, в геомеханике, геодинамике, топографии и других отраслях [22].

GPS-технологии позволяют значительно расширить границы исследуемых областей влияния горных работ, что, в результате, позволяет изучать деформирование земной поверхности, вызванное техногенными и другими факторами, на качественно новом уровне.

Так, например, в начале 2000-х годов специалистами ИГД УрО РАН была разработана методика непрерывного мониторинга короткопериодных смещений и деформаций разломных зон с использованием GPS-оборудования [23]. Суть методики заключается в том, что за счет измерения параметров полных векторов смещений реперов наблюдательной станции, образующих базовые треугольные элементы, представляется возможным определить объемный тензор деформаций, характеризующий напряженно-деформированное состояние массива [24], что является одной из важнейших задач геомеханики.

В разработанной методике непрерывного мониторинга короткопериодных деформаций массива в городе Сургут использовался мобильный комплект GPS-аппаратуры фирмы Trimble Navigation. Требуемую точность обеспечивает

технология дифференциальной GPS. При одновременной работе как минимум 2-х GPS-приемников появляется возможность вычислить величину ионосферной и тропосферной поправок, компенсирующих искажение радиосигналов, поступающих со спутников, в процессе прохождения их через ионосферу и тропосферу Земли. Основным требованием к работе в режиме дифференциальной GPS является необходимость обеспечения одновременного приема радиосигналов с одних и тех же спутников всеми принимающими GPS-приемниками. В проводимых исследованиях принимало участие 4 и более приемников Trimble 4600LS и Trimble 4000SSE, ведущих одновременную работу на исследуемых интервалах. При последующей попарной обработке это обеспечило измерение смещений и деформаций одновременно по шести и более отрезкам на местности. В экспериментальных работах использовались два временных режима определения вертикальных и горизонтальных смещений.

Данная методика была впервые опробована летом 2000 г. на сургутском полигонном участке, где ранее специалистами “Сургутгеоэкологии” производились определения деформаций массива контактными способами. На основе анализа геомеханических исследований было подтверждено наличие циклических деформаций массива в пределах выявленной разломной зоны. Максимальная абсолютная величина горизонтальных деформаций составила 35-57 мм. Для вертикальных деформаций максимальные величины составили, соответственно 86-108 мм. В результате этой работы была доказана эффективность применения комплексов спутниковой геодезии в качестве средства бесконтактного исследования и контроля воздействия динамически напряженных зон на трубопроводы путем непрерывных наблюдений за смещениями и деформациями земной поверхности.

Вышеописанная методика непрерывного мониторинга циклических деформаций земной поверхности в тектонически активных зонах была успешно применена для выяснения причин и механизма аварийных разрушений канализационных коллекторов города Сургута, расположенных в местах

пересечения ими локальных тектонических разломов с выходом воронок обрушения на земную поверхность [25].

Спутниковые и дистанционные технологии также широко практикуются геомеханиками на открытых и подземных горных работах за рубежом. Например, в Португалии Коста Э Силвой и другими специалистами на карьере Парадиз разработана система мониторинга, позволяющая классифицировать степени опасности деформаций. Потенциальные риски подразделяются относительно структурного состояния массива, степени воздействия на производительность предприятия и относительно экономических аспектов на 3 стадии опасности – нулевой, средний и высокий. Если, например, в выработке скорость осадки кровли выше уровня безопасности и возможна вероятность обрушения, то система предлагает приостановление добычи и закрытие выработки до тех пор, пока сложившаяся ситуация не будет оценена экспертами [26].

В конце 20 века были разработаны и начали применяться в России системы лазерного сканирования, позволяющие отстроить точную трехмерную модель объекта. Изначально эти системы применялись для съемки структуры массива горных предприятий, но позднее стали разрабатываться методики, позволяющие использовать сканеры для мониторинга деформаций сложноконструктивных объектов недропользования [27].

С помощью технологий лазерного сканирования учеными ИГД УрО РАН (С.В. Усанов, В.И. Ручкин, О.Д. Желтышева и др.) получен опыт выявления нелинейных деформаций зданий и сооружений, попадающих в зону влияния подземной подработки и испытывающих воздействие техногенных и геодинамических факторов [28].

В начале 2000-х годов были разработаны радарные установки, позволяющие вести высокоточные наблюдения за смещениями в непрерывном режиме. В настоящее время они используются в основном на горных предприятиях (рисунок 1.7), качественно решая геомеханические задачи мониторинга деформационных процессов массива горных пород.



Рисунок 1.7 – Радарная станция для мониторинга устойчивости борта карьера

В последнее время активно используются также геодезические и геомеханические методы мониторинга, применяемые в совокупности с геофизическими. В России этим вопросом занимаются такие ученые, как А.М. Линьков, А.А. Доброскок, В.В. Зубков и др. За рубежом – С. Максвелл, М.Д.Г. Саламон, Т. Уайлз, Е. Дж. Селлерс и др.

Совмещение геомеханических и геофизических методов мониторинга в настоящее время очень актуально на горных предприятиях. Одним из достоинств является то, что это не связано с существенными затратами на покупку дорогостоящего оборудования [29].

Например, на Высокогорском месторождении мониторинг геодинамических движений производился в комплексе геодезическими и геофизическими методами. Геофизические методы (в данном случае метод спектрального сейсмопрофилирования) дал возможность прозондировать массив в месте произошедшей деформации и наглядно продемонстрировал происходящее при этом процессе деформирование структуры [30].

Ветвь развития также получили сейсмоакустические методы мониторинга. В Алтайе-Саянском филиале Геофизической службы СО РАН была разработана методика обследования зданий и сооружений стоячими волнами, допускающая проведение несинхронных измерений на плотной сети наблюдений малоканальной аппаратурой. Эта методика может с успехом применяться также и для мониторинга относительно небольших конструктивных элементов сооружений, в том числе и подземных [31].

ИГД СО РАН активно разрабатывает методы мониторинга деформаций массива, позволяющие применять многоканальные измерительные системы определения смещений с помощью пробуренных горизонтальных скважин. Эти методы могут успешно применяться в геодинамически активных регионах, использоваться при разработке удароопасных месторождений [32-37].

Для мониторинга деформаций объектов недропользования в дополнение к геодезическим методам как в России, так и за рубежом, используются геотехнические методы.

Например, для проведения мониторинга деформационных процессов в массиве пород могут быть использованы скважинные системы с применением инклинометров и экстензометров (рисунок 1.8) [38].



Рисунок 1.8 – Использование портативного инклинометра

Ради справедливости стоит отметить, что на сегодняшний день, все используемые в геомеханике методы мониторинга деформационных процессов вполне пригодны для сбора данных о смещениях и деформациях, происходящих как в сооружениях, так и в массиве пород. Однако, эти методы не позволяют получить картину деформаций, причиной которых стали современные

геодинамические движения, что, безусловно, подтверждает актуальность исследуемой темы.

1.3 Законодательная и нормативная база, регламентирующая проведение мониторинга

На основе анализа нормативных документов 1960-70х годов XX века установлено, что в строительных нормах и правилах того времени принималось во внимание расположение зон тектонических разломов относительно объектов недропользования. Например, в разделе 1.6 в СНиП IIА.12-62 1963г., стр.4 в числе неблагоприятных в сейсмическом отношении условий упоминается «близкое расположение линий тектонических разрывов». В СНиП IIА12-69 1977г. содержится пункт 5.33: «Подпорные гидротехнические сооружения, возводимые в сейсмических районах, следует располагать на участках, удаленных от тектонических разломов, по которым могут возникнуть дифференциальные подвижки скальных массивов, образующих основание сооружения. Основные сооружения гидроузлов (плотина, здание, ГЭС, водосброс) следует размещать на скальном массиве, в пределах которого возможность возникновения таких подвижек исключена» (с.26), а также пункт 5.44, в котором говорится: «При проектировании тоннелей и других подземных сооружений в районах с сейсмичностью 8 и 9 баллов следует избегать ... зон с тектоническими нарушениями» (с. 28). В пункте 10.18 «Рекомендаций по сейсмическому микрорайонированию» 1971г. указывается: «Площади, примыкающие к сейсмоактивным и опасным тектоническим нарушениям на расстоянии ... не менее 100 м от границ зоны по обе стороны, характеризуются повышенной величиной сейсмической интенсивности и неустойчивым состоянием грунтов» (с.52).

В пункте 1.12 более поздних «Рекомендаций по сейсмическому микрорайонированию, РСМ-73» 1973г. сказано: «В зоне главного сейсмогенного разрыва ... при $M > 6,5$, возможны сейсмотектонические ... и гравитационно-сейсмотектонические деформации ... а также развитие обвалов, оползней-обвалов, оползней» (с.8).

Анализ советской нормативной документации говорит о понимании существенного влияния тектонических разрывных зон на устойчивость и безопасность эксплуатации техногенных объектов [39].

В настоящее время порядок проведения мониторинга деформационных процессов при строительстве и эксплуатации объектов недропользования регламентируется такими нормативными документами, как: СП 11-104-97 «Инженерно – геодезические изыскания для строительства», ГОСТ 24846-81 «Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений», СП 126.13330.2012 «Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84», и т.д.

В СП 126.13330.2012 «Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84», указано, что мониторинг смещаемости и деформативности возводимых строительных конструкций проводят в случаях, предусмотренных проектом строительства по специальным проектам [40].

Мониторинг состоит из трех подсистем, включающих в себя систему измерений, получение результатов и их аналитическую обработку.

Нормативный документ разделяет рекомендуемые методики проведения мониторинга на стадиях строительства и эксплуатации сооружения. В первом случае предполагается использование способов геометрического нивелирования коротким лучом визирования и гидростатического нивелирования. При эксплуатации зданий и сооружений мониторинг рекомендуется проводить с помощью автоматизированных систем на основе видеоизмерений или роботизированных электронных тахеометров.

Свод правил СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96» говорит о том, что в состав инженерно-геодезических изысканий входят геодезические наблюдения за деформациями и осадками зданий и сооружений, движениями земной поверхности и опасными природными процессами [41].

В СП 11-104-97 «Инженерно – геодезические изыскания для строительства» говорится о том, что при инженерно-геодезических изысканиях должны выполняться геодезические стационарные наблюдения за деформациями оснований зданий и сооружений, земной поверхности и толщи горных пород в районах развития опасных природных и техноприродных процессов. Помимо этого, при инженерно-геодезических изысканиях должны производиться геодезические работы по изучению движений земной поверхности в районах развития современных тектонических нарушений. Эти виды работ должны выполняться как при строительстве, так и при эксплуатации зданий и сооружений [42].

В своде правил СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» дается определение термина «геотехнический мониторинг», а также поясняется его цель – обеспечение безопасности строительства и эксплуатационной надежности вновь возводимых объектов и сооружений окружающей застройки.

В этом нормативном документе говорится также о том, что помимо геодезических методов, в составе геотехнического мониторинга должны использоваться визуально-инструментальные методы (наблюдения за уровнем подземных вод, установка маяков на поврежденных участках, фотофиксация и пр.), тензометрические методы (фиксация напряжений в несущих конструкциях сооружения) с применением систем датчиков определения напряжений и деформаций, виброметрические методы (включают измерения кинематических параметров колебаний), а также геофизические методы [43].

В ГОСТ 24846-2012 «Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений» говорится о том, что мониторинг деформаций должен проводиться в течение всего периода строительства сооружения и в период его эксплуатации до достижения состояния стабилизации деформаций. Помимо определения величин деформаций и принятия соответствующих мер по борьбе с ними, в качестве одной из целей мониторинга деформаций указывается выявление причин возникновения и степени опасности деформаций для нормальной

эксплуатации зданий и сооружений. Также указывается, что в процессе мониторинга должны быть измерены вертикальные и горизонтальные смещения, а также наклоны (крены) здания [44].

В 2009 году компанией ООО «Тектоплан» разработан нормативный документ МДС 13-22.2009 «Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений». В этом документе подробно описаны все методы, рекомендуемые для проведения мониторинга деформационных процессов сложноконструктивных зданий и сооружений, а также методики математической обработки результатов проведения мониторинга.

Методики, рекомендуемые к использованию, включают в себя как геометрическое и тригонометрическое нивелирование, так и автоматизированные методы геодезического мониторинга сложноконструктивных сооружений [45].

В нормативном документе МРДС 02-08 «Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных» подробно описаны методики проведения геотехнического мониторинга сложноконструктивных сооружений.

Отличительной особенностью этого документа является то, что в нем наиболее подробно говорится о методиках мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций сооружений (применение инклинометров, экстензометров и пр.) [46].

Помимо указанных нормативных документов существуют также стандарты, которыми необходимо руководствоваться на предприятиях узкой направленности. Например, в 2009 году введен стандарт СТО 70238424.27.140.035-2009 «Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования» [47], а еще ранее, в 1980 году под руководством А.А. Карлсона выпущено «Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами» [48]. Теме развития мониторинга деформаций гидротехнических сооружений посвящены многие работы [49].

На горных предприятиях для производства мониторинга деформаций руководствуются такими нормативными документами, как Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» [50], «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости» [51], «Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов разрезов при их ликвидации и обеспечению сохранности прилегающих к разрезам территорий» [52] и пр.

Таким образом, анализ нормативной документации показал, что существует и рекомендуется к применению огромное разнообразие способов мониторинга деформаций, включающих в себя как геодезические, так и методики контроля напряженно-деформированного состояния сооружений.

Но, несмотря на многообразие этих способов, они не позволяют выявить деформации, вызванные современными геодинамическими движениями массива пород. Помимо этого, в нормативах отсутствуют какие-либо рекомендации по прогнозированию и оценке деформаций, вызванных влиянием геодинамических движений.

Благодаря сегодняшним представлениям о геодинамике, можно сказать, что современные геодинамические движения, безусловно, являются одним из опаснейших факторов разрушения техногенных объектов, который относится к опасным природным процессам. И, как утверждает Ю.О. Кузьмин, в такой ситуации необходима очень продуманная система диагностики участков земной поверхности. Одной из составляющих подобной системы диагностики является детальный, метрологически обеспеченный мониторинг современных деформационных процессов [53]. Однако, этот мониторинг должен решать задачи выявления деформаций, вызванных именно современными геодинамическими движениями.

1.4 Задачи проведения исследований

Проведенный в предыдущих параграфах анализ свидетельствует, что методы мониторинга деформационных процессов позволяют достаточно детально измерить деформации, но они не учитывают их неравномерное распределение на объектах, возникающее за счет усиленного действия современных геодинамических движений на границах вторичных структур.

Методы, разработанные М.М. Протодяконовым, И.М. Бахуриным, С.Г. Авершиным и другими учеными, легли в основу современных методик мониторинга деформационных процессов, используемых в настоящее время.

С развитием научно-технического прогресса совершенствование применяемого для инструментальных измерений оборудования достигло новых вершин в точности и оперативности получения информации о происходящих в объекте наблюдениях смещениях и деформациях. Это позволило усовершенствовать методы проведения мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования.

Применяемые в XX столетии оптические теодолиты и нивелиры были модернизированы и оснащены встроенными цифровыми компьютерами, позволяющими с высокой скоростью проводить измерения и получать данные о смещениях. Точность их угловых измерений выросла до $0.5''$, точность линейных измерений также значительно повысилась в результате применения лазерного дальномера. Электронно-оптические тахеометры и цифровые нивелиры активно используются для мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования горных предприятий, на промышленных и гражданских сооружениях.

Использование введенных в конце прошлого века в эксплуатацию электронно-оптических роботизированных тахеометров позволило довести процесс получения данных до автоматизма. Измерения могут проводиться с минимальным участием человека, что снижает ошибку наблюдателя и повышает оперативность получения данных. Это преимущество активно используется геомеханиками и геотехниками на Западе для измерения смещений массива горных

пород преимущественно на горнодобывающих предприятиях. На ряде предприятий России, как, например, на Олимпиадинском ГОКе, также внедрены эти технологии.

С освоением космоса человеком и появлением технологий GPS открылись новые возможности для проведения инструментальных измерений. Помимо повышения оперативности и точности получения данных появились возможности получения информации о смещениях и деформациях практически в любом регионе планеты.

GPS-приемники уверенно сменили оптические нивелиры и теодолиты в качестве основных измерительных инструментов на современных геодинамических полигонах. Возможность получения информации о смещениях и деформациях массива в течение длительного времени позволяет выявлять длинно- и короткопериодные современные геодинамические движения.

Разработанные в начале XXI века радарные установки позволяют получать информацию о смещениях массива горных пород в режиме реального времени, что позволяет успешно использовать их на горных предприятиях за рубежом и в России.

Применяемые в совокупности геодезические и геофизические, сейсмоакустические и геотехнические методики мониторинга, а также различные методики обработки больших объемов, получаемых по результатам мониторинга, данных [54] позволяют достоверно получать информацию о смещениях и деформациях на объектах недропользования.

Все вышеописанные методы проведения мониторинга деформационных процессов используются в зависимости от поставленных задач проведения измерений.

Однако, несмотря на высокий уровень развития методов мониторинга деформационных процессов, используемые методики не учитывают специфики деформирования массива горных пород и земной поверхности, передающейся на объекты недропользования. Не учитывается неоднородное поле напряженно-деформированного состояния массива горных пород, вызывающее неравномерные

деформации техногенных сооружений. Поэтому очень редко удается зафиксировать вовремя процесс нарушения устойчивости и безопасности при эксплуатации и строительстве объектов недропользования, возникающий с учетом влияния современных геодинамических движений.

Таким образом, для дальнейшего повышения эффективности решения задачи по выявлению деформаций и смещений, вызванных действием современных геодинамических движений, необходимо дополнить известные методы мониторинга моментами, которые позволят учесть специфику действия современных геодинамических движений на стадии проектирования, строительства и эксплуатации объектов недропользования.

Все это говорит о том, что для проведения мониторинга деформационных процессов, протекающих с учетом современных геодинамических движений, имеется вполне достаточная методологическая, техническая инструментальная и нормативная база. Но, для использования всего этого непосредственно на практике, отсутствует обоснованная методика, позволяющая производить мониторинг деформационных процессов, возникающих под влиянием современных геодинамических движений.

Исходя из всего вышеописанного вытекает задача диссертационной работы, которая заключается в необходимости обоснования методики мониторинга деформационных процессов, вызванных влиянием современных геодинамических движений, которая позволит своевременно выявлять опасность их воздействия. Решение данной задачи способствует принимать оптимальные меры по предупреждению возникновения аварийных ситуаций при проектировании и эксплуатации объекта недропользования.

Для достижения цели по формированию методики мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений в работе решены следующие научно-практические задачи:

1. Обоснована необходимость анализа относительных горизонтальных деформаций по модулю, что позволяет выявить степень воздействия современных

геодинамических движений на устойчивость объектов недропользования, и определяемых с помощью мониторинга деформационных процессов;

2. Определены требования к конструкции наблюдательной станции, необходимой для выявления воздействия современных геодинамических движений на устойчивость и безопасность объектов недропользования;

3. Выявлены зависимости величин параметров деформаций, протекающих на границах вторичных структурных блоков и формирующихся под воздействием современных геодинамических движений, от деформаций, протекающих во внутриблоковых областях массива горных пород;

4. Выполнена апробация основных положений разработанной системы мониторинга на горнодобывающих и промышленных объектах.

Выводы

На основании проведенного в первой главе анализа произошедших аварийных ситуаций и деформаций, можно сделать вывод, что современные геодинамические движения являются одним из важнейших природных факторов, влияющих на устойчивость и безопасность объектов недропользования.

Из результатов рассмотрения существующих на сегодняшний день методов мониторинга деформационных процессов следует, что благодаря высокому уровню развития научной и материально-технической базы, они удовлетворяют требованиям точности и оперативности получения информации о происходящих в объекте недропользования смещениях и деформациях.

Несмотря на высокий уровень используемых методов мониторинга деформационных процессов, они не учитывают специфику деформирования массива горных пород и земной поверхности с учетом воздействия современных геодинамических движений. По этой причине процесс возникновения и развития деформаций, возникающих вследствие действия современных геодинамических движений, не всегда удастся зафиксировать вовремя.

Исходя из результатов анализа информации, приведенной в первой главе, поставлена задача, которую необходимо решить в рамках диссертационной

работы, заключающаяся в разработке и обосновании системы мониторинга деформационных процессов, возникающих в объектах недропользования с учетом влияния современных геодинамических движений. Эта методика позволит оперативно выявлять опасность воздействия современных геодинамических движений, и принимать своевременные меры по предотвращению аварийных ситуаций при дальнейшей эксплуатации объектов недропользования.

2. Теоретические и модельные основы развития деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений

2.1 Структура массива горных пород

До 70-х годов XX века массив горных пород представлялся в виде сплошной линейно-упругой среды. На основе инструментов из механики сплошных сред в науке были достигнуты важнейшие успехи при решении таких фундаментальных проблем, как изучение строения Земли, разработка методов геофизической разведки полезных ископаемых и др.

Однако, попытки использовать модель сплошной среды массива горных пород для решения вопросов, связанных с изучением процессов, происходящих в литосфере под воздействием геодинамических явлений, оказались менее удачными. Сама идея использования представлений сплошности для описания процессов самоорганизации среды оказалась сомнительной. Появилась мысль о необходимости поиска модели среды, адекватной новейшим на то время задачам геомеханики.

В начале 80-х годов XX века в геомеханике сформировалось представление о массиве горных пород, которое является доминирующим и в настоящее время. В соответствии с этим представлением массив горных пород представляет из себя блочно-иерархическую среду, разделенную на блоки и микроблоки различных масштабных уровней. Данные блоки существуют в положении неустойчивого равновесия, находящегося под воздействием эндогенных и экзогенных процессов. Вследствие влияния этих процессов, иерархические блоки находятся в непрерывном движении, характеризующемся различной направленностью и интенсивностью.

Каждый блок разбит на несколько блоков более низкого масштабного уровня. Границами блоков служат тектонические разломы и трещины, по плоскостям которых протекают геодинамические движения массива горных пород. Ярким примером, подтверждающим данное представление, является непрерывное

движение материков и литосферных плит, исследуемое специалистами со всего мира (рисунок 2.1).

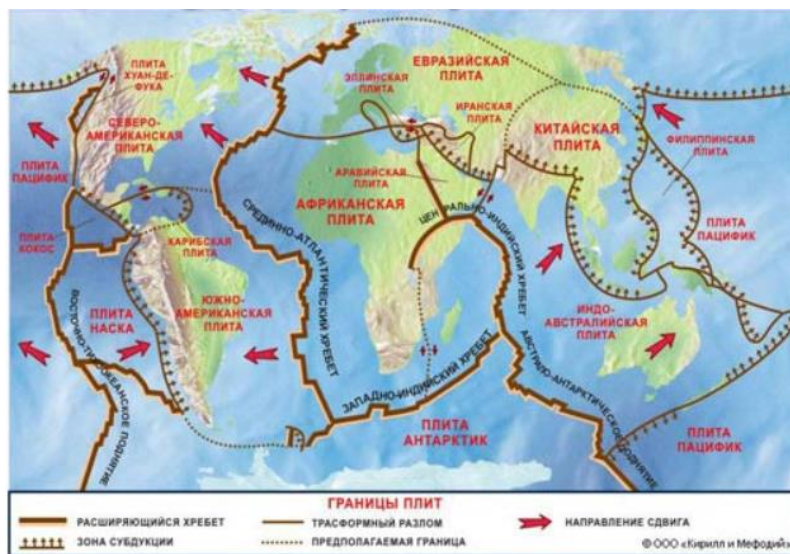


Рисунок 2.1 – Схема движения и разделения литосферных плит Земли [55]

Размеры блоков имеют определенную зависимость между собой. Отношение размера блока высшего порядка к блоку низшего порядка представляет из себя число **К**, которое никак не зависит от физико-механических свойств горных пород или от характера формирования раздельностей: $L_{i+1} / L_i = K$.

Изначально предполагалось, что число **К** варьируется в пределах от 2 до 5 [56-57]. Позднее, один из основоположников представлений о массиве как о блочно-иерархической среде, М.А. Садовский, установил, что число **К** близко к постоянству, и составляет $L_{k+1} / L_k \approx 3,5$ [58].

Существуют и другие точки зрения по вопросу определения размерности блоков массива горных пород. Например, Е.И. Шемякиным [59-60], В.Н. Опариным [61-62], М.В. Курленей, И.И. Кайдо [63] принято отношение соседних блоков друг к другу как равное $\sqrt{2}$. П.В. Макаровым в своих работах принято данное отношение равным $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ [64-66].

Однако, несмотря на разницу в подходе определения коэффициента вложенности одного блока в другой, представления о горной породе, как о блочно-иерархической среде, прочно утвердились в современной геомеханике. Для понимания процессов взаимодействия современных геодинамических движений с

массивом горных пород и расположенными в нем объектами недропользования этот факт является основополагающим.

Иерархические уровни блочности массива горных пород имеют самые разные масштабы. Размеры блоков в литосфере Земли варьируются от микроскопических до тысяч километров.

Выделяется 5 масштабных уровней в иерархии блоков массива горных пород, в зависимости от их размеров [67]:

IV – Дефекты кристаллической решетки минералов, которые входят в состав породы.

III – Микротрещины, разделяющие кристаллы и небольшие участки массива горных пород. Их размер составляет от 0,01 мм до 10 см по длине.

II – Макротрещины, которые легко заметны в обнажениях пород, их размер составляет от 10 см до 100 м. Они уже изучаются в различных отраслях геологии.

I – Разрывы, которые разбивают массивы горных пород. Обычно они связаны с локальными складчатыми структурами. По своим размерам они условно ограничиваются интервалом от 100 м до 10 км.

0 – Крупные тектонические разрывы, которые разбивают целые участки литосферы, прямо до глубинных разломов. Они уже связаны региональными полями тектонических напряжений.

Например, на II-III уровнях трещины являются границами, разделяющими друг от друга блоки горной породы. По этим границам происходит движение блоков, взаимодействующих таким образом между собой. Совокупность трещин в горной породе являет собой естественную трещиноватость массива горных пород. Таким образом, структурные блоки в массиве горных пород ограничены естественными трещинами, локальными или крупными тектоническими разломами, в зависимости от масштабного уровня (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Обнажение массива горных пород на карьере «Восточный» (Красноярский край) как пример блочно-иерархической среды

Блочная структура массива горных пород имеет непосредственную связь с его напряженно-деформированным состоянием.

Экзогенные и эндогенные факторы, воздействующие на массив горных пород, вызывают в нем деформационные процессы и движения. Под воздействием деформационных процессов происходит формирование и изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород [68]. В свою очередь, общеизвестно, что напряженно-деформированное состояние играет решающую роль в формировании трещиноватости массива горных пород [69-70].

Закономерности пространственной изменчивости полей напряжений изучены пока недостаточно, что отрицательно сказывается на качестве прогнозов, необходимых при геомеханической оценке массива.

Однако, на основании изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород накоплен огромный экспериментальный материал, который дает представление о непростом характере распределения напряжений в горном массиве.

Накопленный опыт исследований показывает, что выявление закономерностей распределения и изменчивости полей напряжений в горных

породах должно основываться на анализе геологических структур. Повышенная неоднородность и изменчивость поля напряжений массива горных пород обусловлена локальными тектоническими структурами. Вместе с тем, в горных породах, расположенных вне зоны влияния тектонических разломов, также проявляется неоднородность поля напряжений, выраженная в меньшей степени [71]. Этим во многом объясняется тот факт, что геологические структуры являются разграничителями блоков в массиве горных пород между собой и выполняют роль поверхностей ослабления, по которым происходят современные геодинамические движения.

Таким образом, в рамках решения задачи диссертационной работы, на основании широкого круга проведенных исследований, установлено, что блочно-иерархическое строение массива горных пород является основополагающим фактором, способствующим формированию современных геодинамических движений.

Структурные блоки массива горных пород имеют разнообразную многогранную форму, обусловленную взаимным расположением трещин и тектонических разломов, которые служат для блоков контактами, а также являются местом локализации и концентрации современных геодинамических движений.

Напряженно-деформированное состояние, характеризующее массив горных пород, имеет неоднородное, дискретное строение, обусловленное расположением вблизи поверхностей раздела, в качестве которых выступают тектонические разломы и трещины, а также взаимной подвижностью блоков, слагающих массив горных пород. Этим фактом обусловлена сложность заблаговременного выявления очагов возникновения деформаций в горном массиве и объектах недропользования. Эту проблему можно решить посредством применения методики мониторинга деформационных процессов в техногенных объектах, позволяющей учитывать влияние современных геодинамических движений на их устойчивость и безопасность.

2.2 Современные геодинамические движения и их параметры

Как было отмечено выше, верхняя часть литосферы Земли расчленена на структурные блоки. Под воздействием эндогенных и экзогенных процессов структурные блоки находятся в непрерывном движении, характеризующемся своей разнонаправленностью и интенсивностью.

Движения структурных блоков происходят по граничным областям, в качестве которых выступают тектонические разломы и трещины. По тектоническим разломам протекают наиболее интенсивные геодинамические движения.

Разломы в массиве горных пород формируют своеобразный тектонический скелет или решетку, которая определяет динамику земной коры. Таким образом тектонические разломы делят верхнюю часть литосферы на геодинамические зоны.

Совокупность геодинамических зон различного масштабного уровня образует геодинамическую структуру массива горных пород, представляющую из себя решетчатую систему (рисунок 2.3).

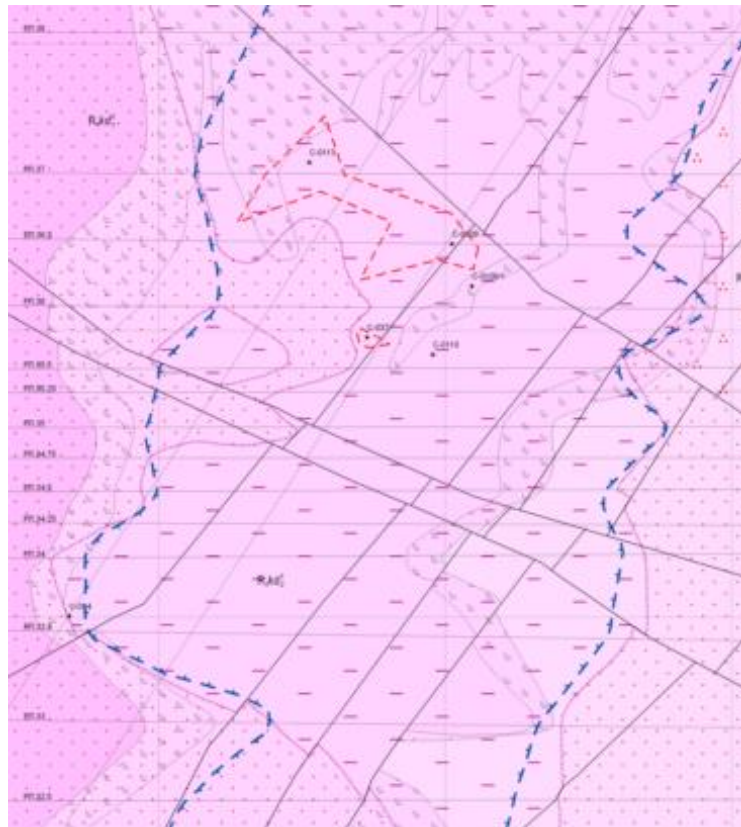


Рисунок 2.3 – Решетчатая система геодинамических зон на месторождении «Титимухта» (Красноярский край)

В некоторых геодинамических зонах природные напряжения могут достигать критических значений, что негативно сказывается на устойчивости и безопасности объектов недропользования. Поэтому выделяют высокоактивные, среднеактивные, низкоактивные и фоновые геодинамические зоны (рисунок 2.4) [72-74].

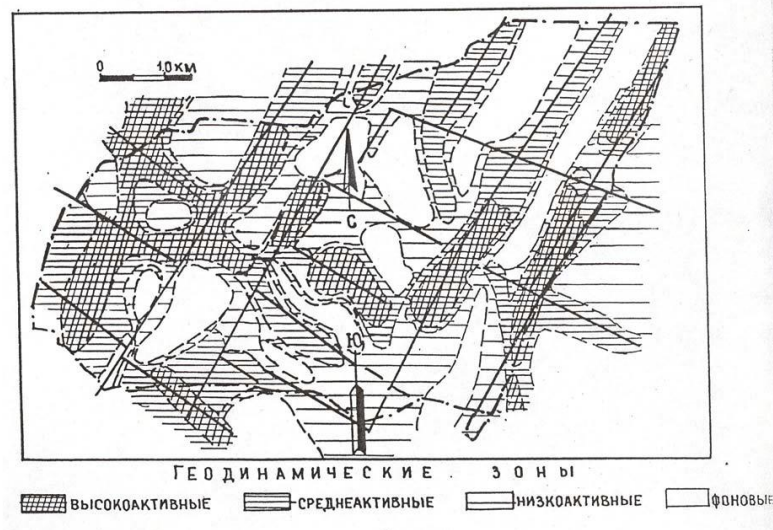


Рисунок 2.4 – Решетчатая система геодинамических зон на шахтном поле им. М.И. Калинина в Донецке

Развитие глобальной тектоники плит в XX веке дало толчок началу инструментального изучения движений земной коры на материках с использованием геофизических и геодезических методов.

Так, например, в СССР в 1960-х годах начались проводиться геомеханические измерения движений верхней части литосферы на специальных геодинамических полигонах, которые изначально располагались в сейсмически активных регионах.

На базе проводимых исследований и измерений в 80-х годах XX века была разработана классификация движений верхней части литосферы, в соответствии с которой современные на тот период смещения по разрывам делились на медленные тектонические (крип) и быстрые, связанные с землетрясениями (сейсмотектонические дислокации).

Было выявлено, что криповые смещения зачастую неравномерны. Скорости крипа могут изменяться в течение нескольких лет, одного года, месяца, суток, и даже в течение часа или 10-30 минут. Максимальные известные значения криповых

смещений достигают величин, опасных для многих видов объектов недропользования. Однако, стоит отметить, что области, характеризующиеся наиболее активными криповыми движениями, были приурочены к эпицентральной зоне крупных землетрясений.

С позиции приближенности к очагам возникновения землетрясений изучались и сейсмотектонические дислокации. Было установлено, что опасные для техногенных объектов сейсмотектонические смещения могут возникать в разрывных зонах на поверхности земли при землетрясениях с магнитудой $>5,5$ и силой более VIII баллов.

В конце 1980-х годов Ю.О. Кузьминым, на основании обобщения результатов мониторинга деформационных процессов, полученных на геодинимических полигонах в районах дислокации нефтяных месторождений, были выявлены аномальные деформации и современные геодинимические движения в районах тектонических разломов (рисунок 2.5) [75].

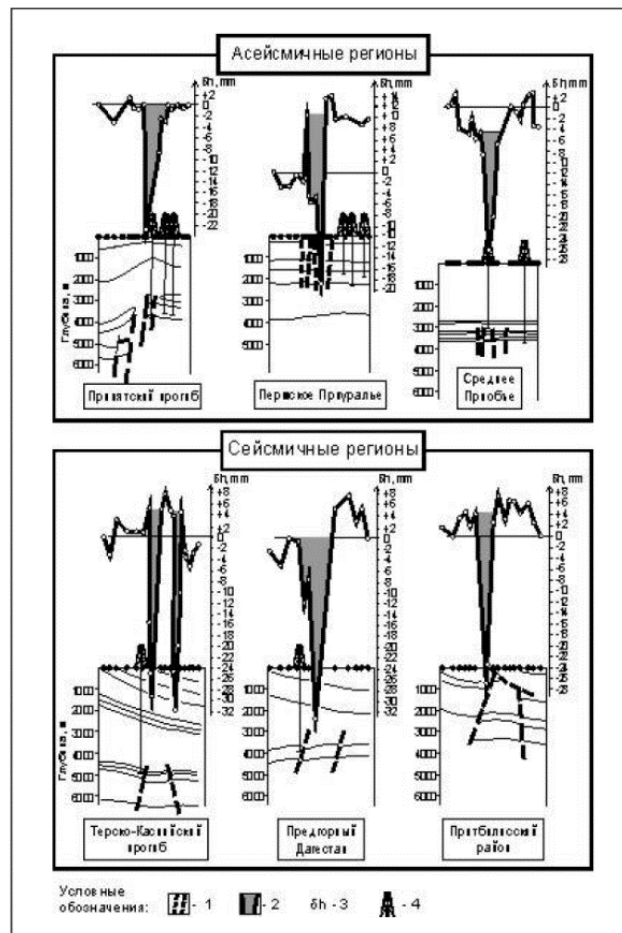


Рисунок 2.5 – Амплитуды суперинтенсивных современных геодинимических движений

Было установлено, что современные геодинамические движения являются высокоамплитудными (50-70 мм/год), периодичными (0,1-1 год), пространственно локализованными (0,1-10 км), а также обладают знакопеременной направленностью. Их среднегодовые скорости составляют величины порядка $2-7 \times 10^{-5}$ /год. По этой причине они называются суперинтенсивными деформациями земной поверхности в зонах разломов [76].

Ю.О. Кузьмин проводил данные исследования на основе результатов геометрического нивелирования. Однако, с появлением современных высокоточных технологий проведения геодезических измерений (в частности GPS) появились новые возможности изучения геодинамических движений при решении важнейших задач геомеханики.

На основе многолетнего изучения современных геодинамических движений исследователями ИГД УрО РАН была разработана и регулярно пополняется база экспериментальных данных, содержащая в себе параметры современных геодинамических движений [77].

Современные геодинамические движения распространены повсеместно. На других континентах, как например, в Северной Америке, геомеханиками предпринимаются весьма успешные попытки мониторинга короткопериодных движений земной коры со сверхвысокими частотами >100 Гц. Для этого исследователями также используются технологии спутникового позиционирования GPS [78].

Стоит отметить, что на Западе аналогичные геомеханические исследования и инструментальные наблюдения современных геодинамических движений производятся в основном в сейсмически активных регионах.

Таким образом, современные геодинамические движения условно можно разделить на длиннопериодные и трендовые.

К длиннопериодным движениям относят те движения, циклы которых определяются посредством нескольких серий наблюдений с периодичностью раз в полгода или в год.

К трендовым движениям можно отнести такие движения, которые можно получить при проведении повторных измерений на геодезических пунктах с уже определенными ранее координатами. Координаты этих пунктов могут быть определены 10-15 лет назад или более [79].

Современные геодинамические движения распределены в массиве горных пород повсеместно, независимо от сейсмической активности региона, сохраняя наибольшую концентрацию на границах вторичных структурных блоков. В межграницных блоковых областях современные геодинамические движения также присутствуют, но проявляются уже в меньшей степени, по сравнению со степенью их локализации в граничных зонах.

Концентрация современных геодинамических движений на границах вторичных структур вызывает изменчивость и неоднородность напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Под воздействием современных геодинамических движений массив горных пород и присутствующие в нем объекты недропользования деформируются неравномерно, локально. Этот факт затрудняет своевременное выявление начала процесса нарушения устойчивости техногенных объектов. По этой причине современные геодинамические движения считаются наиболее опасными для сохранения устойчивости и обеспечения геомеханической безопасности объектов недропользования.

Таким образом, разрабатываемая в диссертационной работе методика мониторинга деформационных процессов, должна учитывать неоднородность и мозаичность поля напряжений массива горных пород и объектов недропользования, а также их неравномерное деформирование, обусловленное влиянием современных геодинамических движений.

Это позволит своевременно выявлять зарождающиеся деформационные процессы, в формировании которых принимают участие современные геодинамические движения.

2.3 Явление вторичного структурирования и его роль в концентрации параметров современных геодинамических движений

Основной задачей диссертационной работы является разработка и обоснование методики мониторинга деформационных процессов, которая учитывает и выделяет воздействие современных геодинамических движений как один из решающих факторов в нарушении устойчивости объектов недропользования из всей совокупности техногенных и природных факторов. Данная методика обеспечит геомеханическую безопасность ведения горных работ, эксплуатации и долговечности техногенных объектов под воздействием современных геодинамических движений, вызванных влиянием естественных процессов, протекающих в массиве горных пород.

Для решения этой и других задач необходимо систематическое изучение процессов самоорганизации и деструкции природной среды как одного из ключевых геомеханических факторов, влияющих на устойчивость и безопасность эксплуатации сложноконструктивных сооружений и объектов.

Процессы деструкции и самоорганизации определяют блочно-иерархическую структуру земной коры. Они протекают как в естественных условиях, так и в областях техногенного воздействия объектов недропользования, и относятся к важнейшим геомеханическим факторам, формирующим напряженно-деформированное состояние массива горных пород, а также его дискретность. Эти процессы абсолютно противоположны по своему значению. Суть процесса деструкции заключается в разделении массива на структурные блоки независимо от масштабного порядка, а процесс самоорганизации, в свою очередь, формирует из них новые блоки разных иерархических уровней [80]. Таким образом происходит процесс вторичного структурирования массива горных пород. На границах вновь образованных вторичных структурных блоков аккумулируется концентрация современных геодинамических движений, приводящих в движение массив горных пород.

Под воздействием современных геодинамических движений в массиве горных пород формируется напряженно-деформированное состояние, которое изначально является относительно однородным по своим параметрам. Образование неоднородности в поле напряжений, действующем внутри массива горных пород, возникает по причине дискретности границ между вторичными структурными блоками, а также вследствие концентрации на этих границах современных геодинамических движений. В процессе движения образованных вторичных структурных блоков друг относительно друга происходит взаимодействие их граней и характерных элементов (рисунок 2.6).

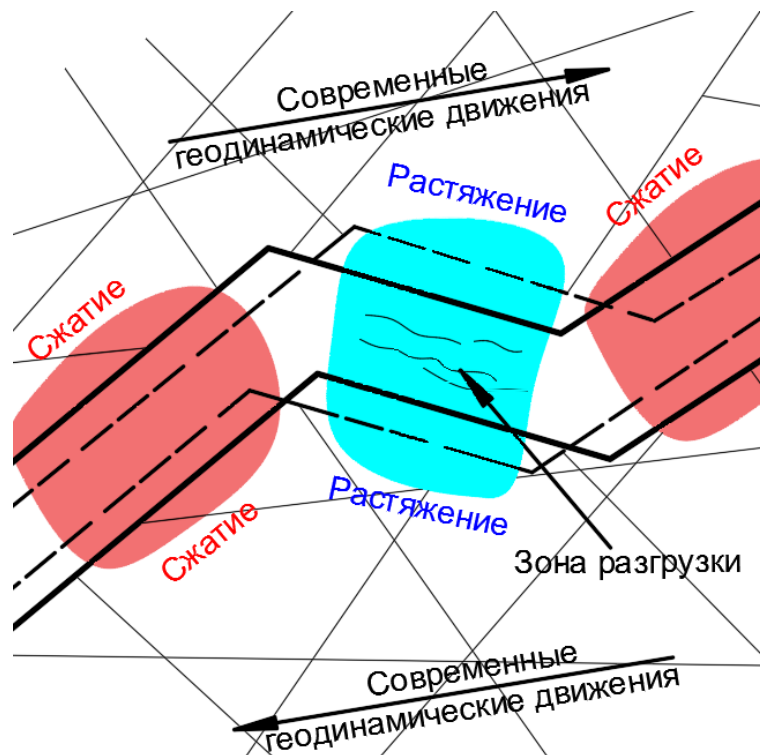


Рисунок 2.6 – Формирование зон концентрации современных геодинамических движений на границах вторичных структур [81]

Соседние структурные блоки одновременно надвигаются и расходятся друг с другом, формируя при этом, соответственно, очаги концентрации и разгрузки сжимающих напряжений и деформаций [82].

Именно эти вышеописанные механизмы являются основополагающими факторами в процессе формирования блоковых структур и параметров напряженно-деформированного состояния массива. Под действием таких

механизмов формируются вторичные структурные блоки, концентрирующие на своих границах современные геодинамические движения.

Однородность напряженно-деформированного состояния нарушается под действием взаимных перемещений границ вторичных структурных блоков, создавая тем самым потенциальные очаги катастрофических событий. Очаги катастрофических событий, возникающие в зонах концентрации напряжений, могут выражаться в виде наведенной сейсмичности, проявляющейся как техногенные землетрясения. Очаги катастрофических событий, зарождающиеся в зонах разгрузки сжимающих напряжений, проявляются в виде оседаний земной поверхности с вероятным образованием даже зон обрушений [83].

В пассивном, неподвижном массиве горных пород проявления деструкции и самоорганизации исключаются. Для их реализации необходимо изменение напряженно-деформированного состояния, источником которых в естественных условиях выступают современные геодинамические движения. В областях влияния техногенной деятельности к современным геодинамическим движениям добавляются техногенные геомеханические движения, сопровождающие нарушение естественного и формирование вторичного напряженно-деформированного состояния.

Необходимым условием процессов деструкции и самоорганизации массива горных пород в естественных условиях и в областях техногенного влияния является непрерывная подвижность массива горных пород, выступающая как форма его существования. Только в движении и в условиях постоянного изменения напряженно-деформированного состояния могут реализоваться эти процессы в структурных блоках разных размеров, определяемых параметрами происходящих изменений и масштабом их локализации [84].

Концентрация современных геодинамических движений на границах вторичных структур изучается и подтверждается различными геофизическими и геодезическими методами.

На горнодобывающих, промышленных и гражданских объектах используется метод структурно-геодинамического картирования, позволяющий

определять местоположение тектонических разломов по содержанию радиоактивных и метануглекислых газов в почвенном воздухе. Также, с помощью этого метода есть возможность выявления геодинамических движений массива горных пород, протекающих по разломам, являющимся границами вторичных структурных блоков.

С помощью данного метода были выявлены зоны активных тектонических нарушений при строительстве нефтегазовых трубопроводов в Краснодарском крае, в Республике Башкортостан, на Сахалине и в других регионах. На границах этих зон установлена повышенная концентрация движений массива горных пород, негативно влияющая на безопасность и устойчивость объектов недропользования.

На Ковдорском месторождении учеными КНЦ РАН выполняются исследования активности разломов, регулярно проводится инженерно-структурное районирование массива, позволяющее в трехмерном виде получить информацию о расположении тектонических разломов различных рангов и структурных доменов трещиноватости в массиве горных пород [85-86].

Очень эффективным является геодезический метод определения наличия современных геодинамических движений в массиве горных пород с помощью спутникового GPS-позиционирования. На основании использования этого метода, в совокупности с геофизическим, на многочисленных промышленных объектах, учеными ИГД УрО РАН во главе с А.Д. Сашуриным выявлено существование короткопериодных современных геодинамических движений, которые характеризуются переменностью напряженно-деформированного состояния и находятся в непрерывном взаимодействии с иерархично-блочным массивом горных пород. Находясь в таких условиях, массив горных пород подвергается вторичному структурированию, при котором напряженно-деформированное состояние приобретает дискретный характер и неоднородность, определяемые вторичными структурными блоками.

Таким образом, в качестве модели формирования очагов катастрофических событий природно-техногенного характера можно представить иерархически блочный массив, обладающий способностью к самоорганизации и

геодинамической подвижности, вызывающей процессы вторичного структурирования и изменение напряженно-деформированного состояния [87]. Возможность протекания этих процессов в массиве горных пород напрямую зависит от влияния современных геодинамических движений, действующих непрерывно.

Современные геодинамические движения концентрируются на границах вторичных структурных блоков и принимают непосредственное участие в формировании дискретного напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Для решения задач настоящей диссертационной работы по разработке и обоснованию методики мониторинга деформационных процессов, формирующихся под воздействием современных геодинамических движений, этот факт является основополагающим.

2.4 Механизм взаимодействия объектов недропользования с массивом горных пород

Влияние современных геодинамических движений на безопасность эксплуатации и устойчивость объектов недропользования подтверждается многочисленными геомеханическими исследованиями.

Как уже говорилось выше, массив горных пород имеет блочно-иерархическое строение и находится в непрерывном подвижном состоянии под воздействием современных геодинамических движений. При этом воздействии в массиве горных пород протекают процессы самоорганизации и вторичного структурирования. Наибольшая концентрация современных геодинамических движений выявлена на границах образованных вторичных структур, что подтверждается результатами геомеханического мониторинга деформационных процессов, выполненных методами геофизики и спутниковой геодезии на объектах недропользования различного назначения.

Рассматривая механизм деформирования объектов недропользования можно представить, что, например, при возведении фундаментов различного рода сооружений вблизи вторичных структурных блоков, спустя определенное время

эти сооружения будут сами реагировать на геодинамические движения. Возникающие в массиве горных пород волны сжатия-растяжения с усилием от 0,05 до 0,3 МПа будут воздействовать на фундаменты. Совокупная энергия воздействия суточных, годовых, многолетних растяжений-сжатий оснований объектов совместно с возможными резонансными явлениями могут привести к деформациям. Даже если эти деформации произойдут на уровне межзернового пространства или микротрещин, то целостность техногенного объекта будет нарушена. Под воздействием современных геодинамических движений объект недропользования будет вести себя не как единое целое, отдельные его части будут по-разному реагировать на это воздействие, что в конечном счете может привести к его разрушению [88].

Взаимосвязь гидрогеологических, структурно-тектонических и геодинамических характеристик массива горных пород имеет большое значение при прогнозировании развития опасных геомеханических процессов, протекающих под воздействием современных геодинамических движений. Степень трещиноватости горных пород и наличие тектонических разломов напрямую влияют на фильтрационные свойства массива. Современные геодинамические движения провоцируют активизацию развития трещиноватости и переход массива в дезинтегрированное состояние, предопределяя образование зон критических деформаций массива горных пород, залегающего в основании инженерных сооружений и вызывая их разрушение.

В качестве примера можно привести разрушение опор моста через реку Сосьва. В результате геомеханического анализа разрушения было установлено, что мост построен в районе активной геодинамической зоны. Дезинтегрированный массив горных пород при наличии высокой обводненности приобрел тиксотропные свойства, способствуя при этом образованию плывунов. Опоры моста, попав в эту зону, со временем потеряли свою несущую способность и деформировались, что привело к разрушению моста (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Деформации моста через реку Сосьва

Таким образом, циклические смещения и нагрузки в тектонических разломах, расположенных в массиве, поддерживают проявление элементов тиксотропии, значительно уменьшающих деформационные и прочностные свойства пород и без того дезинтегрированного массива в разломе. Это, в свою очередь, вызывает неравномерные проседания оснований и деформации объекта недропользования.

Факт концентрации современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков в большей степени, по сравнению с межблочными областями массива горных пород, установлен в результате проведения геомеханических исследований на объектах горнодобывающей промышленности.

Например, на шахтах Сарановская-Рудная и Магнетитовая (Высокогорский ГОК) в 2001 году специалистами ИГД УрО РАН были проведены измерения движений массива горных пород методами спутниковой геодезии несколькими сериями, продолжительностью 6-12 часов каждая. Были выявлены вертикальные деформации земной поверхности величиной 1-3мм, что соответствует оценке погрешности проведенных измерений. Таким образом, ученые пришли к выводу, что данные деформации не относятся к действию современных геодинамических движений [89].

Можно привести ряд других примеров исследований, подтверждающих влияние современных геодинамических движений на устойчивость объектов недропользования. Показательна произошедшая в 2009 году авария на Саяно-Шушенской ГЭС, источником которой являются, как раз, структурные

особенности массива горных пород на участке ГЭС, и протекающие в нем современные геодинамические движения, а также их взаимодействие с техногенной системой ГЭС.

Также, при выполнении работ по выявлению причин аварийных разрывов нефтепровода и канализационных коллекторов в городе Сургуте и его окрестностях, исследователями ИГД УрО РАН было установлено, что амплитуды вертикальных и горизонтальных деформаций в изучаемых районах имеют близкие значения. Максимальная абсолютная величина горизонтальных деформаций составляет 35-37 мм, вертикальных деформаций – 86-108 мм. При анализе частотных характеристик протекающих в массиве колебаний были выделены гармоники с продолжительностью периодов от 30 до 60 минут. При этом увеличение периода съема данных влекло за собой сглаживание динамики колебаний – из волновой картины исчезали короткопериодные колебания [90].

Уровень напряжений и деформаций, вызванных смещениями с циклами продолжительностью менее одной минуты, превысил допустимые значения для монолитной железобетонной обделки коллекторов, закрепленных железобетонными тубингами, что и привело к их разрушению. Этому также способствовало проявление под воздействием современных геодинамических движений явления тиксотропии в массиве горных пород, вмещающем в себя рассматриваемые объекты недропользования.

Также можно привести пример аварии в городе Нижний Тагил в 2009 году, когда в результате действия современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков произошли деформации земной поверхности, что послужило причиной существенного деформирования железнодорожных путей (рисунок 2.8). Никаких предпосылок для возникновения данных деформаций не было, но структурные особенности массива под влиянием современных геодинамических движений способствовали этой аварии.



Рисунок 2.8 – Деформации железнодорожных путей в г. Нижний Тагил

Концентрация современных геодинамических движений в районах тектонических разломов подтверждается результатами геодезического мониторинга зданий и сооружений в регионах Крыма, восточной Украины, европейской части России. На основании данных геомеханического мониторинга установлено, что наиболее опасно нахождение объектов на границах геодинамических блоков и зон [91]. Это связано с наибольшей концентрацией геодинамических движений в этих зонах.

Результатами геомеханических исследований по обнаружению активных с позиции концентрации современных геодинамических движений зон в массиве в ряде случаев является предупреждение возникновения аварийных ситуаций. Например, после обнаружения активных тектонических структур в районе строительства жилого комплекса в городе Красногорске, специалистами АО «Фундаментпроект» было рекомендовано сместить проектируемые объекты во внутренние однородные блоки, что позволило избежать деформаций объекта, вызванных современными геодинамическими движениями.

Как видно из приведенного выше анализа, наибольшая концентрация современных геодинамических движений присутствует на границах вторичных структурных блоков, в качестве которых выступают тектонические нарушения

различного ранга. Расположение техногенных объектов вблизи этих зон может повлечь за собой опасность деформирования сооружения или его разрушение. Проведение геомеханического мониторинга деформационных процессов при помощи существующих методик является малоэффективным, так как под воздействием современных геодинамических движений техногенные объекты деформируются неравномерно, локально.

В связи с этим, на сегодняшний день существует актуальность и необходимость обоснования системы мониторинга деформационных процессов, позволяющей учесть неоднородность деформирования массива горных пород, а также расположенных в нем объектов недропользования, под воздействием современных геодинамических движений, концентрирующихся на границах вторичных структурных блоков.

Выводы

1. Массив горных пород имеет иерархично-блочное строение, сформированное в результате действия процессов деструкции, и продолжающее свое развитие в процессе самоорганизации и вторичного структурирования.

2. На границах вторичных структурных блоков выделяются зоны концентрации геодинамических движений, под действием которых формируется напряженно-деформированное состояние массива, характеризующееся дискретностью и неоднородностью. Под влиянием современных геодинамических движений иерархические блоки, слагающие массив, находятся в постоянном и непрерывном движении, воздействуя при этом на целостность техногенных объектов.

3. Безопасность эксплуатации и устойчивость объектов недропользования напрямую зависит от их расположения относительно границ вторичных структурных блоков. Вследствие дискретности поля напряжений на границах структурных блоков процесс деформирования объектов недропользования протекает с различной скоростью, а также неравномерно. Таким образом, опасность воздействия современных геодинамических движений на целостность

техногенных объектов выражается неоднородностью деформационных процессов, протекающих под их воздействием.

4. Для выделения степени участия современных геодинамических движений в формировании деформационных процессов на объектах недропользования необходимо использование системы мониторинга, позволяющей учитывать влияние современных геодинамических движений как один из решающих факторов в нарушении устойчивости сооружений. Данная методика должна обеспечивать выявление деформаций, характеризующихся своей неоднородностью и разнонаправленностью, что специфично для деформационных процессов, формирующихся под действием современных геодинамических движений.

3. Разработка системы мониторинга деформационных процессов объектов недропользования

3.1 Обоснование требований к результатам проведения мониторинга деформационных процессов

Под воздействием современных геодинамических движений техногенный объект и вмещающий его массив горных пород испытывают неравномерные деформации. При этом формируется дискретное и неоднородное по своей структуре напряженно-деформированное состояние, которое способствует проявлению локального нарушения устойчивости объекта.

Для своевременного обнаружения деформаций, возникающих под влиянием современных геодинамических движений, необходимо проведение геомеханического мониторинга, способного выделить степень их воздействия из всей совокупности техногенных и природных факторов, участвующих в процессе нарушения устойчивости объекта недропользования, обеспечив при этом точность и достоверность результатов измерений.

Сам по себе комплекс геомеханического мониторинга включает в себя непосредственно инструментальные наблюдения, целью которых является выявление изменения геометрических и пространственных параметров объекта и вмещающего его массива горных пород, а также интерпретацию полученных результатов измерений применительно к обоснованию степени участия современных геодинамических движений в деформировании и нарушении устойчивости объекта недропользования. Без объективной и качественной интерпретации результатов мониторинга задача по выделению действия современных геодинамических движений в конкретных условиях становится практически невыполнимой.

При интерпретации результатов мониторинга деформационных процессов должны учитываться данные, отражающие инженерно-геологические условия места расположения техногенного объекта; геомеханическая характеристика горных пород, включающая в себя структурные особенности и физико-

механические свойства исследуемого массива; данные о поле напряжений, действующем в границах расположения техногенного объекта; гидрогеологическая характеристика рассматриваемого участка; а также другие показатели, способные оказать влияние на устойчивость и целостность техногенных объектов.

Для решения геомеханической задачи по выявлению деформаций, возникающих под воздействием современных геодинамических движений, на основании проведения инструментальных измерений должны быть получены следующие параметры:

1. Высотные отметки основных конструктивных элементов техногенного объекта. Основными конструктивными элементами можно считать уступы, транспортные и предохранительные бермы открытых горных выработок; почва, кровля, стенки и сопряжения подземных горных выработок; несущие конструкции сложноконструктивных сооружений промышленного и гражданского назначения, а также другие ответственные элементы конструкции, разрушение которых несет угрозу целостности и безопасности эксплуатации основного объекта.

По результатам измерений высотных отметок основных конструктивных элементов, полученных за несколько серий наблюдений, появляется возможность оценки неравномерности вертикального деформирования и оседания исследуемого объекта, характерных для действия современных геодинамических движений.

На рисунке 3.1 показана принципиальная схема неравномерных вертикальных деформаций массива горных пород в карьере. Как видно из рисунка, в западной части карьера, ограниченной тектоническим разломом (выделен зеленым цветом), на реперах преимущественно наблюдается осадка, а в восточной части – поднятие. Выраженный циклический процесс неравномерных осадок может говорить о том, что данный тектонический разлом является границей вторичного структурного блока, на которой происходит концентрация современных геодинамических движений. Таким образом, неравномерные деформации бортов карьера могут быть вызваны влиянием современных геодинамических движений.

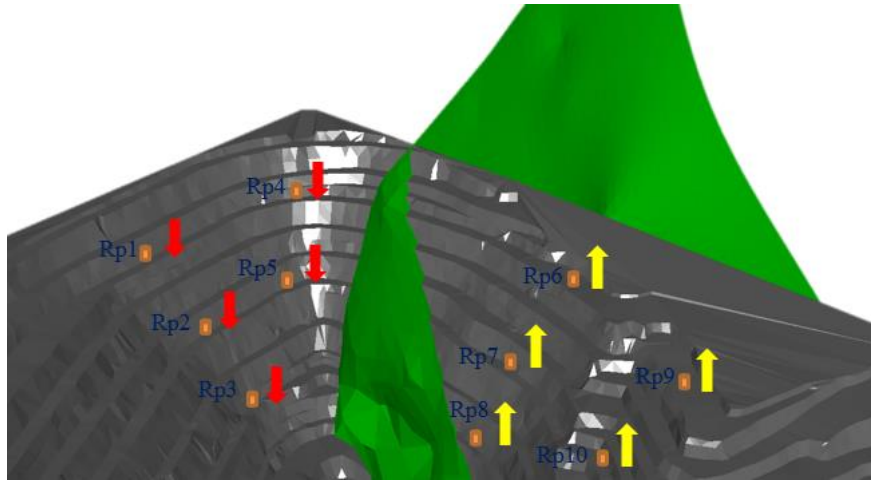


Рисунок 3.1 – Вариант проявления неравномерных вертикальных деформаций, вызванных влиянием современных геодинамических движений

2. Высотные отметки поверхности массива горных пород, вмещающего техногенный объект. Этот параметр позволяет оценить неравномерность вертикальных деформаций и оседаний земной поверхности. На основе данной оценки можно предположить возникновение деформаций в сооружениях, произошедших под воздействием современных геодинамических движений.

На рисунке 3.2 показана принципиальная схема неравномерной осадки земной поверхности вследствие циклического воздействия современных геодинамических движений по поверхности тектонического разлома. Последствиями неравномерных вертикальных оседаний могут быть дальнейшие деформации сооружения.

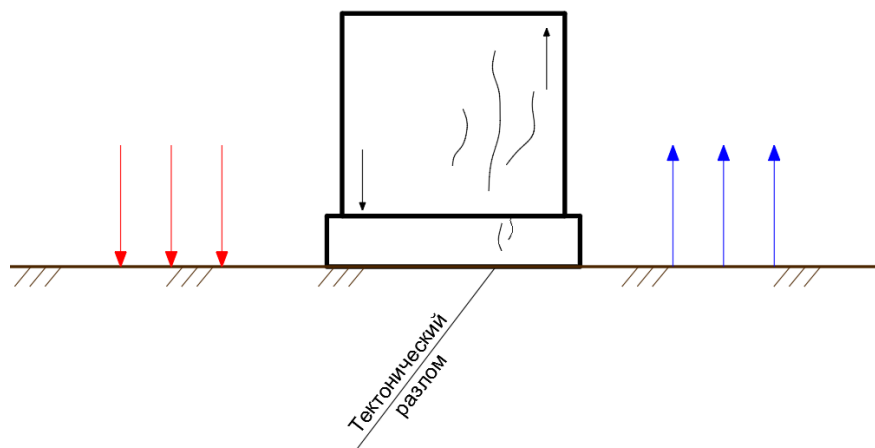


Рисунок 3.2 – Вариант проявления неравномерных циклических вертикальных деформаций земной поверхности, вызванных влиянием современных геодинамических движений и влекущих деформации сооружения

3. Результаты измерения напряженно-деформированного состояния в массиве и конструкциях зданий и сооружений. Дискретность и неоднородность поля напряжений присуща областям наибольшей концентрации современных геодинамических движений. По этому показателю появляется возможность выявления наиболее уязвимых мест в элементах и конструкциях техногенных объектов, которые в дальнейшем можно использовать для заложения наблюдательной станции с целью проведения геотехнического мониторинга. Вариант неоднородного напряженно-деформированного состояния в зонах тектонических нарушений, аккумулирующих современные геодинамические движения, представлен на рисунке 3.3.

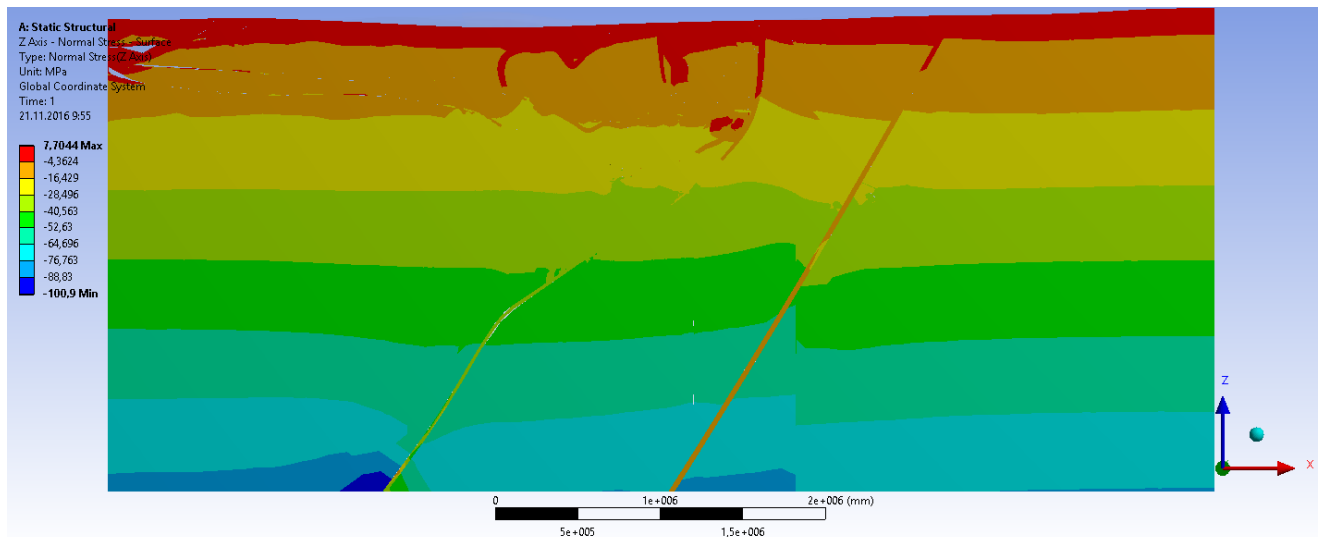


Рисунок 3.3 – Вариант проявления неоднородного напряженно-деформированного состояния в областях тектонических разломов, сформированного под воздействием современных геодинамических движений

4. Горизонтальные деформации основных конструктивных элементов техногенных объектов, а также вмещающего их массива горных пород. Неравномерность и разнонаправленность горизонтальных деформаций характерны для действия современных геодинамических движений, поэтому результаты мониторинга горизонтальной компоненты сдвижения необходимо учитывать при интерпретации. Проявившись изначально в массиве горных пород, с течением времени деформации могут быть переданы техногенному объекту, тем самым причинив ему серьезный ущерб.

Хорошим примером, показывающим необходимость измерения горизонтальных смещений при проведении мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, является всемирно известный разлом Сан-Андреас в Калифорнии (США) (рисунок 3.4).

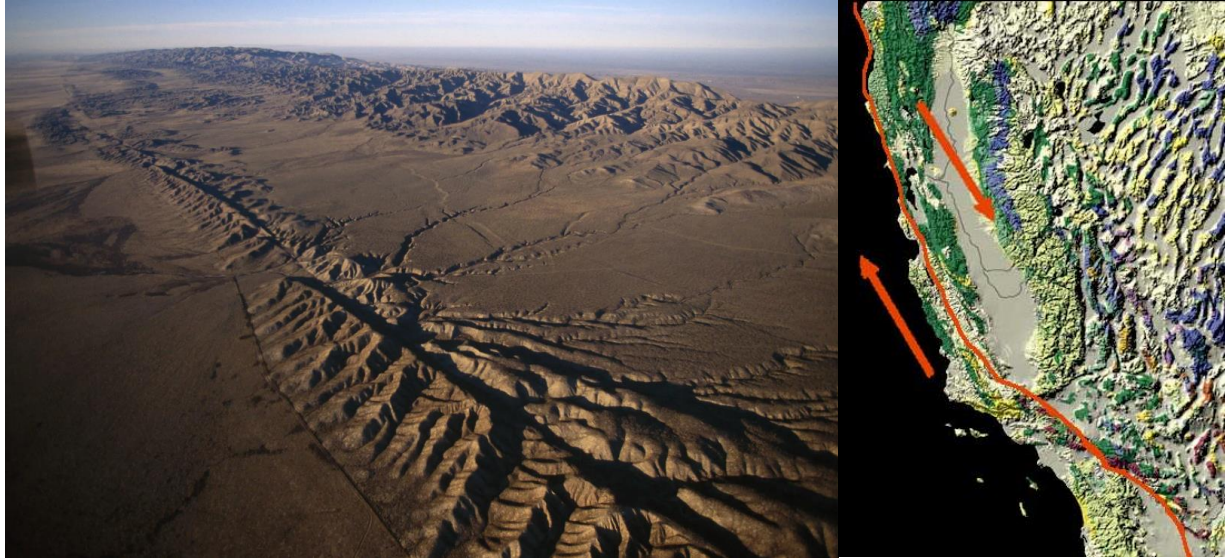


Рисунок 3.4 – Разлом Сан-Андреас в Калифорнии. Слева – фото разлома; справа – направление горизонтальных движений разлома [92]

Все вышеуказанные параметры должны быть получены путем производства инструментальных измерений, обеспечивающих точность, необходимую для оценки величины протекающих деформаций применительно к допустимым нормативным значениям. Допустимые нормативные значения деформаций техногенных объектов для открытых горных выработок, подземных горных выработок, земной поверхности при строительстве гражданских и промышленных сооружений, а также конструктивных элементов зданий и сооружений приведены в таблицах 3.1-3.5 соответственно.

Таблица 3.1 – Допустимые деформации массива пород для горных выработок

КЗУ	Значение деформации/смещения	Визуальное проявление деформации
$\geq 1,3$	$1 \cdot 10^{-3} / -$	Упругая деформация, не заметна глазу
1,2-1,3	-0,2-0,3м	Появление микро- и макротрещин
1,1-1,2	$(10-30) \cdot 10^{-3} / 1,5-2\text{м}$ и более	Появление видимых заколов и трещин
$\leq 1,05$	∞	Разрушение бортов

Таблица 3.2 – Допустимые деформации массива пород для горных выработок [93]

Выработки	Значения допустимых деформаций	
	Растяжение (+) или сжатие (-), $1 \cdot 10^{-3}$	Наклон, $1 \cdot 10^{-3}$
Главные вертикальные и наклонные шахтные стволы с механическим подъемом (рудоподъемные, для спуска и подъема людей), в том числе слепые	-0,3	2,0
Основные околоствольные выработки, подземные камеры с механическим подъемом	+1,0	-
Откаточные штольни, этажные откаточные квершлагги, главные откаточные штреки, уклоны, подземные камеры, склады ВВ, электровозные депо, подземные механические мастерские	+2,0	-

Таблица 3.3 – Допустимые деформации земной поверхности для гражданских сооружений [94]

Назначение здания	Этажность	Длина здания, м	Допустимые горизонтальные деформации, $1 \cdot 10^{-3}$
Дошкольные детские учреждения, больницы, поликлиники, школы, бани, театры, дворцы культуры	1-3	Менее 15	5
		15-30	3,5
		31-30	2,5
		60	2
	4-5	Менее 15	6
		15-30	4
		31-30	3
		60	2,5
Жилые здания, гостиницы	1-3	Менее 15	5,5
		15-30	3,5
		31-30	2,5
		60	2
	4-5	Менее 15	6,5
		15-30	4,5
		31-30	3
		60	2,5
Учреждения бытового обслуживания, вспомогательные здания	1-3	Менее 15	6
		15-30	4
		31-30	3
		60	2,5
	4-5	Менее 15	6,5
		15-30	4,5
		31-30	3
		60	2,5

Таблица 3.4 – Допустимые деформации земной поверхности для промышленных сооружений

Назначение зданий	Длина здания или отсека, м	Растяжение или сжатие, $1 \cdot 10^{-3}$	
		Для каркасных зданий	Для бескаркасных или с неполным каркасом
Центральные и групповые обогатительные фабрики	Менее 15	5,5	4,5
	15-30	3	2,5
	31-45	2,5	2
	46-72	2	2
Производственные помещения, АБК, заводские лаборатории, центральные электромеханические мастерские, шахтные и заводские котельные	Менее 15	8	5,5
	15-30	4,5	3
	31-45	4	2,5
	46-72	3,5	2
Административно-хозяйственные и складские помещения, компрессорные станции, шахтные электровозные депо, здания электроподстанций, здания рудничных вентиляторов	Менее 15	10	8
	15-30	6	4,5
	31-45	5	4
	46-72	4,5	3,5

Таблица 3.5 – Предельные величины деформаций зданий и сооружений

Наименование и конструктивные особенности здания или сооружения	Категория состояния конструкции	Предельные дополнительные деформации			
		Максимальная осадка s_{max} , см	Относительная разность осадок $\Delta s/L$	Крен i	Кривизна подошвы фундамента ρ , 1/м
Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из крупных блоков или кирпичной кладки без армирования	I	4,0	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	II	3,0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	III	1,0	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$
	IV	0,4	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$
	IV*	0	0	0	0
Многоэтажные и одноэтажные здания исторической застройки или памятники истории, культуры и архитектуры с несущими стенами из кирпичной кладки без армирования	I	-	-	-	-
	II	1,0	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	III	0,4	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
	IV	0,2	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$
	IV*	0	0	0	0

Выполнение вышеописанных требований к результатам проведения геомеханического мониторинга наряду с качественной их интерпретацией даст достоверную оценку степени участия современных геодинамических движений в деформационных процессах объектов недропользования.

3.2 Конструкция наблюдательной станции

Наблюдательная станция представляет собой совокупность реперов или марок (исходных и рабочих), заложенных по определенной системе на земной поверхности и в конструктивных элементах техногенных объектов [95], с целью проведения инструментальных измерений деформаций, возникающих под воздействием современных геодинамических движений.

Конструкция наблюдательной станции должна учитывать следующие особенности действия современных геодинамических движений:

1. *Непрерывность современных геодинамических движений.* Современные геодинамические движения протекают в массиве горных пород непрерывно, с различными частотами. Конструкция наблюдательной станции должна обеспечивать непрерывную, в течение времени съемочного процесса, фиксацию деформаций массива горных пород или техногенного объекта, происходящих с участием современных геодинамических движений.

2. *Неоднородность, неравномерность деформационного процесса, протекающего под воздействием современных геодинамических движений.* Конструкция наблюдательной станции должна обеспечивать получение результатов инструментальных наблюдений и учитывать неравномерность деформирования объекта недропользования под воздействием современных геодинамических движений.

Наблюдательная станция, используемая для мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, состоит из сети опорных и рабочих реперов. Опорные реперы – это реперы, заложенные на участке наблюдательной станции, в минимальной степени подвергающемся сдвигению, и служащие исходными для производства инструментальных наблюдений на рабочих реперах. Рабочие реперы – реперы, предназначенные для определения величин смещений и деформаций наблюдаемого объекта, пространственное положение которых определяется относительно опорных реперов.

Для создания опорной сети с целью проведения мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений необходимо использовать 3 и более репера. Это позволит при дальнейшей обработке результатов измерений построить замкнутые фигуры, оценить их невязки и произвести уравнивание. Сеть опорных реперов должна удовлетворять критерию их единовременной видимости с места установки измерительного оборудования (например, высокоточного роботизированного тахеометра), что позволит выполнить привязку точки его стояния.

Ввиду повсеместного распространения современных геодинамических движений в массиве горных пород, обеспечить абсолютную неподвижность опорных реперов не представляется возможным. Однако, так как известно, что в междублоковых областях подвижки минимальны по сравнению с граничными зонами, этот факт необходимо учитывать при выборе места расположения сети опорных реперов.

Таким образом, выбор места расположения сети опорных реперов производится на основе геолого-структурной характеристики исследуемого участка массива горных пород. Для обеспечения наименьшей подвижности опорных реперов их необходимо располагать в междублоковых областях на максимальном удалении от разломных зон, являющихся границами вторичных структурных блоков. Также, необходимо избегать размещения исходных (опорных) реперов в границах зоны сдвижения горных пород, вызванного преимущественно техногенными факторами (рисунок 3.5).

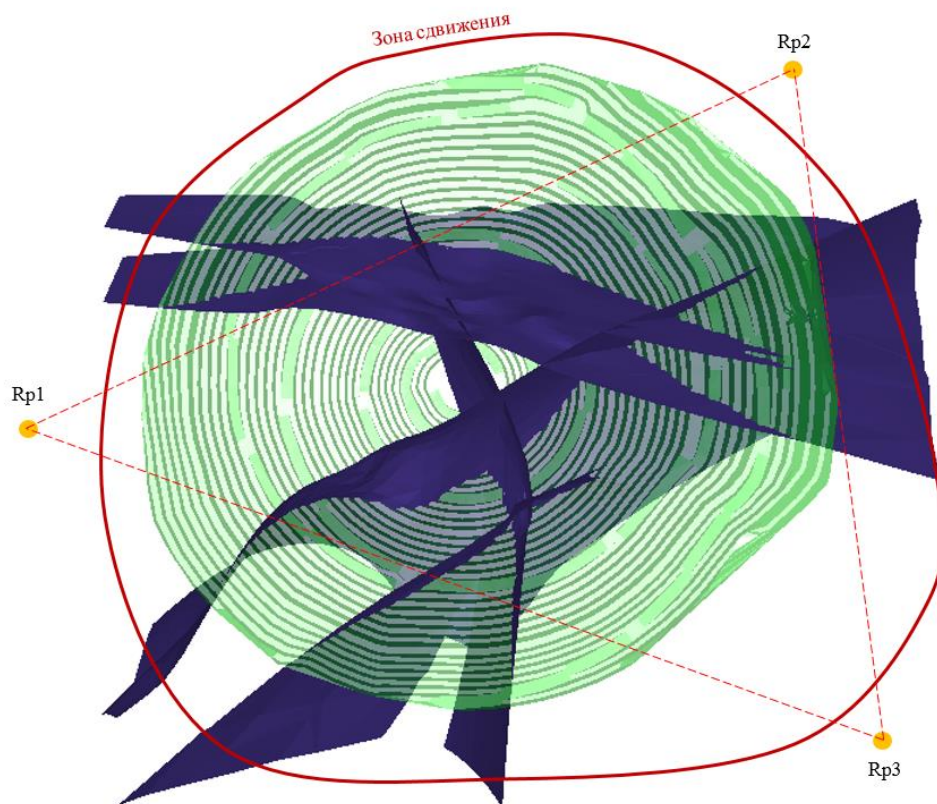


Рисунок 3.5 – Пример расположения сети исходных (опорных) реперов в междублоковых областях

Подвижки, произошедшие под влиянием современных геодинамических движений в междублоковых областях, будут снивелированы при дальнейшей обработке результатов измерений путем уравнивания съемочной сети.

Конструкция репера опорной сети должна обеспечивать его неподвижность под влиянием внешних факторов (влияние работающей техники и людей, подмыв подземными водами, карстовые процессы и др.). Для этой цели опорные реперы устанавливаются в местах отдаления от работающей тяжелой техники, а также за

зоной сдвижения массива горных пород. При заложении репера обустраивают якорь из цементно-песчаной смеси. Для установки антенны GPS-приемника и отражателя в конструкции репера предусмотрен штырь с резьбой и колпачком, защищающим резьбу от внешних воздействий (рисунок 3.6, слева).

Аналогичный тип реперов использовался для геомеханического мониторинга деформационных процессов на Олимпиадинском золоторудном месторождении (рисунок 3.6), и положительно зарекомендовал себя с позиции надежности и долговечности.

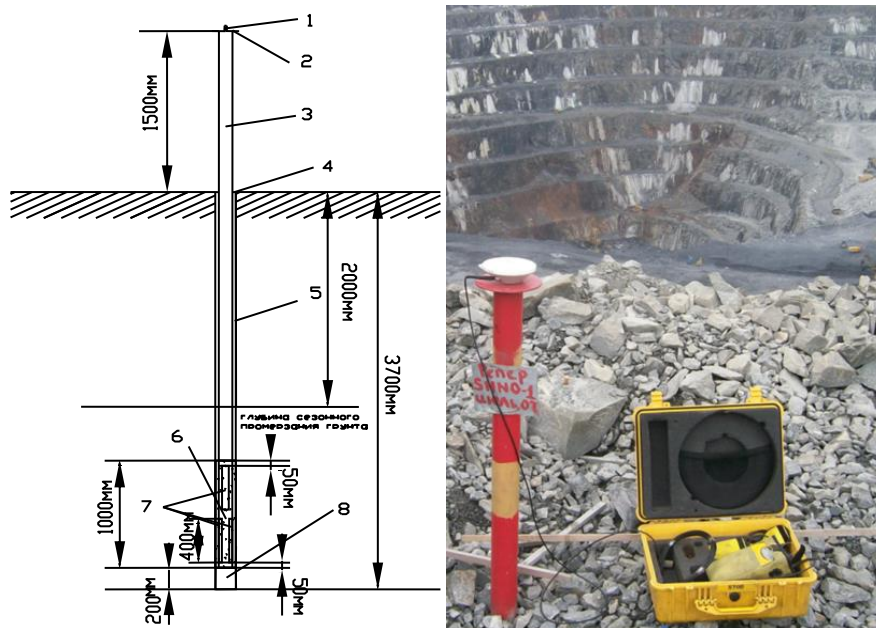


Рисунок 3.6 – Конструкция опорного репера. 1 – штырь с резьбой для антенны GPS и колпачком, высота штыря 20 мм, высота колпачка 50 мм; 2 – металлическая пластина, приваренная к трубе (толщина пластины 5 мм); 3 – металлическая труба $D=100$ мм, толщина стенок 16 мм; 4 – скважина $D=150$ мм; 5 – песчаная засыпка; 6 – якорь из цементно-песчаной смеси; 7 – прорезанные окна для заливки бетона; 8 – пористое основание для предотвращения образования ледяной подушки (в северных широтах)

Данный тип репера необходимо использовать в качестве опорного независимо от категории назначения сооружения, будь то промышленный или гражданский объект недропользования.

Рабочие реперы рекомендуется располагать парно – с расположением как за границей зоны сдвижения открытых горных работ, так и в ее пределах. Это позволит в процессе анализа результатов измерений отфильтровывать

деформации, произошедшие под воздействием преимущественно геомеханических факторов (сдвигание, разгрузка массива горных пород).

На опорных реперах одновременно производится определение их пространственных координат с помощью GPS-приемника, а также съем координат с опорных реперов высокоточным роботизированным тахеометром для привязки точки стояния последнего. Для обеспечения этой возможности на реперах используется конструкция отражателей, изображенных на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Конструкция отражателей, применяемых на реперах опорной сети при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений

Данный тип отражателей дает возможность размещать над ними антенну GPS, что позволяет использовать реперы одновременно, как для определения их пространственного положения, так и для съема координат с них (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Вариант единовременного размещения отражателя и GPS-антенны над пунктом опорной сети

В качестве рабочих реперов на горнопромышленных объектах, а также при геомеханическом мониторинге деформационных процессов, протекающих в

массиве горных пород под воздействием современных геодинамических движений, рекомендуется использовать аналогичный тип реперов, изображенный на рисунке 3.6.

Места заложения рабочих реперов необходимо выбирать на основании анализа геолого-структурной характеристики и данных о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород исследуемого участка. При определении места их заложения, в отличие от опорных реперов, рекомендуется располагать их максимально близко к граничным зонам вторичных структурных блоков, а также в местах горного массива, которым присуща неоднородность напряженно-деформированного состояния. Это позволит выделить деформации, возникающие под влиянием концентрирующихся на границах структурных блоков современных геодинамических движений с учетом их специфики (рисунок 3.9).

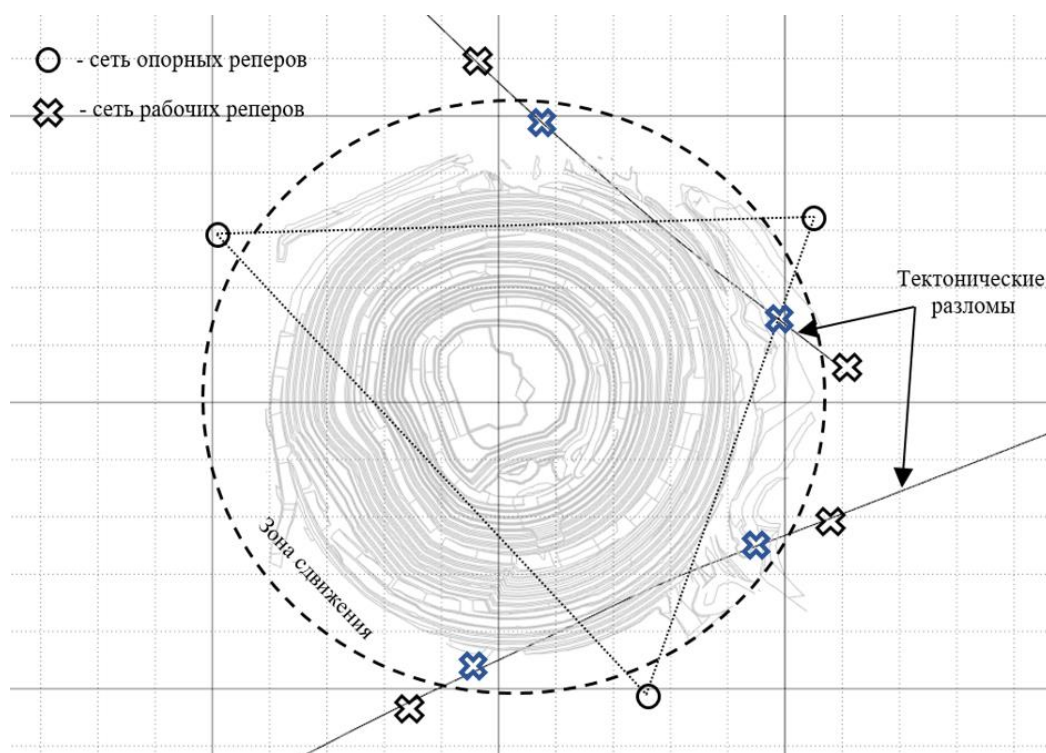


Рисунок 3.9 – Пример расположения сети рабочих реперов в граничных областях при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений на объекте открытых горных работ

При развитии сети рабочих реперов, используемых для геомеханического мониторинга деформационных процессов, протекающих под воздействием современных геодинамических движений на гражданских и промышленных сложноконструктивных сооружениях, необходимо использовать тип марки,

позволяющий обеспечить его постоянное закрепление на несущих конструктивных элементах исследуемых зданий.

Для решения этой задачи в качестве примера рекомендуется использовать конструкцию марки, изображенную на рисунке 3.10.

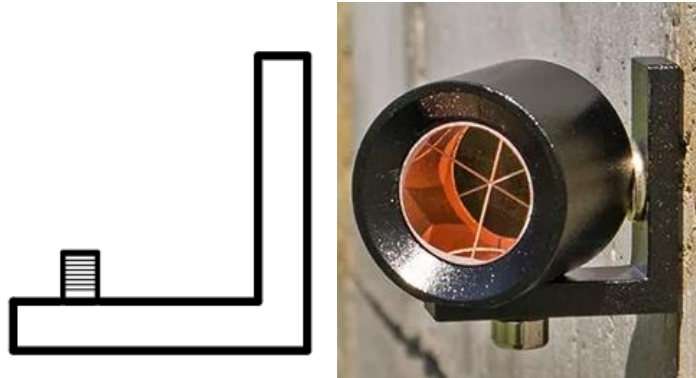


Рисунок 3.10 – Тип марки для мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений на сложноконструктивных сооружениях и зданиях различного назначения

Места заложения рабочих реперов на зданиях и сооружениях выбираются на основании анализа геолого-структурной характеристики участка расположения техногенного объекта и неоднородности его напряженно-деформированного состояния. В качестве примера, на рисунке 3.11 показана принципиальная схема установки стеновых марок в зонах повышенных сжимающих и растягивающих напряжений, возникающих под воздействием современных геодинамических движений.

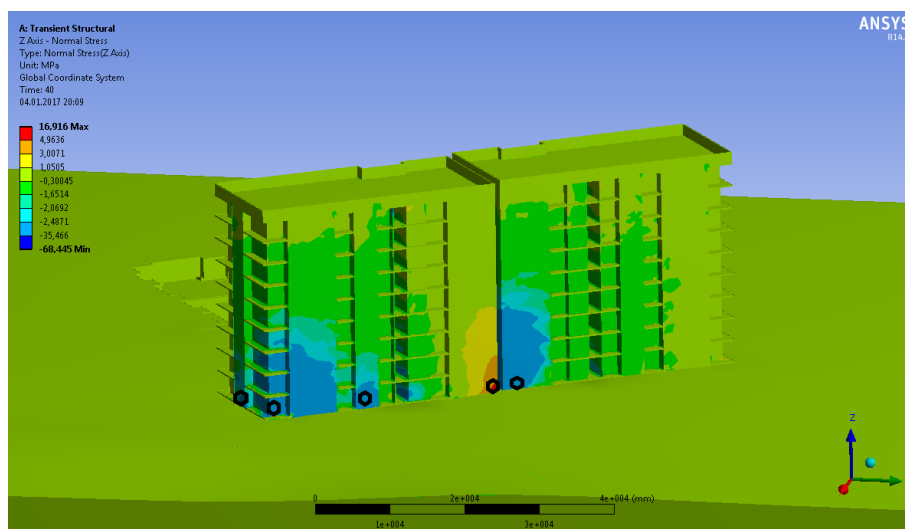


Рисунок 3.11 – Выбор места расположения рабочих реперов на основании анализа перераспределения напряжений в техногенном объекте (черным ромбом обозначено место устройства рабочего репера) [96]

Отражатели, установленные на опорных и рабочих реперах, должны быть стационарно закреплены и не снимаемы со станции, как в момент, так и в перерывах между сериями производимых инструментальных измерений. Это позволит избежать систематической погрешности при установке отражателя над маркой и повысить точность определения их пространственного положения.

Использование вышеописанных рекомендаций по типам конструкций и выбору мест расположения опорных и рабочих реперов позволяет выполнить геомеханический мониторинг деформационных процессов, формирующихся с учетом воздействия современных геодинамических движений, на техногенных объектах различного назначения.

3.3 Выбор средств измерений

Инструменты, предназначенные для проведения геомеханического мониторинга деформационных процессов, протекающих под действием современных геодинамических движений, должны обеспечивать необходимую точность измерений, позволяющую выявить деформации, вызванные влиянием современных геодинамических движений.

Выполнение инструментальных измерений, входящих в систему геомеханического мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, включает в себе 4 этапа:

1. Создание исходной сети реперов и определение их пространственного положения с помощью методов GPS-позиционирования;
2. Определение пространственного положения станции стояния инструмента (например, роботизированного тахеометра);
3. Определение горизонтальных смещений и деформаций рабочих реперов с помощью роботизированного тахеометра;
4. Определение высотных смещений и деформаций рабочих реперов с помощью высокоточного нивелира (или тахеометра).

Для решения задачи по созданию опорной сети реперов необходимо использование надежных, современных и высокоточных GNSS-инструментов,

позволяющих производить съемку плановых и высотных координат пунктов в стационарном режиме, обеспечивающем наибольшую точность измерений.

При геомеханическом мониторинге использование GNSS-приемников имеет следующие преимущества, по отношению к традиционным методам создания съемочного обоснования:

- При применении GNSS-приемников не требуется наличие прямой видимости между опорными пунктами, на которых производятся измерения;
- Точность GPS-измерений практически не зависит от погодных условий (таких, как снег, дождь, повышенная влажность);
- Производство GPS-измерений в режиме статики практически не требует участия оператора. Необходимо только установить прибор на определяемый пункт, а после окончания сессии измерений – снять инструмент с точки;
- Обработка и уравнивание результатов GPS-измерений производится непосредственно в офисе, а не в полевых условиях.

Для создания опорной сети необходимо одновременное использование как минимум трех GNSS-приемников, работающих от одной базовой станции. Это требование обосновывается дальнейшей возможностью создания замкнутой фигуры, в которой будет производиться уравнивание векторов (рисунок 3.12).

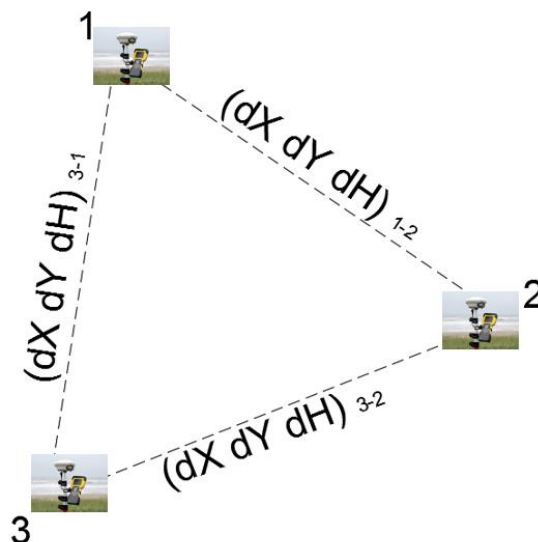


Рисунок 3.12 – Схема размещения с последующим уравниваем 3-х GNSS-приемников на пунктах опорной сети

С учетом развития современной измерительной аппаратуры, рекомендуется выполнение минимальных требований, которые необходимо соблюдать при выборе спутникового GNSS-приемника.

Для обеспечения наиболее надежного сигнала от спутников к GPS-приемникам необходимо использовать многочастотные инструменты, способные работать как минимум на 2-х частотах L_1/L_2 . Исключение ионосферных погрешностей записи кода двухчастотным приемником, по сравнению с одночастотным, позволит также повысить точность измерений. Также, для двухчастотных приемников при работе в режиме статики требуется меньшее количество времени, необходимое для получения более точных результатов, по сравнению с одночастотными приемниками.

Требования к точности GNSS-приемника зависят от погрешности пространственного положения отдельного пункта, координаты которого определены спутниковыми наблюдениями. Она определяется по формуле:

$$Mi = \sqrt{R^2 M_{изм}^2 + M_{тр}^2 + M_{ц}^2},$$

где R – коэффициент, значение которого определяют, исходя из условий радиовидимости (при удовлетворительной радиовидимости $R=1$); $M_{изм}$ – погрешность измерений (аппаратурная погрешность); $M_{ц}$ – погрешность центрирования GPS-приемника и измерения его высоты; $M_{тр}$ – погрешность трансформирования, обусловленная погрешностью взаимного положения трансформационных пунктов [97].

Погрешность измерений зависит от паспортной точности прибора, которым проводятся измерения, а также от длины базисной линии, на расстоянии которой расположена базовая GPS-станция.

Погрешность трансформирования при измерениях от одного опорного пункта равняется нулю $M_{тр} = 0$. При измерении от двух и более опорных пунктов погрешность трансформирования будет равняться погрешности взаимного положения этих пунктов. Чтобы не накапливать погрешность трансформирования при проведении спутниковых измерений на опорных реперах, при мониторинге

деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений рекомендуется использовать одну базовую станцию.

Погрешность центрирования GPS-приемника равна нулю $M_{\eta} = 0$ вследствие применения конструкции реперов, обеспечивающей принудительное центрирование (рисунок 3.5).

Таким образом, погрешность пространственного положения пункта зависит только от паспортной точности прибора и длины базисной линии.

Для сравнения рассмотрены 2 варианта применения GPS-приемников: 1 (многочастотный Trimble R10) – с паспортной точностью 3мм+0,1мм/км в плане, и 3,5мм+0,4мм/км по высоте; 2 (двухчастотный Trimble 5700) – с паспортной точностью 5мм+0,5мм/км в плане, и 5мм+1мм/км по высоте.

Для длины базисной линии 2км погрешности пространственного положения пунктов для GPS-приемника 1 составили:

$$M_{i1} = \sqrt{(3 + 0,1 * 2)^2} = 3,2 \text{ мм} - \text{в плане};$$

$$M_{i1} = \sqrt{(3,5 + 0,4 * 2)^2} = 4,3 \text{ мм} - \text{по высоте}.$$

Для приемника 2:

$$M_{i2} = \sqrt{(5 + 0,5 * 2)^2} = 6 \text{ мм} - \text{в плане};$$

$$M_{i2} = \sqrt{(5 + 1 * 2)^2} = 7 \text{ мм} - \text{по высоте}.$$

Таким образом, при длине базисной линии 2 км погрешность определения положения пункта опорной сети будет отличаться практически в 2 раза, в зависимости от паспортной точности приборов. В таблице 3.6 рассчитаны погрешности определения положения пунктов опорной сети для приведенных выше GPS-приемников, в зависимости от длины базисной линии.

Таблица 3.6 – Рассчитанные погрешности определения положения пунктов опорной сети

Длина базиса, км	Trimble R10		Trimble 5700	
	M_{i-xy} (в плане), мм	M_{i-h} (по высоте), мм	M_{i-xy} (в плане), мм	M_{i-h} (по высоте), мм
1	3.1	3.9	5.5	6
2	3.2	4.3	6	7
3	3.3	4.7	6.5	8
4	3.4	5.1	7	9
5	3.5	5.5	7.5	10
6	3.6	5.9	8	11
7	3.7	6.3	8.5	12
8	3.8	6.7	9	13
9	3.9	7.1	9.5	14
10	4	7.5	10	15
11	4.1	7.9	10.5	16
12	4.2	8.3	11	17
13	4.3	8.7	11.5	18
14	4.4	9.1	12	19
15	4.5	9.5	12.5	20
16	4.6	9.9	13	21
17	4.7	10.3	13.5	22
18	4.8	10.7	14	23
19	4.9	11.1	14.5	24
20	5	11.5	15	25

Как видно из таблицы, погрешность определения положения пункта опорной сети для прибора Trimble R10 даже при длине базиса 20 км не превышает 5 мм в плане. Высотная погрешность для этого же инструмента не превышает 5 мм только при длине базисной линии не более 3 км.

Таким образом, при мониторинге деформационных процессов, возникающих под воздействием современных геодинимических движений, для определения пространственного положения пунктов опорной сети рекомендуется использовать многочастотные GPS-приемники с паспортной точностью не менее **3мм+0,1мм/км в плане, а также 3,5мм+0,4мм/км по высоте.**

Для определения пространственного положения пунктов рабочей сети целесообразно использование роботизированных электронных тахеометров. Применение роботизированных тахеометров для определения горизонтальных смещений рабочих реперов обладает рядом преимуществ, по сравнению с применением классических электронно-оптических тахеометров:

- Автоматизация процесса измерений, необходимая для мониторинга деформационных процессов, формирующихся под воздействием современных геодинимических движений;

- Возможность выполнения измерений одним оператором (или с его минимальной степенью участия);
- Высокая производительность выполняемых измерений.

Выбор роботизированного тахеометра для мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, аналогично GPS-оборудованию, основывается на оценке средней квадратической ошибки определения положения рабочих реперов, и осуществляется следующим образом [98]:

Средняя квадратическая погрешность в плане:

$$M^2_{X,Y} = m_s^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot S^2,$$

где m_s – ошибка измерения расстояний.

В качестве примера ниже показан расчет средней квадратической погрешности роботизированного тахеометра Trimble S5. Для данной модели тахеометра при дальности измерений до 300 м ошибка измерения расстояний составит:

$$m_s = 1 + 2 \text{ мм/км} = 1 + 2 \cdot 0,3 = 1,6 \text{ мм};$$

ρ – число секунд в одном радиане, $\rho = 206265''$.

m_β – погрешность определения горизонтального угла, сек.;

$$m_\beta = \pm \sqrt{m_i^2 + m_{\text{ui}}^2};$$

где m_i – погрешность измерения угла, сек

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{m_o^2}{n} + \frac{m_v^2}{n}};$$

где m_o – погрешность отсчитывания, сек

Погрешность отсчитывания в роботизированных электронных тахеометрах не учитывается, так как измерения производятся автоматически, поэтому данная ошибка принята равной паспортной величине $1''$ – в отношении прибора Trimble S5.

m_v – погрешность визирования, м;

$$m_v = \pm \frac{60''}{v};$$

где v – увеличение зрительной трубы (для Trimble S5 – 30X);

$$m_v = \pm \frac{60''}{30} = 2''.$$

Инструментальная ошибка при использовании роботизированного электронного тахеометра принимается для одного кругового приема $n=1$, проведение измерений большим количеством приемов является нецелесообразным, так как данный метод имеет цель исключить влияние ошибок градуировки лимба, а управление его положением в электронно-оптическом инструменте не применяется.

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{(1'')^2}{1} + \frac{2''^2}{1}} = \pm 2,2'';$$

m_{ci} – погрешность от неточного центрирования прибора и сигнала, исключается, так как тахеометр не устанавливается над точкой с известными координатами.

$$m\beta = \pm m_i = 2,2'';$$

$$M_{xy}^2 = 1,6^2 + \frac{2,2^2}{206265^2} * 300000^2 = 12,8;$$

$$M_{xy} = 3,6 \text{ мм.}$$

Средняя квадратическая погрешность по высоте:

$$m_{\Delta z} = \sqrt{\left(\frac{m_\delta}{\rho} L \cos \delta\right)^2 + (m_L \sin \delta)^2 + m_i^2 + m_g^2};$$

где m_L – погрешность определения расстояний (для Trimble S5 $m_L = \pm(2 + 2 * D * 10^{-6})$) $m_L = \pm(1 + 2 * 300000 * 10^{-6}) = 1,6 \text{ мм};$

m_i, m_g – ошибки вычисления превышения инструмента измерений и вешки над точкой стояния (не учитываются, так как в данной работе не применяются).

m_δ – погрешность измерения вертикального угла, сек.;

$$m_\delta = \pm \sqrt{\frac{m_o^2}{n} + \frac{m_v^2}{n}};$$

$$m_{\delta} = \pm \sqrt{\frac{(1'')^2}{1} + \frac{2''^2}{1}} = \pm 2,2''.$$

Рассмотрим вариант, при котором расстояние и угол наклона до репера составят следующие значения: $L=300\text{м}$ и $\delta=20^\circ$, тогда:

$$m_{\Delta z} = \sqrt{\left(\frac{2,2}{206265} * 300000 * \cos 20\right)^2 + (1,6 * \sin 20)^2} = 3,05 \text{ мм}.$$

Общая ошибка положения определяемых пунктов составляет:

$$M_{\text{общ}}^2 = M_{x,y}^2 + m_{\Delta z}^2;$$

$$M_{\text{общ}} = \sqrt{3,6^2 + 3,05^2} = 4,7 \text{ мм}.$$

Для сравнения была рассчитана средняя квадратическая погрешность определения пространственного положения рабочего репера для роботизированного тахеометра с точностью измерения расстояний 2+2 мм/км и угловой паспортной точностью 2". Для прибора с данными параметрами значения среднеквадратических погрешностей составили:

$$M_{xy} = 4,8 \text{ мм}; m_{\Delta z} = 3,9 \text{ мм}; M_{\text{общ}} = 6,2 \text{ мм}.$$

Итоговые результаты сравнения приборов приведены в таблице 3.7:

Таблица 3.7 – Результаты сравнения среднеквадратических погрешностей, получаемых в результате мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинимических движений роботизированными тахеометрами с различными паспортными параметрами точности

Паспортная точность измерения расстояний, мм/км	1+2	2+2
Паспортная точность угловых измерений, "	1	2
СКП плановых измерений, мм	3,6	4,8
СКП высотных измерений, мм	3,05	3,9
СКП общая, мм	4,7	6,2

Таким образом, для обеспечения минимальной общей среднеквадратической погрешности определения пространственного положения рабочих реперов при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинимических движений, рекомендуется использовать роботизированные тахеометры с паспортной точностью не ниже, чем **1+2 мм/км** – при измерении расстояний, а также не ниже, чем **1"** – при угловых измерениях.

Ввиду повышенной ошибки, возникающей при определении высотных отметок рабочих реперов, при измерении как роботизированными тахеометрами, так и GPS-приемниками, для мониторинга вертикальных деформаций, возникающих под воздействием современных геодинамических движений, рекомендуется использовать метод геометрического нивелирования с применением высокоточных нивелиров.

Наиболее предпочтительным вариантом является использование цифровых высокоточных нивелиров. Основным преимуществом цифровых нивелиров, по сравнению с оптическими, является возможность автоматического снятия отсчетов по рейке, исключая одну из основных ошибок – ошибку визирования на рейку. Помимо этого, цифровые нивелиры наделены электронной памятью, позволяющей сохранять снятые показания внутри прибора.

Далее показан расчет погрешности определения высотной отметки рабочего репера с помощью геометрического нивелирования.

Согласно теории ошибок, погрешность определения высотной отметки конечного пункта нивелирного хода складывается из погрешности высотной отметки начального пункта и погрешностей отдельных измерений [99]:

$$M_{H_B}^2 = M_{H_A}^2 + n \cdot m_z^2 = M_{H_A}^2 + L \cdot m_l^2,$$

где L – длина хода (расстояние от исходного репера до определяемого),

n – количество станций в ходе,

если принять расстояние от прибора до рейки за l , то, при условии равенства плеч: $n = \frac{L}{2l}$,

m_z – погрешность отдельного превышения,

m_l – погрешность на единицу длины хода.

При условии равенства плеч формула для вычисления погрешности отдельного превышения имеет вид:

$$m_z^2 = \frac{2l^2}{\rho^2} m_o^2,$$

где l – расстояние от нивелира до рейки, м,

ρ - величина, равная 1 радиану, выраженному в секундах, $\rho = 206265''$,

m_o – ошибка отсчета по рейке.

Возникновение ошибки m_o связано в основном с ошибкой визирования m_v и с неточной установкой оси уровня в горизонтальное положение m_τ :

$$m_o = \pm \sqrt{m_v^2 + m_\tau^2},$$

где $m_v = 100''$, $m_\tau = 0,1\tau$ (для контактных уровней), τ - цена деления уровня.

В нивелирах с компенсатором, m_τ является погрешностью самоустановки компенсатора, значение которой прописывается в паспорте нивелира.

Таким образом, погрешность отдельного превышения для оптического нивелира с контактным уровнем при условии равенства плеч будет иметь вид:

$$m_z^2 = \frac{2l^2}{206265^2} (100''^2 + (0,1\tau)^2)$$

или

$$m_z = \frac{l\sqrt{2}}{206265} \sqrt{100''^2 + (0,1\tau)^2}.$$

При закладке пар реперов в паре на расстоянии 40-60 м друг от друга для определения превышения между ними потребуется лишь одна установка прибора.

Следовательно, погрешность высотной отметки рабочего репера, определяемая путем геометрического нивелирования от соответствующего ему парного репера, составит:

$$M_{H_B} = \sqrt{M_{H_A}^2 + m_z^2}.$$

Если принять погрешность начального репера А равной нулю, то погрешность определяемого репера составит:

$$M_{H_B} = m_z = \frac{l\sqrt{2}}{206265} \sqrt{100''^2 + (0,1\tau)^2}.$$

При нормальной длине луча визирования, равной 75м, погрешность высотной отметки репера будет равна:

$$M_{H_i} = \frac{75\sqrt{2}}{206265} \sqrt{100''^2 + (0,1 \cdot 30'')^2} = 0,05 \text{ мм}.$$

Как видно из расчетов, погрешность определения высотной отметки репера в паре пренебрежимо мала и даже незначительная разница в превышениях между соседними сериями наблюдений внутри пары реперов будут свидетельствовать о наличии смещений, произошедших под воздействием современных геодинамических движений.

Таким образом, для мониторинга вертикальных деформаций, протекающих под воздействием современных геодинамических движений, рекомендуется использовать высокоточные оптические или цифровые нивелиры, со среднеквадратической погрешностью измерения превышения на 1 км двойного хода не более **0,5 мм**.

3.4 Методика мониторинга деформационных процессов на объектах недропользования

Для успешного проведения мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений в первую очередь необходимо соблюдать требования, описанные в разделах 3.1-3.3 настоящей главы, содержащие в себе рекомендации по принципам устройства конструкции наблюдательной станции, выбору типов и средств измерений, а также по обеспечению требований к результатам мониторинга.

Современные геодинамические движения характеризуются цикличностью и периодичностью действия, разнонаправленностью, а также неравномерностью возникновения. Эти факторы служат основными помехами, мешающими своевременному выявлению деформационных процессов с учетом современных геодинамических движений существующими сегодня системами мониторинга.

Суть сформированной методики мониторинга деформационных процессов состоит в учете специфики воздействия современных геодинамических движений на безопасность и устойчивость объектов недропользования. Отличительная особенность методики заключается в единовременном выполнении процессов определения пространственного положения пунктов рабочей и опорной сетей,

позволяющих на различных этапах измерения деформаций выявить наличие современных геодинамических движений и их влияние на техногенный объект.

Для применения методики мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений в геомеханической практике, необходимо одновременно производить инструментальные измерения методами спутникового позиционирования, тахеометрической съемки, и, при необходимости, геометрического нивелирования. Для этого необходимо использовать как минимум 3 GPS-приемника, 1 высокоточный роботизированный тахеометр, а также, при необходимости, 1 высокоточный оптический или цифровой нивелир. Требования к параметрам точности применяемого оборудования приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Требования к точности применяемого оборудования при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений

Тип оборудования	GNSS-приемник	Роботизированный тахеометр	Нивелир
Точность, не ниже	3мм+0,1мм/км в плане; 3,5мм+0,4мм/км по высоте.	1+2 мм/км – при измерении расстояний; 1” – при угловых измерениях	СКП измерения превышения на 1 км двойного хода не более 0,5 мм

Предрасчет точности для GNSS-приемников выполняется по формуле:

$$Mi = \sqrt{R^2 M_{изм}^2 + M_{тр}^2 + M_{ц}^2},$$

где R – коэффициент, значение которого определяют, исходя из условий радиовидимости (при удовлетворительной радиовидимости $R=1$); $M_{изм}$ – погрешность измерений (аппаратурная погрешность); $M_{ц}$ – погрешность центрирования GPS-приемника и измерения его высоты; $M_{тр}$ – погрешность трансформирования, обусловленная погрешностью взаимного положения трансформационных пунктов.

Предрасчет точности для роботизированного тахеометра выполняется по формулам:

$$M^2_{X,Y} = m_s^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot S^2 - \text{для определения плановой погрешности,}$$

где m_s – ошибка измерения расстояний;

ρ – число секунд в одном радиане, $\rho=206265''$;

m_β – погрешность определения горизонтального угла, сек.

$$m_{\Delta z} = \sqrt{\left(\frac{m_\delta}{\rho} L \cos \delta\right)^2 + (m_L \sin \delta)^2 + m_i^2 + m_g^2} - \text{для определения высотной}$$

погрешности,

где m_L – погрешность определения расстояний;

m_i, m_g – погрешности определения превышения тахеометра над репером и вехи над репером;

m_δ – погрешность измерения вертикального угла, сек.

Общая погрешность, учитывающая плановую и высотную среднеквадратические погрешности, определяется по формуле:

$$M^2_{\text{общ}} = M^2_{X,Y} + m^2_{\Delta z}$$

Предрасчет точности для геометрического нивелирования выполняется по формуле:

$$M^2_{H_B} = M^2_{H_A} + n \cdot m_z^2 = M^2_{H_A} + L \cdot m_l^2,$$

где L – длина хода (расстояние от исходного репера до определяемого);

n – количество станций в ходе;

m_z – погрешность отдельного превышения;

m_l – погрешность на единицу длины хода.

Схема методики мониторинга деформационных процессов, протекающих под воздействием современных геодинамических движений, отображена на рисунке 3.13.

Методика подразделяется на следующие этапы:

- подготовительный этап (на рисунке боксы голубого цвета);
- этап производства измерений (на рисунке боксы оранжевого цвета);
- этап обработки результатов измерений (на рисунке боксы желтого цвета).

На подготовительном этапе на стадии закладки съемочного обоснования необходимо выполнять требования к установке опорных и рабочих реперов, которые заключаются в расположении сети реперов за границей зоны сдвижения, а также на границах структурных блоков или вдали от них, в зависимости от назначения закладываемых реперов. На схеме требования к заложению наблюдательной станции отображены в темно-синих боксах со сглаженными углами.

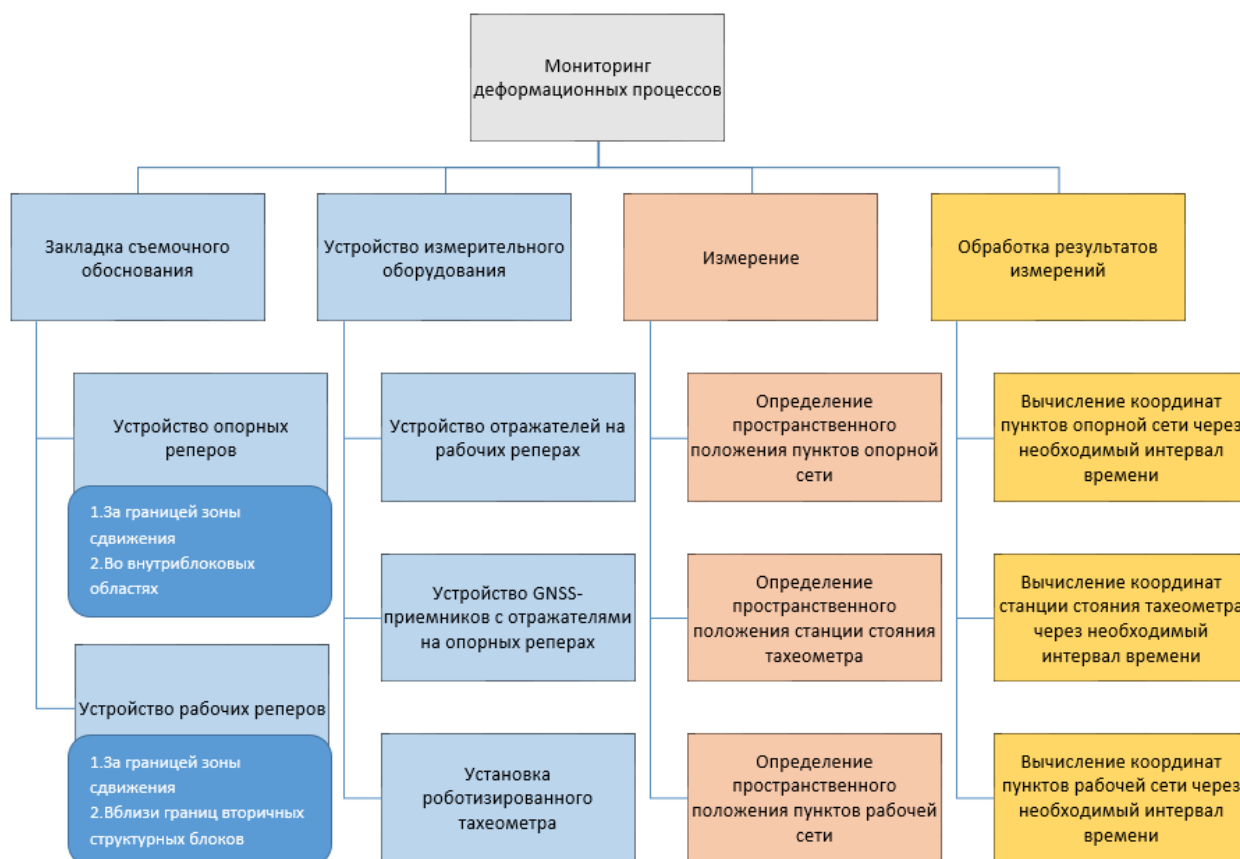


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема методики мониторинга деформационных процессов, протекающих под воздействием современных геодинамических движений

После заложения сети опорных и рабочих реперов, а также выбора применяемого измерительного оборудования, начинается процесс проведения единовременных инструментальных наблюдений, целью которых является выявление неравномерности деформационных процессов, возникающей под воздействием современных геодинамических движений. Принципиальная схема применения разработанной методики показана на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Принципиальная схема разработанной методики мониторинга на этапе производства измерений

Как показано на рисунке, в соответствии с разработанной методикой мониторинг деформационных процессов под воздействием современных геодинамических состоит из 3-х одновременно протекающих циклических процессов:

1. Определение пространственного положения пунктов опорных реперов с помощью спутниковых измерений;
2. Определение пространственного положения станции роботизированного тахеометра способом обратной засечки от опорных реперов;
3. Определение пространственного положения рабочих реперов роботизированным тахеометром способом круговых приемов.

Для определения пространственного положения пунктов опорной сети с помощью спутниковых технологий используется относительный метод измерений, в соответствии с которым результаты измерений на определяемых и базовом пунктах обрабатываются совместно [100].

Измерения производятся в режиме статики. Помимо повышенной точности, преимуществом данного режима является размещение инструмента на точке длительный период времени, в течение которого появляется возможность фиксации деформаций, вызванных современными геодинамическими движениями с различными временными циклами.

Использование как минимум 3-х GPS-приемников позволяет получить замкнутую фигуру в виде треугольника (рисунок 3.15).

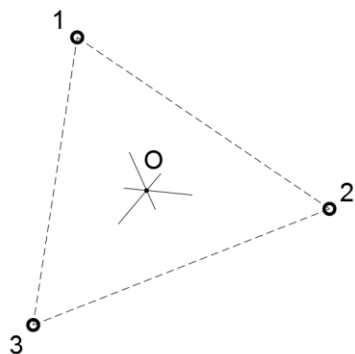


Рисунок 3.15 – Замкнутый треугольник при определении пространственного положения опорных реперов методом спутникового позиционирования

При этом принимается допущение, в соответствии с которым центр треугольного элемента остается неподвижным, смещаются только его вершины. Таким образом, для каждого выбранного интервала времени, в соответствии с циклом проявления современных геодинамических движений, вычисляются новые координаты вершин из условия наименьших квадратов, с помощью которого производится уравнивание длин сторон треугольника.

В основе уравнивания методом наименьших квадратов лежит условие минимума сумм квадратов поправок v_i , вводимых в результаты измерений, выполненных равноточно или неравноточно с весами p_i , т.е. [101]:

$$v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 = [v^2] = \min$$

$$p_1 v_1^2 + p_2 v_2^2 + \dots + p_n v_n^2 = [p_i v_i^2] = \min$$

Поскольку при GPS-позиционировании при определении координат пунктов опорных реперов будет определяться 3 величины – dx , dy и dz , то формула принимает вид:

$$[p_x v_x] + [p_y v_y] + [p_z v_z] = \min.$$

Достоинством метода наименьших квадратов является то, что при использовании вторых степеней поправок ограничиваются большие поправки, в связи с чем при измерениях поправки относительно равномерно распределяются между результатами измерений.

Как уже было сказано выше, координаты пунктов опорной сети вычисляются для n -го количества серий с заданным интервалом времени t , который зависит от цикличности современных геодинамических движений.

В соответствии с временным интервалом t задается программа определения пространственного положения станции роботизированного тахеометра и реперов рабочей сети.

Определение пространственного положения станции роботизированного тахеометра выполняется методом обратной линейно-угловой засечки по пунктам опорной сети.

Преимуществом обратной линейно-угловой засечки является возможность выбора произвольной точки стояния тахеометра. При этом, необходимо наличие 3-4-х точек, используемых в качестве опорных. Желательно, чтобы углы между определяемыми пунктами составляли не менее 30° (рисунок 3.16).

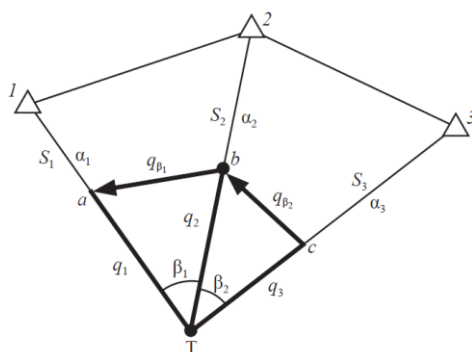


Рисунок 3.16. Обратная линейно-угловая засечка [102]

Для определения дирекционного угла при решении обратной засечки используется формула Деламбра:

$$tg\alpha_{P-T1} = \frac{(Y2 - Y1)ctg\beta1 + (Y1 - Y3)ctg\beta2 + (X3 - X2)}{(X2 - X1)ctg\beta1 + (X1 - X3)ctg\beta2 - (Y3 - Y2)}$$

Затем вычисляются дирекционные углы:

$$\alpha_{P-T_2} = \alpha_{P-T_1} + \beta_1$$

$$\alpha_{P-T_3} = \alpha_{P-T_1} + \beta_2$$

Координаты определяемой точки вычисляются по формулам Гаусса:

$$X_P - X_{T_3} = \frac{(X_{T_1} - X_{T_3})\operatorname{tg}\alpha_{P-T_1} - (Y_{T_1} - Y_{T_3})}{\operatorname{tg}\alpha_{P-T_1} - \operatorname{tg}\alpha_{P-T_3}}$$

$$X_P - X_{T_1} = \frac{(X_{T_1} - X_{T_3})\operatorname{tg}\alpha_{P-T_3} - (Y_{T_1} - Y_{T_3})}{\operatorname{tg}\alpha_{P-T_1} - \operatorname{tg}\alpha_{P-T_3}}$$

$$Y_P - Y_{T_3} = (X_P - X_{T_3})\operatorname{tg}\alpha_{P-T_3}$$

$$Y_P - Y_{T_1} = (X_P - X_{T_1})\operatorname{tg}\alpha_{P-T_1}$$

Определение пространственного положения пунктов рабочей сети выполняется роботизированным тахеометром с помощью метода круговых приемов, при этом количество приемов не обязательно должно превышать 1 (рисунок 3.17). Измерение углов большим количеством приемов, как уже говорилось выше, лишено смысла, так как применение большего количества приемов предусмотрено для устранения ошибки градуировки лимба, а в современных роботизированных тахеометрах управление его положением не предусмотрено.

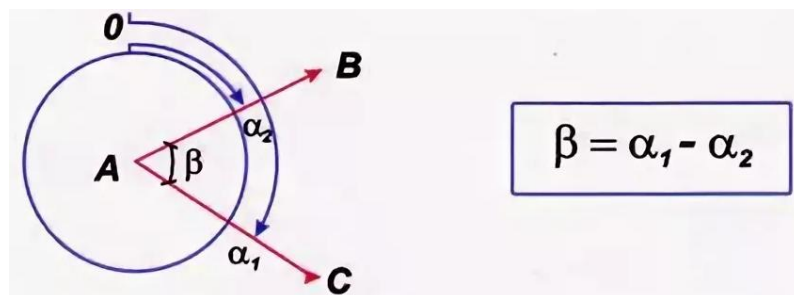


Рисунок 3.17 – Измерение положения рабочего репера способом круговых приемов

Определение положения рабочих реперов выполняется также с заданным временным интервалом t .

Таким образом, координаты каждого репера опорной сети будут вычислены в выбранный интервал времени t , что позволит оценить вектор их перемещений за определенный цикл, присущий современным геодинамическим движениям.

Достоинством разработанной методики является возможность применения различных временных интервалов для оценки деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений различной периодичности. Например, при использовании временных интервалов менее 1 минуты сохраняется возможность фиксации деформаций, произошедших под воздействием современных геодинамических движений с большей продолжительностью цикла. Важным условием здесь является использование минимальных значений временных интервалов при мониторинге, так как при временном интервале, равном, например, 1 час, не получится определить действие современных геодинамических движений с меньшим интервалом, равным, например, 5 минут.

На основании результатов мониторинга рассчитываются относительные деформации, произошедшие за установленный интервал времени (рисунок 3.18).

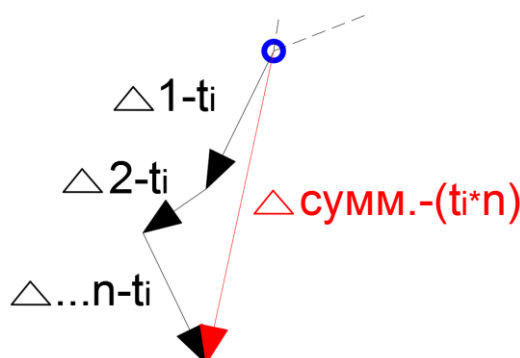


Рисунок 3.18 – Схема определения тензора полной деформации рабочего репера, где t_i – выбранный для измерения деформаций временной интервал; $\Delta_{1,2,\dots,n}$ – зафиксированные смещения за 1-ю, 2-ю и n-ю серии измерений

Таким образом, сформированная система мониторинга деформационных процессов позволяет определить деформации, вызванные влиянием современных геодинамических движений на техногенных объектах различного целевого назначения.

Особенностью разработанной методики является возможность определения деформаций, возникающих вследствие неравномерности и разнонаправленности действия современных геодинамических движений на различных временных циклах. Методика обеспечивает выявление неоднородных, локальных деформационных процессов, вызванных современными геодинамическими движениями.

Основным достоинством сформированной методики мониторинга является возможность определения деформаций, возникающих вследствие неравномерности и разнонаправленности действия современных геодинамических движений на различных временных циклах. Методика обеспечивает выявление неоднородных, локальных деформационных процессов, вызванных современными геодинамическими движениями, локализующихся на границах вторичных структурных блоков.

Сравнение предложенной в работе методики с существующими представлено в таблице 3.9.

Для сравнения рассмотрены следующие методики мониторинга деформационных процессов: А – методика мониторинга по профильным линиям; Б – метод площадных инструментальных исследований (разработал А. А. Панжин); В – радарное или лазерное сканирование; Г – представленная в работе методика.

Таблица 3.9 – Сравнение разработанной методики с существующими

Возможности	Методика			
	А	Б	В	Г
Методика позволяет выделить воздействие современных геодинамических движений	-	+	-	+
Применение методики на открытых полигонах	+	+	+	+
Применение методики в условиях ограниченной видимости (мониторинг зданий и сооружений, лес)	+	-	-	+
Применение методики на коротких базах для мониторинга деформаций сооружений	+/-	-	+	+
Применение методики на больших базах	-	+	+/-	-

Преимуществами разработанной методики по сравнению с методикой мониторинга по профильным линиям является возможность выявления воздействия современных геодинамических движений на безопасность объектов недропользования.

Сравнительно с методом площадных исследований разработанная методика может использоваться в условиях ограниченной видимости, а также для

мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений в техногенных сооружениях.

К недостаткам разработанной методики мониторинга можно отнести затруднение в использовании ее при измерениях на больших базах, а также трудоемкость инструментальных измерений, ввиду одновременного использования нескольких геодезических методов. Однако, автоматизация данных процессов позволяет значительно упростить решение данной задачи. Автоматизация измерительных процессов является перспективной задачей для дальнейшего развития мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, а также обеспечения безопасности строительства и эксплуатации техногенных объектов с позиции геомеханики.

Выводы

1. Обоснованы требования, предъявляемые к результатам мониторинга деформационных процессов, формирующихся под воздействием современных геодинамических движений. Используемая методика должна обеспечивать выявление деформаций техногенного объекта и вмещающего его массива горных пород, произошедших в условиях неравномерности и неоднородности действия современных геодинамических движений. Должна быть учтена специфика действия современных геодинамических движений, заключающаяся в их неоднородности, а также в мозаичности напряженно-деформированного состояния массива горных пород, формирующегося под их влиянием.

2. Предложена конструкция наблюдательной станции, позволяющая обнаружить деформации, возникающие по причине действия современных геодинамических движений. Она включает в себя совокупность опорных и рабочих реперов, конструкция которых зависит от характеристики объекта наблюдений.

3. Определены минимальные требуемые параметры точности средств измерений, применяемых для мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений.

Для инструментальных наблюдений необходимо применять: для определения пространственного положения опорных реперов – GPS-приемники с паспортной точностью не менее $3\text{мм}+0,1\text{мм/км}$ в плане, а также $3,5\text{мм}+0,4\text{мм/км}$ по высоте; для определения пространственного положения рабочих реперов – роботизированные тахеометры с паспортной точностью не менее $1+2\text{ мм/км}$ при измерении расстояний, а также не ниже $1''$ – при угловых измерениях; при необходимости – высокоточные оптические или цифровые нивелиры со среднеквадратической погрешностью измерения превышений на 1 км двойного хода не более $0,5\text{ мм}$.

4. Разработана методика мониторинга деформационных процессов, возникающих под воздействием современных геодинамических движений. Предложенная система позволяет своевременно обнаруживать деформации, возникающие с учетом современных геодинамических движений. Также, она в полной мере дает возможность выделения неоднородности и дискретности проявления современных геодинамических движений из всей совокупности техногенных и природных факторов, влияющих на деформационные процессы на техногенных объектах.

4. Опытнo-промышленная апробация сформированной системы мониторинга на объектах недропользования

4.1 Геологическая характеристика участка наблюдаемых объектов

Опытнo-промышленная апробация разработанной системы мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений осуществлена при строительстве сложноконструктивных объектов недропользования в регионе Северного Кавказа.

Участки размещения исследуемых техногенных объектов административно находятся в Адлерском районе г. Сочи, и расположены в кварталах 13, 14 и 15 на улице Мира в с. Весёлое (рисунок 4.1).

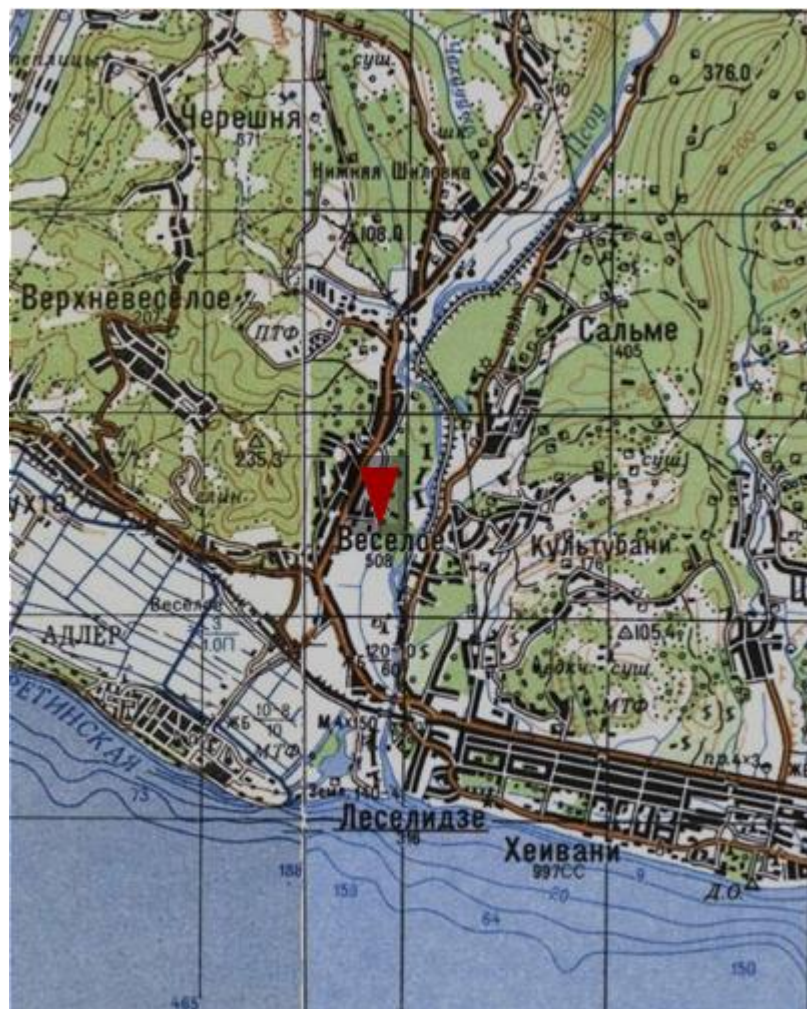


Рисунок 4.1 – Схема расположения исследуемых участков

В геоморфологическом отношении район расположен в Имеретинской низменности, ограниченной с севера относительно крутым склоном,

простирающимся вдоль Адлерской флексурно-разрывной зоны. Выработана равнина на литолого-генетическом комплексе аллювиальных, озерно-лиманских и морских отложений (галечники, пески, глины, илы, торфяники) мощностью от 20 до 100 м.

Исследуемые территории приурочены к первой надпойменной правобережной террасе долины реки Псоу и находятся в 425-500 м от ее русла.

Гидрогеологические условия характеризуются распространением на участке строительства постоянного горизонта подземных вод первой надпойменной террасы р. Псоу, приуроченного к аллювиальным отложениям (aQ_4), и неглубоким их залеганием. Для данного типа режима характерна непосредственная гидравлическая связь между подземными водами и рекой Псоу: река в межень дренирует грунтовый горизонт, а в паводковый период – питает его.

Коэффициент фильтрации водовмещающих пород изменяется от 0,001 (0,01) для глин до 40 и (150) м/сут для крупнообломочных пород, в зависимости от состава заполнителя и наличия прослоев.

В структурном отношении территория г. Сочи расположена в западном сегменте мегасвода Большого Кавказа в южной прибортовой зоне, подзоне Большого Сочи. Исследуемая территория входит в зону Адлерской депрессии, которая подразделяется на Сочинскую и Имеретинскую структурные ступени.

Сочинская структурно-тектоническая ступень занимает большую часть Сочи-Адлерской депрессии, в пределах которой наблюдаются широкие плоскодонные синклинали, разделенные кулисообразно расположенными коробчатыми брахиантиклиналями. К межступенчатой группе разрывных нарушений относится Адлерская флексурно-разрывная зона, расположенная в пределах Имеретинской низменности. Морфологически эта зона представляет собой серию сближенных разломов взбросо-надвигового характера, сопровождаемых множеством мелких приразломных структур.

Исследуемая территория принадлежит к южному, юго-западному крылу Веселовской антиклинали. С северо-запада антиклиналь ограничена Видненским

поперечным сбросом, а с севера-северо-востока Тумаринско-сальминской синклиналью (рисунок 4.2).

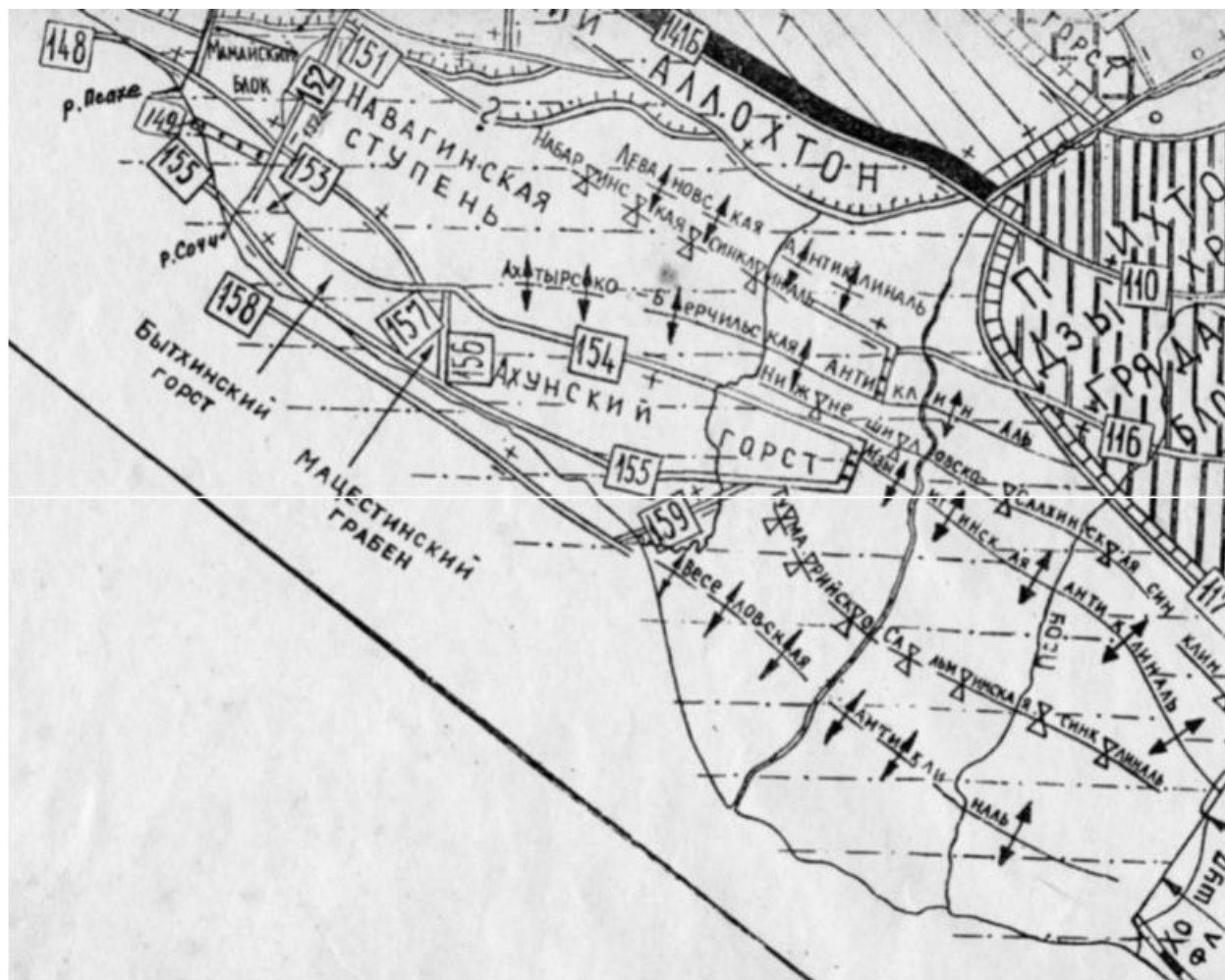


Рисунок 4.2 – Фрагмент схемы неоструктурного районирования г. Сочи по Н.А. Несмеянову

На исследуемой территории имеют распространение эндогенные и экзогенные геологические процессы.

К эндогенным процессам относится сейсмичность, фоновая интенсивность которой составляет 8 и 9 баллов по шкале MSK-64 согласно СНиП 11-7-81 и СНКК 22-301-2000 г. для средних грунтовых условий и степени сейсмической опасности – А (10%), возникающей в течении 50 лет. Высокая сейсмическая активность района обусловлена процессами, происходящими в земной коре. Современные землетрясения приурочены к тектонически активным зонам и связаны с колебательными движениями, происходящими в земной коре.

Категории грунтов по сейсмическим свойствам – II и III (СНиП II -7-81*) [103]. Согласно грунтовым условиям сейсмичность участка составляет 8 и 9 баллов.

По данным сейсмического микрорайонирования расчетная сейсмичность в баллах шкалы MSK-64 8 баллов.

К экзогенным процессам относится подтопляемость исследуемого участка, связанная с высоким стоянием уровня подземных вод, имеющих тесную гидравлическую связь с уровненным режимом р. Псоу, а также наличием небольших напоров (0,5-1,0 м), вызываемых «законсервированностью» грунтовых вод аллювиальных отложений.

На основании проведенных геологических изысканий было выявлено наличие карманов выветривания, представляющих из себя выветрелые до состояния мелкозема сланцы, которые преимущественно приурочены к тектоническим разрывам, локализующимся в районе строительства техногенных объектов [104].

По локализации карманов выветривания в массиве горных пород построено тектоническое нарушение, залегающее под исследуемым техногенным объектом и имеющее следующие параметры: Азимут падения – 349° , угол падения – 75° (рисунок 4.3).

Это говорит о том, что проектируемый объект недропользования изначально заложен на границе вторичных структурных блоков массива горных пород.

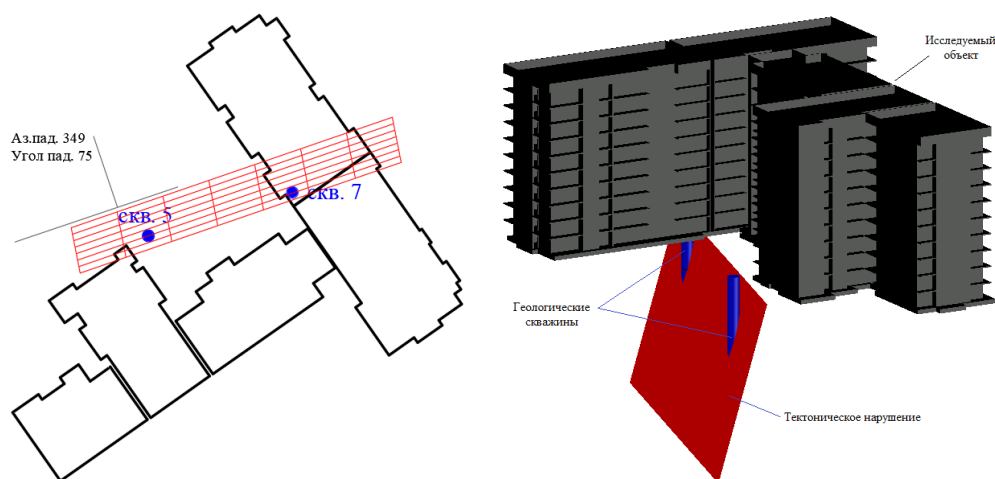


Рисунок 4.3 – Расположение тектонического разлома относительно техногенного объекта на площадке Б

Мощность тектонического нарушения установить довольно сложно по причине редкого заложения геологических скважин, поэтому, тектонический разлом был представлен в виде поверхности, являющейся границей вторичных структурных блоков в данном районе.

В качестве исследуемых техногенных объектов выступают многоквартирные сложноконструктивные сооружения высотой 10 этажей. Они расположены на 2-х строительных площадках, находящихся на расстоянии 400 м друг от друга. Для удобства обозначения названия домов на площадках начинаются с заглавных букв русского алфавита А и Б.

На площадке А расположено односекционное десятиэтажное сооружение (рисунок 4.3).

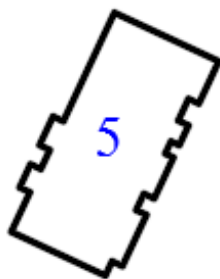


Рисунок 4.3 – Техногенный объект на площадке А

На площадке Б расположено 1 десятиэтажное сооружение, состоящее в общей сложности из двух секций (рисунок 4.4).

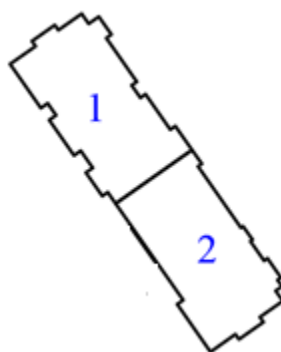


Рисунок 4.4 – Техногенный объект на площадке Б

Строительство сложноконструктивных высотных объектов на площадке А велось по технологии классического монолитного домостроения. Виды работ, используемые при данной технологии, включают в себя изготовление и установку арматурного каркаса, установку съемной опалубки для бетонирования

конструкции, и непосредственно бетонирование с последующим демонтажем опалубки.

На площадке Б использована строительная технология PLASTBAU (рисунок 4.5), применяющаяся для возведения частных домов на Западе, а с 1997 года и в России [105]. Эта технология предполагает установку готовых, более легких, по сравнению с классическим монолитным домостроением, арматурных каркасов, установку несъемной опалубки из пенополистирола, и непосредственно бетонирование. Опалубка из пенополистирола после заливки бетоном не демонтируется и выступает в качестве утеплителя при эксплуатации помещений. На монтаже плит перекрытия используются пенополистирольные панели, пространство между которыми заполняется расчетным количеством бетона.

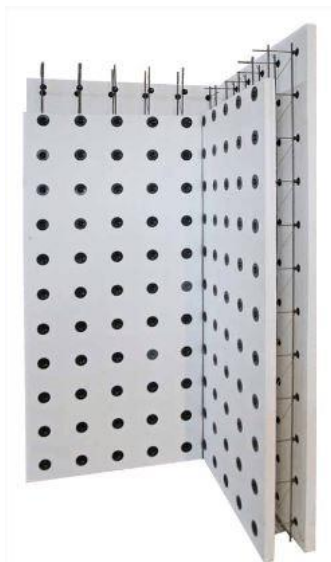


Рисунок 4.5 – Каркас стены по технологии PLASTBAU [105]

Таким образом, в качестве объектов наблюдений для решения задач диссертационной работы выступают 4 десятиэтажных сложноконструктивных сооружения, состоящие в общей сложности из 10 секций.

4.2 Конструкция наблюдательной станции на исследуемых объектах

Конструкция наблюдательной станции при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений состоит из сети опорных и рабочих реперов.

Опорные реперы представляют из себя забетонированные трубы диаметром 30 мм с обустроенным на конце якорем. Конструкция опорных реперов на площадках А и Б изображена на рисунке 4.6. На площадках А и Б было заложено по 2 репера опорной сети.

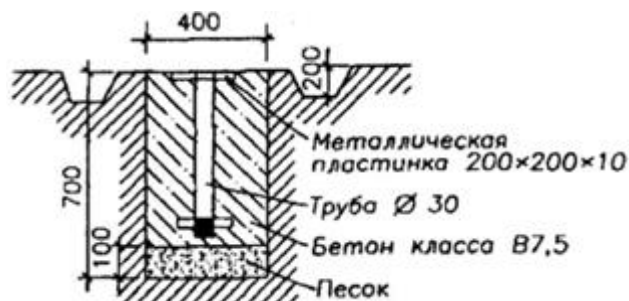


Рисунок 4.6 – Конструкция репера опорной сети

Реперы опорной сети были заложены в количестве 2-х единиц на строительный объект в соответствии с требованиями СНиП [107], что вполне удовлетворяет возможности проведения разбивочных и съемочных работ, а также для проведения мониторинга осадок сооружений. Однако, для мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений сеть опорных реперов, состоящая из 2-х пунктов, не соответствует поставленным задачам и особенностям воздействия геодинамических движений. Поэтому, было произведено расширение наблюдательной станции и вынос опорных реперов на конструкции близлежащих сооружений. Для этой цели были использованы геодезические марки, применяющиеся для разбивочных работ (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Тип марки, применяемый для расширения сети опорных реперов

При этом было принято допущение, что вновь созданные марки обустроены в местах, не подверженных процессам сдвига и оседания земной поверхности. Обязательным требованием было то, что при различных сериях наблюдений для

каждой стеновой марки использовались одни и те же пункты сети сгущения в качестве опорной сети.

Схемы расположения расширенной сети опорных реперов на площадках А и Б показаны на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно.

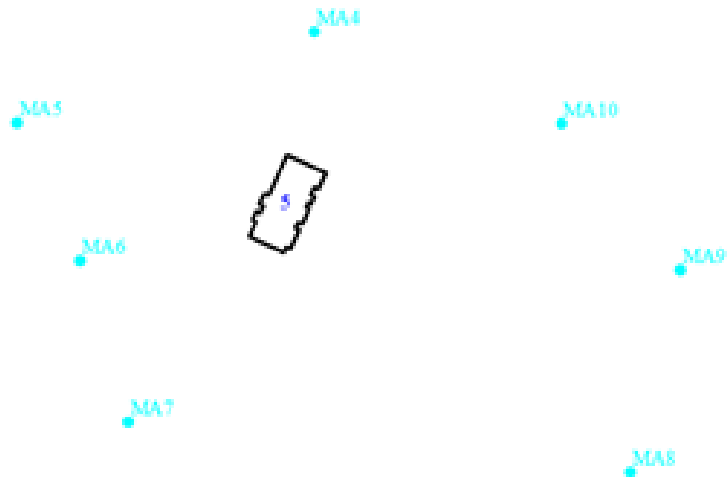


Рисунок 4.8 – Схема расположения опорных реперов и марок на площадке А

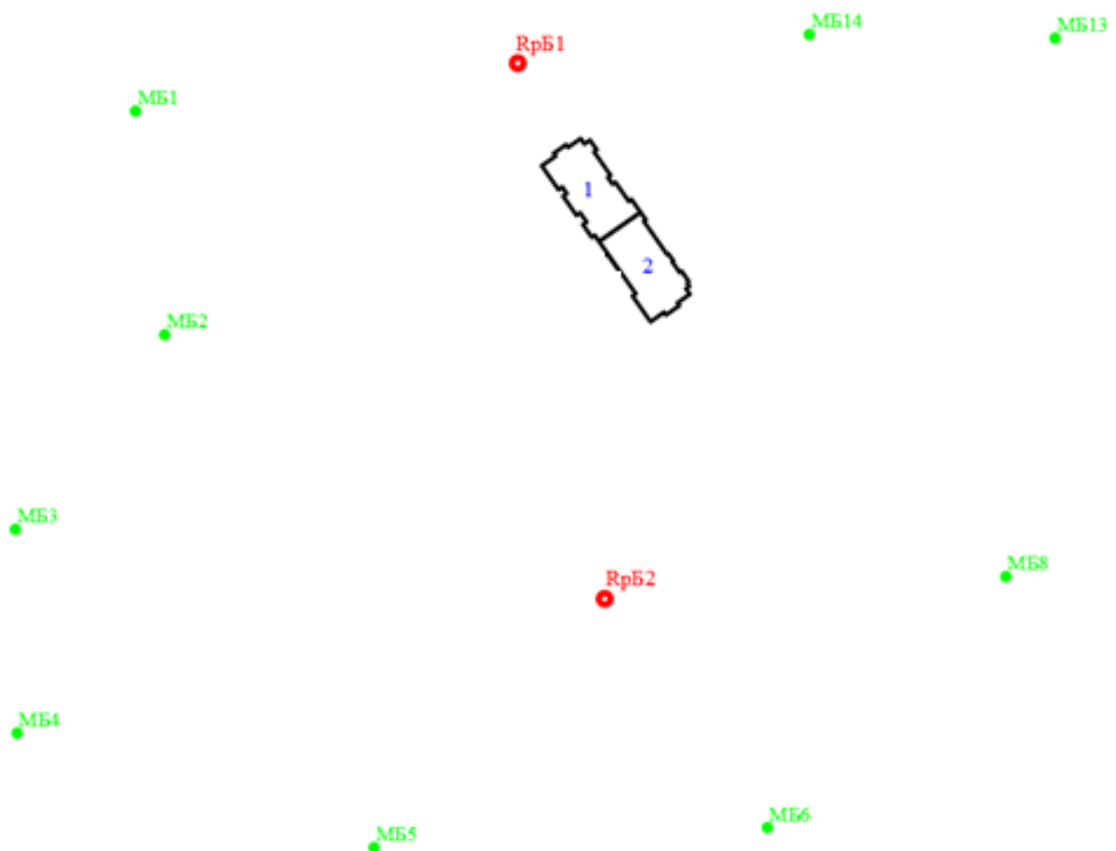


Рисунок 4.9 – Схема расположения опорных реперов и марок на площадке Б

После расширения сети опорных реперов на площадке А было обустроено 15 опорных марок, на площадке Б – 14 опорных марок. Данная опорная сеть в полной мере удовлетворяла количественным требованиям к конструкции наблюдательной станции для проведения мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений.

Конструкция рабочих реперов на исследуемых объектах представляет собой стеновую марку с возможностью проведения инструментальных замеров вертикальной и горизонтальной компонент деформационных процессов. Стеновые марки представляют собой штыри из арматуры двадцатого диаметра длиной 15-17 см. Для устройства стеновой марки в стенах цокольного этажа (или в плите перекрытия цокольного этажа) перфоратором пробуривалось отверстие глубиной до 10-12 см. В данном отверстии с помощью химического анкера до упора закреплялись специальные заранее заготовленные арматурные пруты. Они закреплялись таким образом, чтобы выступающая часть марки выходила из бетона не более чем на 4-6 см (рисунок 4.10). Затем, на выступающем конце арматуры стачивалась плоская площадка, на которой аккуратно вырезались пересекающиеся насечки толщиной не более 0,5 мм. Точка пересечения этих насечек и являлась контролируемым центром стеновой марки.



Рисунок 4.10 – Применяемая на опытно-промышленных объектах конструкция рабочего репера

На каждый опытно-промышленный объект было заложено по 4-6 рабочих реперов таким образом, чтобы они формировали кольцевую наблюдательную станцию.

Схема размещения рабочих реперов на техногенных объектах А и Б отображена на рисунке 4.11.

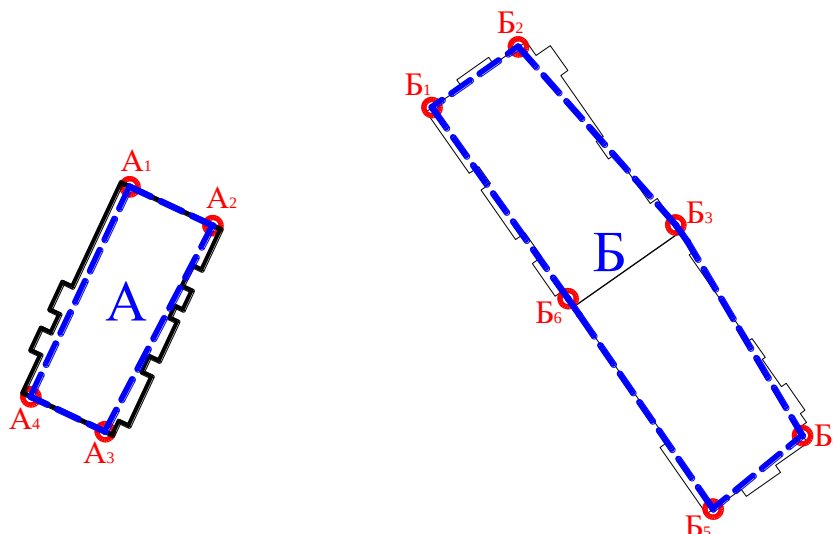


Рисунок 4.11 – Кольцевые наблюдательные станции на сооружениях А и Б

Таким образом, для проведения мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений на техногенном объекте А была построена наблюдательная станция, состоящая из 15 опорных и 4 рабочих реперов. На площадке Б была создана наблюдательная станция, состоящая из 14 опорных и 6 рабочих реперов.

4.2 Используемая аппаратура, методика, обработка данных

Мониторинг горизонтальных и вертикальных деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений проводился различными инструментальными методами.

Измерения горизонтальной компоненты сдвижения выполнялись с помощью высокоточного электронно-оптического тахеометра Sokkia Set 550RX с заданной погрешностью измерения горизонтальных углов $5''$, а также ошибкой измерения расстояний $2+2$ мм/км (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Электронно-оптический тахеометр Sokkia 550RX

Для используемой модели тахеометра был произведен предрасчет точности, согласно которому было установлено, что для достижения ошибки определения планового положения рабочих реперов менее 5 мм, необходимо производить их измерения на расстоянии не более 123 м. Подробный расчет приведен ниже.

Средняя квадратическая погрешность в плане:

$$M^2_{x,y} = m_s^2 + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot S^2,$$

где m_s – ошибка измерения расстояний.

Для тахеометра Sokkia 550RX при расстоянии измерений до 123 м ошибка измерения расстояний составит:

$$m_s = 2 + 2 \text{ мм/км} = 2 + 2 \cdot 0,123 = 2,25 \text{ мм};$$

ρ – число секунд в одном радиане, $\rho = 206265''$.

m_β – погрешность определения горизонтального угла, сек.;

$$m_\beta = \pm \sqrt{m_i^2 + m_{\text{ци}}^2};$$

где m_i – погрешность измерения угла, сек

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{m_o^2}{n} + \frac{m_b^2}{n}};$$

где m_o – погрешность отсчитывания, сек

Погрешность отсчитывания в электронных тахеометрах свободна от ошибок человека, поэтому она принята равной паспортной 5'' – для Sokkia 550RX.

m_v – погрешность визирования, м;

$$m_v = \pm \frac{60''}{v};$$

где v – увеличение зрительной трубы (для Sokkia 550RX – 30X);

$$m_v = \pm \frac{60''}{30} = 2''.$$

Инструментальная ошибка при использовании электронного тахеометра определяется для одного кругового приема $n=1$, т.к. измерение углов большим числом приемов лишено смысла, поскольку этот метод имеет целью устранение погрешностей градуировки лимба, а управление его положением в приборе не предусмотрено.

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{m_o^2}{n} + \frac{m_v^2}{n}} = 5,38''.$$

$m_{цi}$ – погрешность от неточного центрирования прибора и сигнала, исключается, так как тахеометр не устанавливается над точкой с известными координатами.

$$m\beta = \pm m_i = 5,38'';$$

$$M_{xy}^2 = 2,25^2 + \frac{5,38^2}{206265^2} * 150000^2 = 15,3;$$

$$M_{xy} = 3,9 \text{ мм.}$$

Средняя квадратическая погрешность по высоте:

$$m_{\Delta z} = \sqrt{\left(\frac{m_\delta}{\rho} L \cos \delta\right)^2 + (m_L \sin \delta)^2 + m_i^2 + m_g^2};$$

где m_L – погрешность определения расстояний (для Sokkia 550RX $m_L = \pm(2 + 2 * D * 10^{-6})$ $m_L = \pm(2 + 2 * 123000 * 10^{-6}) = 2,25 \text{ мм};$

m_i, m_g – погрешности определения превышения тахеометра над репером и вехи над репером (исключаются).

m_δ – погрешность измерения вертикального угла, сек.;

$$m_\delta = \pm \sqrt{\frac{m_o^2}{n} + \frac{m_v^2}{n}} = 5,38;$$

В качестве возможного варианта приняты расстояние и угол наклона до репера: $L=123\text{ м}$ и $\delta=20^\circ$, тогда:

$$m_{\Delta z} = \sqrt{\left(\frac{5,38}{206265} * 123000 * \cos 20\right)^2 + (1,6 * \sin 20)^2} = 3,06 \text{ мм.}$$

Общая ошибка положения определяемых пунктов составляет:

$$M_{\text{общ}}^2 = M_{X,Y}^2 + m_{\Delta z}^2;$$

$$M_{\text{общ}} = \sqrt{3,9^2 + 3,06^2} = 4,97 \text{ мм.}$$

Таким образом, для достижения общей ошибки положения рабочих реперов не более 5 мм при измерениях тахеометром Sokkia 550RX, необходимо производить наблюдения с расстояния не более 123 м.

Для наглядности зависимость общей ошибки определения положения рабочего репера от расстояния методом круговых приемов для тахеометра Sokkia 550RX отображена на графике на рисунке 4.13.

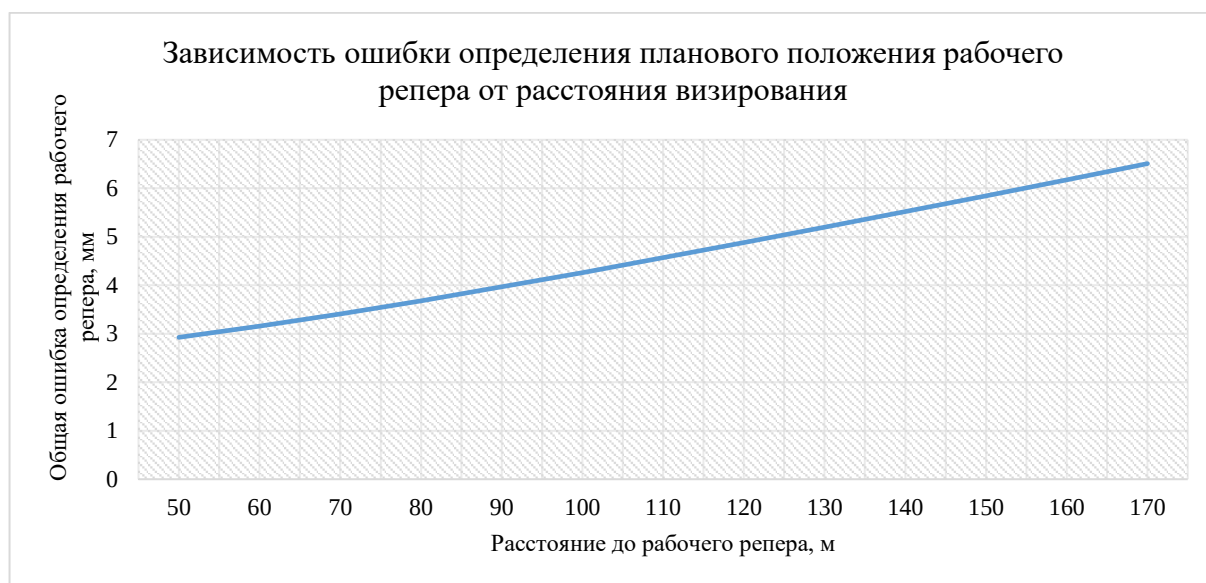
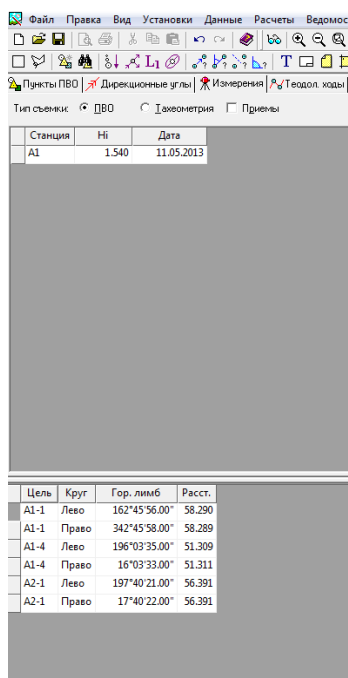


Рисунок 4.13 – График зависимости ошибки определения планового положения рабочего репера от расстояния визирования для тахеометра Sokkia 550RX

Измерения плановых деформаций рабочих реперов, произошедших под воздействием современных геодинамических движений, проводились методом круговых приемов в 1 прием. Для достижения наибольшей точности при определении положения рабочих реперов тахеометр устанавливался на расстоянии, не превышающем 61,5 м. Ошибка определения положения рабочего репера при таких расстояниях согласно вышеприведенному графику составляет 3,2 мм.

Измеренные электронно-оптическим тахеометром данные сохранялись в памяти прибора. Обработка результатов измерений, выполненных способом приемов выполнялась в программном продукте Credo DAT (рисунок 4.14).



Ведомость предобработки

Станция	Цель	Направление	Гор. проложение	Класс точности
1	2	3	4	5
A1	A1-1	0°00'00.00"	58.290	1-разряд
	A1-4	33°17'37.00"	51.310	1-разряд
	A2-1	34°54'24.50"	56.391	1-разряд

Рисунок 4.14 – Обработка измерений горизонтальной компоненты сдвижения со станции A1 на площадке А в ПО Credo DAT

Измерения вертикальной компоненты сдвижений проводились геометрическим нивелированием с помощью высокоточного цифрового нивелира Sokkia SDL30 (рисунок 4.15) путем прокладки замкнутого нивелирного хода между рабочими реперами.



Рисунок 4.15 – Цифровой нивелир Sokkia SDL30

Погрешность определения высотной отметки репера нивелиром Sokkia SDL30 с расстояния 75 м составляет:

$$M_{H_i} = \frac{75\sqrt{2}}{206265} \sqrt{100''^2 + (0,1 \cdot 30'')^2} = 0,05 \text{ мм}$$

Так как не представлялось возможным выдержать одно расстояние от нивелира до рабочего репера при съемке, был построен график зависимости ошибки определения высотного положения пункта от расстояния визирования (рисунок 4.16).

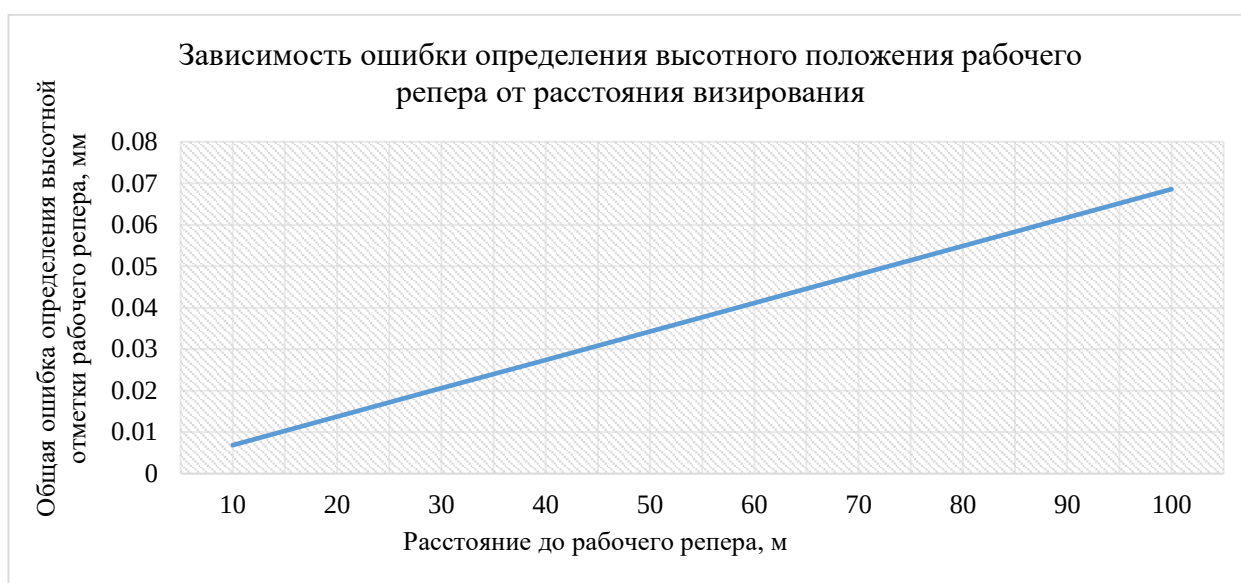
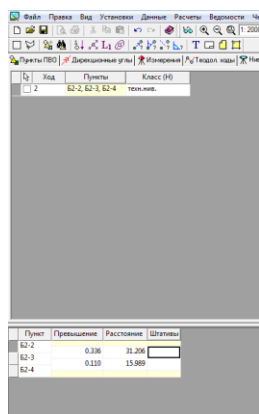


Рисунок 4.16 – График зависимости ошибки определения высотного положения рабочего репера от расстояния визирования для нивелира Sokkia SDL30

Схемы проведения высокоточных нивелирных съемок были разработаны таким образом, чтобы максимальное расстояние от станции до рабочего репера не превышало 75 м.

Измеренные цифровым нивелиром данные сохранялись в памяти прибора. Обработка результатов измерений выполнялась в программном продукте Credo DAT (рисунок 4.17).



Нивелирные ходы

Ход: 2	Класс техн. нив.		
Пункт	Превышение	Расстояние	Штативы
Б2-2	0.336	31.206	
Б2-3	0.110	15.989	
Б2-4			

Рисунок 4.17 – Обработка измерений вертикальной компоненты сдвижения на сооружении Б в ПО Credo DAT

4.3 Результаты мониторинга горизонтальных деформаций сооружений

Мониторинг горизонтальной компоненты сдвижений под воздействием современных геодинамических движений проводился на сооружениях А и Б.

Наблюдательные станции на данных сооружениях представлены в виде замкнутых кольцевых профильных линий. Наблюдательная станция на сооружении А представлена 4-мя линиями, на сооружении Б – 6-ю линиями (см. рисунок 4.11).

На сооружениях с периодичностью 1 раз в месяц, с февраля по сентябрь 2013 года, определялось плановое положение рабочих реперов.

На основании полученных результатов измерений на профильных линиях для каждой серии наблюдений были вычислены относительные деформации по формуле, в соответствии с законом Гука:

$$\varepsilon = \Delta X / L,$$

где ΔX – это разница вычисленных между сериями наблюдений координат реперов; L – расстояние между реперами (длина линии).

Результаты рассчитанных горизонтальных деформаций на профильных линиях сооружений объектов А и Б отображены в таблицах 4.1 и 4.2 соответственно. Для анализа степени воздействия современных геодинамических движений был принят критерий модуля относительных горизонтальных деформаций. Графики средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций показаны на рисунках 4.18 и 4.19.

Таблица 4.1 – Горизонтальные деформации наблюдательной станции на объекте А (г. Сочи)

Реперы	Интервалы линий по сериям наблюдений L, м								Изменения длин, мм								Горизонтальные деформации ε, мм/м								Горизонтальные деформации ε по модулю, мм/м							
	02.13 (1)	03.13 (2)	04.13 (3)	05.13 (4)	06.13 (5)	07.13 (6)	08.13 (7)	09.13 (8)	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7			
A1	13.157	13.147	13.152	13.164	13.145	13.148	13.143	13.15	-7	3	-2	-14	5	2	7	-0.010	0.006	-0.005	-0.007	0.004	0.002	0.006	0.010	0.006	0.005	0.007	0.004	0.002	0.006			
A2	32.204	32.201	32.203	32.206	32.206	32.2	32.206	32.208	4	7	5	2	2	8	2	0.018	0.006	0.005	0.011	0.006	0.005	0.006	0.018	0.006	0.005	0.011	0.006	0.005	0.006			
A3	11.695	11.695	11.689	11.694	11.691	11.697	11.687	11.691	-4	-4	2	-3	0	-6	4	-0.004	-0.006	0.004	-0.002	0.006	-0.003	0.008	0.004	0.006	0.004	0.002	0.006	0.003	0.008			
A4	32.181	32.184	32.18	32.187	32.186	32.184	32.18	32.187	6	3	7	0	1	3	7	0.000	0.004	0.006	0.008	0.004	0.004	0.007	0.000	0.004	0.006	0.008	0.004	0.004	0.007			
A1																																

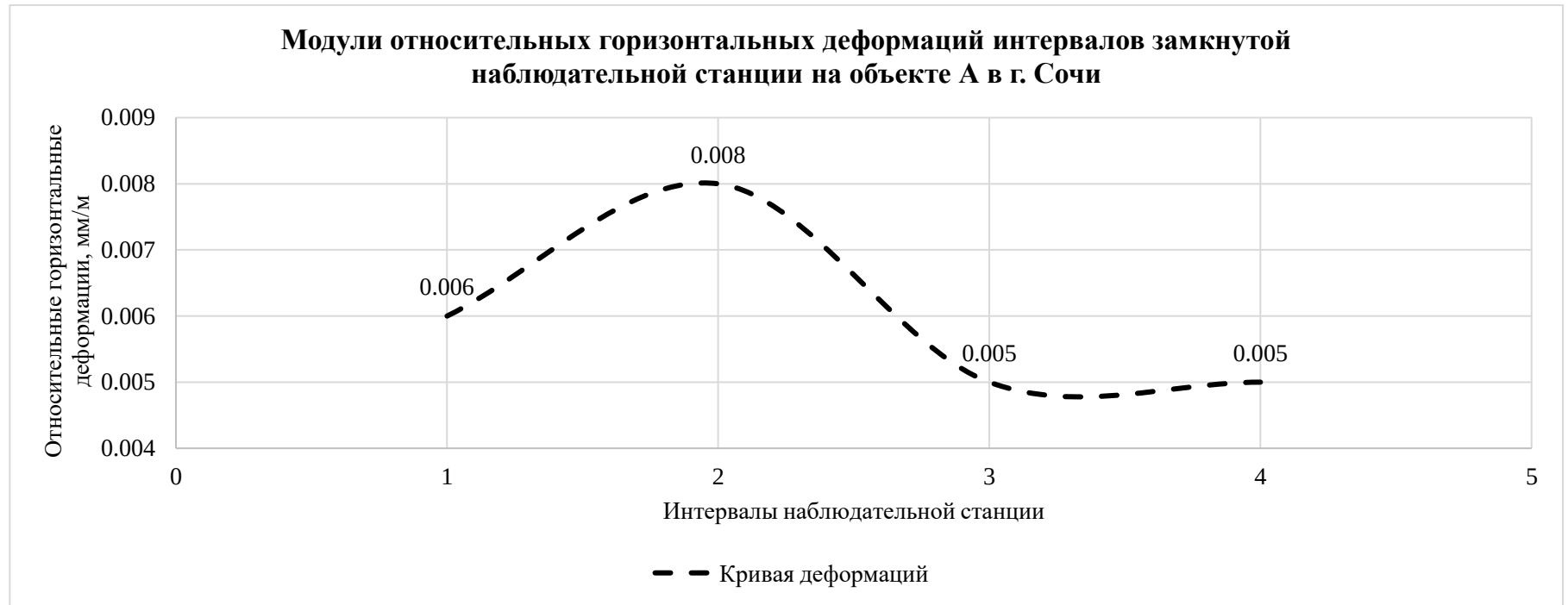


Рисунок 4.18 – График средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций на наблюдательной станции объекта А (г. Сочи)

Таблица 4.2 – Горизонтальные деформации наблюдательной станции на объекте Б (г. Сочи)

Реперы	Интервалы линий по сериям наблюдений L, м								Изменения длин, мм							Горизонтальные деформации ε, мм/м							Горизонтальные деформации ε по модулю, мм/м						
	02.13 (1)	03.13 (2)	04.13 (3)	05.13 (4)	06.13 (5)	07.13 (6)	08.13 (7)	09.13 (8)	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7
Б1	12.706	12.704	12.704	12.705	12.709	12.705	12.708	12.707	1	3	3	2	-2	2	-1	0.005	0.013	0.009	0.008	-0.008	0.006	-0.005	0.005	0.013	0.009	0.008	0.008	0.006	0.005
Б2	0																												
Б3	29.827	29.85	29.824	29.826	29.828	29.86	29.83	29.839	12	-11	15	13	11	-21	9	0.023	-0.020	0.020	0.021	0.019	-0.025	0.017	0.023	0.020	0.020	0.021	0.019	0.025	0.017
Б4	0																												
Б5	21.735	21.736	21.736	21.738	21.737	21.738	21.736	21.735	0	-1	-1	-3	-2	-3	-1	0.000	-0.002	-0.002	-0.007	-0.005	-0.005	-0.003	0.000	0.002	0.002	0.007	0.005	0.005	0.003
Б6	0																												
Б7	14.059	14.056	14.055	14.056	14.058	14.054	14.055	14.057	-2	1	2	1	-1	3	2	-0.008	0.004	0.006	0.003	-0.004	0.007	0.008	0.008	0.004	0.006	0.003	0.004	0.007	0.008
Б8	0																												
Б9	35.096	35.098	35.098	35.095	35.099	35.099	35.097	35.097	1	-1	-1	2	-2	-2	0	0.002	-0.002	-0.001	0.003	-0.003	-0.002	0.000	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.000
Б10	0																												
Б11	33.968	33.943	33.935	33.942	33.94	33.94	33.939	33.955	-13	12	20	13	15	15	16	-0.019	0.023	0.018	0.022	0.016	0.027	0.006	0.019	0.023	0.018	0.022	0.016	0.027	0.006

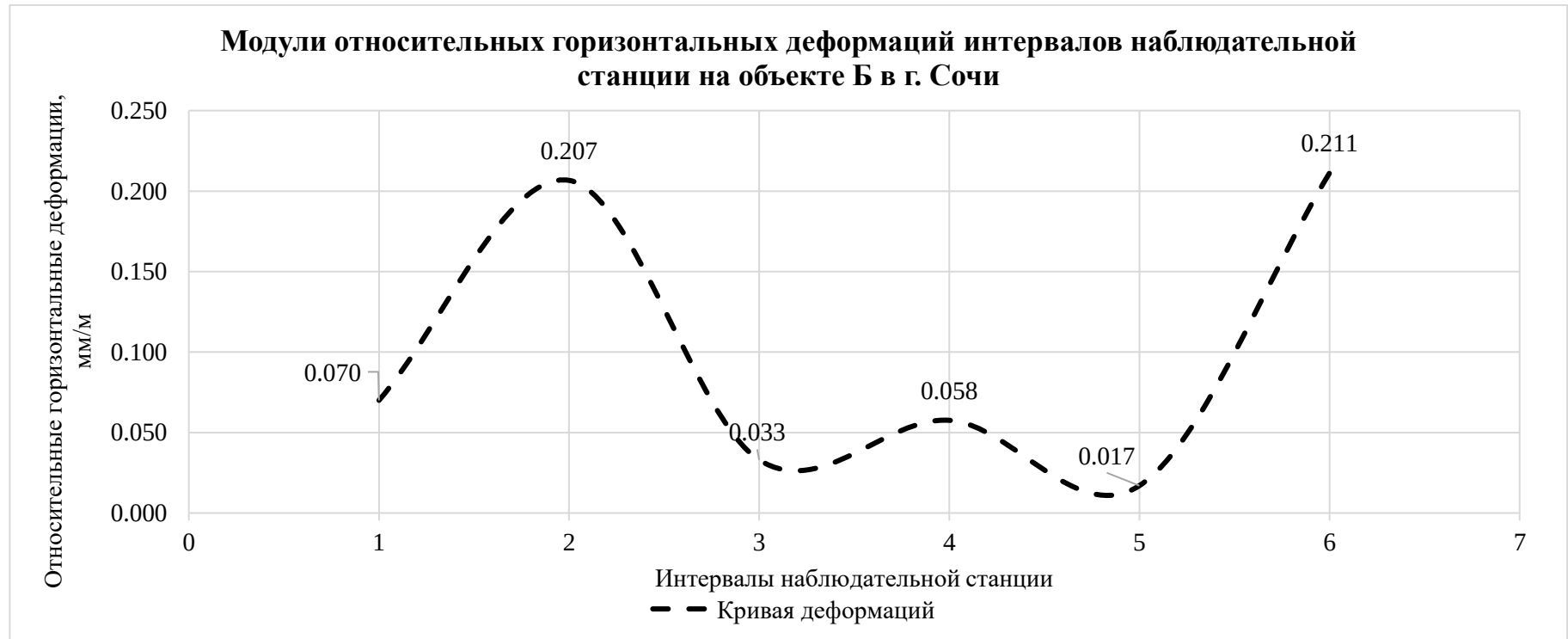


Рисунок 4.19 – График средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций на наблюдательной станции объекта Б (г. Сочи)

Как видно из графика средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций на сооружении А, максимальные деформации сосредоточены на интервале от репера А2 до репера А3, однако, их величины достаточно приближены к величинам деформаций других профильных линий и превышают их не более, чем в 1.6 раза.

График относительных горизонтальных деформаций на сооружении Б показывает, что наибольшие деформации присутствуют на профильных линиях Б2-3 и Б8-1, и достигают среднюю величину 0.21 мм/м. Максимальные и минимальные величины деформаций на других профильных линиях не превышают значения 0.07, что меньше величин деформаций на профильных линиях Б2-3 и Б8-1 в 3 раза.

При сопоставлении результатов измерений горизонтальных деформаций на сооружении Б со структурной характеристикой вмещающего массива видно, что максимальные деформации присущи профильным линиям 2-3 и 6-1, расположенным в зоне влияния тектонического разлома (рисунок 4.20). Это характеризует степень влияния современных геодинамических движений, сконцентрированных на границе структурного блока, на величины деформаций техногенного объекта, под их воздействием.

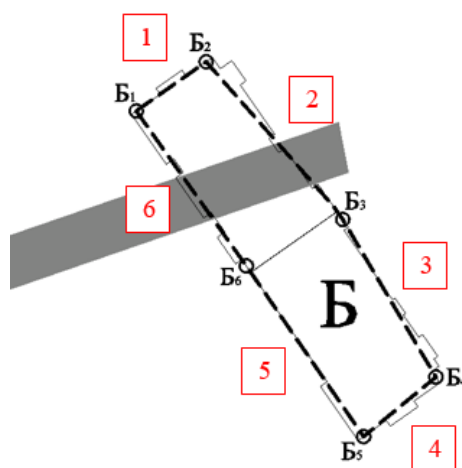


Рисунок 4.20 – Расположение тектонического разлома относительно наблюдательной станции сооружения Б

Таким образом, анализ результатов мониторинга горизонтальных деформаций на объектах в г. Сочи показал, что пиковые значения величин модулей относительных горизонтальных деформаций, полученные по результатам

мониторинга, характеризуют степень воздействия и концентрацию современных геодинамических движений в зонах дислокации тектонических разломов, представляющих из себя границы вторичных структурных блоков.

Для заверки представленного выше заключения рассмотрены результаты мониторинга деформационных процессов на других объектах недропользования. В частности, произведен анализ величин модулей относительных деформаций по профильным линиям на карьерах Олимпиадинского и Благодатнинского месторождений Красноярского края.

Структурные особенности указанных объектов хорошо изучены, и имеется ясное представление о расположении тектонических структур во вмещающем их массиве горных пород.

При анализе деформаций на карьере «Восточный» Олимпиадинского месторождения использованы данные сдвижения 13-ти реперов, формирующих кольцевую наблюдательную станцию (рисунок 4.21).

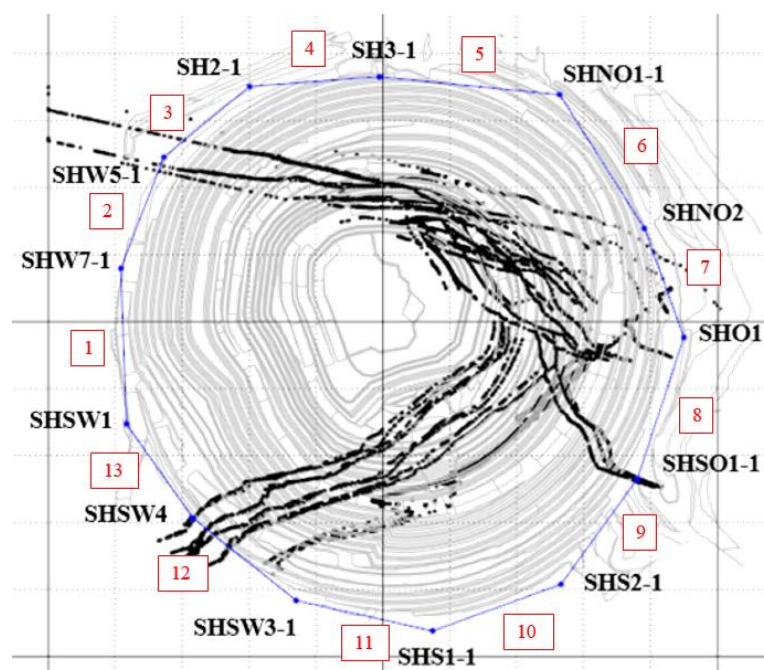


Рисунок 4.21 – Кольцевая наблюдательная станция на карьере «Восточный» Олимпиадинского ГОКа

Рассмотрены деформации 13-ти наблюдательных линий. Результаты обработки отображены в таблице 4.3, а также виде графика на рисунке 4.22.

Таблица 4.3 – Горизонтальные деформации наблюдательной станции на Олимпиадинском месторождении

[illegible]



Рисунок 4.22 – График средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций на наблюдательной станции карьера «Восточный»

На полученном графике заметно, что наибольшие значения величин модулей относительных горизонтальных деформаций на карьере «Восточный» присущи участкам, приуроченным к линиям SHO1-SHSO1.1, SHSO1.1-SHS2.1, а также SHSW3.1-SHSW4.

При сопоставлении результатов анализа модулей горизонтальных деформаций со структурной характеристикой массива горных пород Олимпиадинского месторождения видно, что участки проявления максимальных величин деформаций приурочены к тектоническим разломным зонам, являющимся границами вторичных структурных блоков (рисунок 4.23). Повышенные деформации в этих зонах свидетельствуют о том, что на наблюдаемых границах вторичных структур проявляется действие современных геодинамических движений.

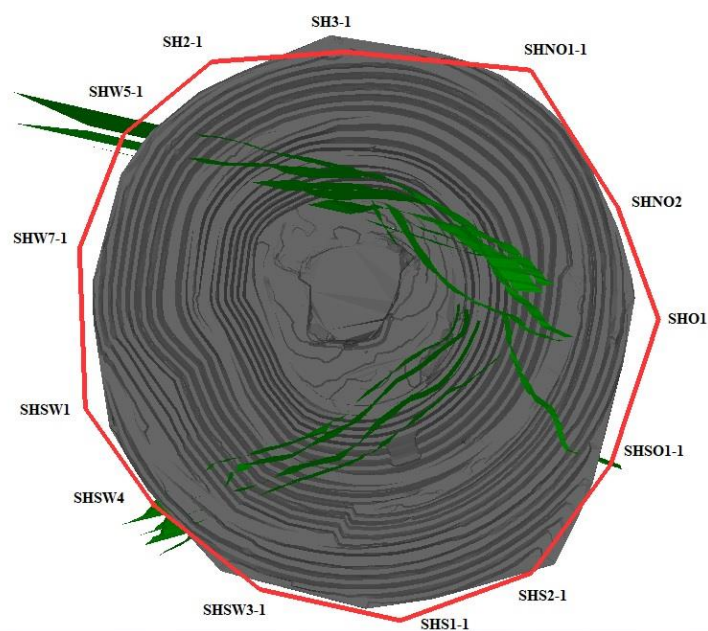


Рисунок 4.23 – Расположение тектонических разломов относительно наблюдательной станции на Олимпиадинском месторождении

При анализе результатов мониторинга на карьере «Благодатный» Благодатнинского месторождения использованы данные сдвижения 5-ти реперов, формирующих 4 наблюдательные линии (рисунок 4.24).

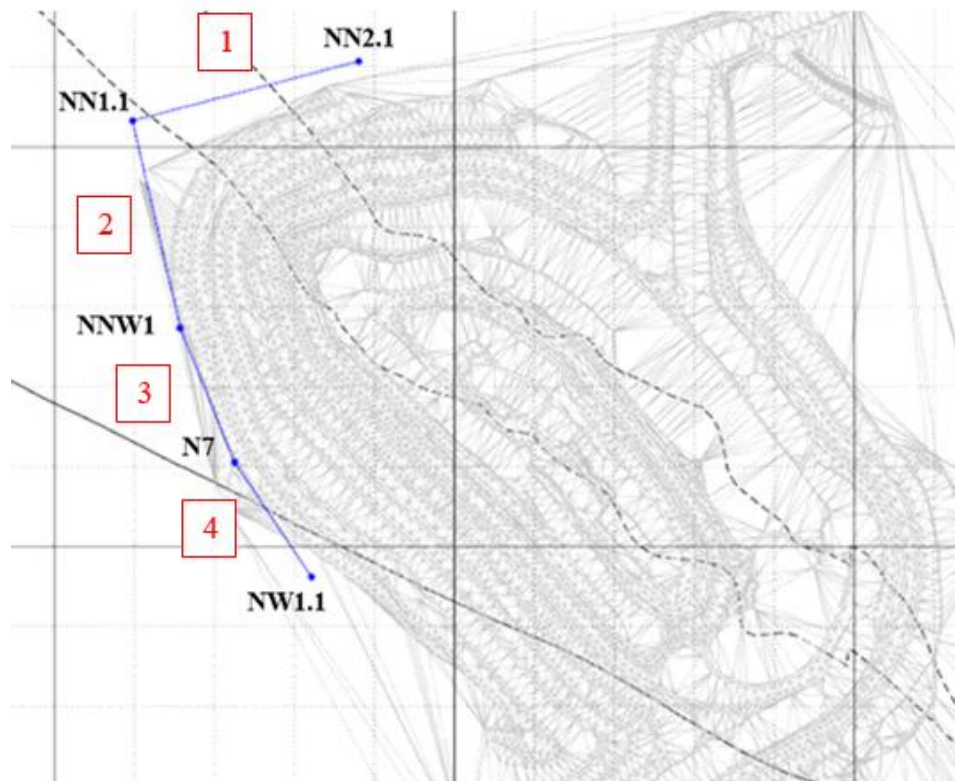


Рисунок 4.24 – Наблюдательная станция на карьере «Благодатный»
Благодатнинского ГОКа

Рассчитанные по результатам мониторинга относительные горизонтальные деформации отображены в таблице 4.4. График распределения величин модулей относительных горизонтальных деформаций на наблюдательной станции показан на рисунке 4.25.

Таблица 4.4 – Горизонтальные деформации наблюдательной станции на Благодатнинском месторождении

[illegible]



Рисунок 4.25 – График средних значений модулей относительных горизонтальных деформаций на наблюдательной станции карьера «Благодатный»

Как заметно из графика, пиковые значения модулей относительных горизонтальных деформаций на карьере «Благодатный» присущи участкам, приуроченным к линиям NN2.1-NN1.1 и N7-NW1.1.

При сопоставлении результатов анализа деформаций со структурной характеристикой массива горных пород Благодатнинского месторождения видно, что участки проявления максимальных величин модулей деформаций приурочены к тектоническим разломным зонам, являющимся границами вторичных структурных блоков (рисунок 4.26). Повышенные значения модулей горизонтальных деформаций в этих зонах свидетельствуют о том, что на наблюдаемых границах вторичных структур проявляется действие современных геодинамических движений.

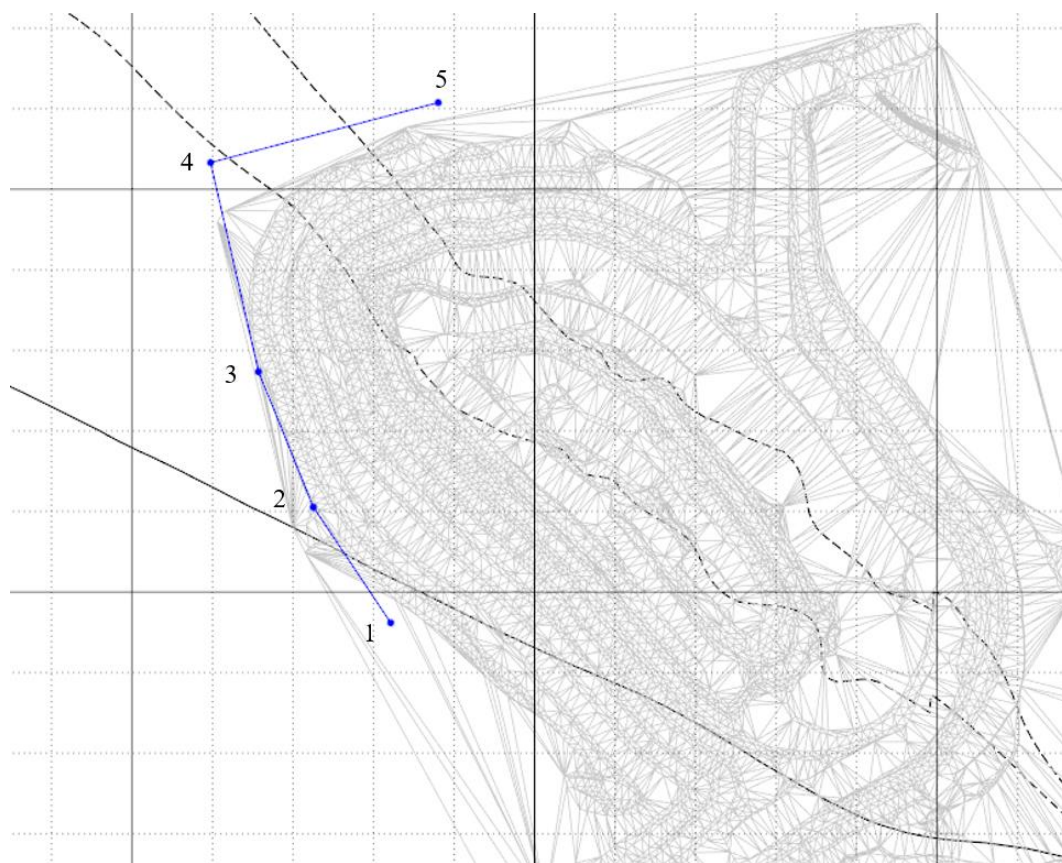


Рисунок 4.26 – Расположение тектонического разлома относительно наблюдательной станции на Благодатнинском месторождении

Сводные результаты превышения модулей относительных горизонтальных деформаций, протекающих на границах вторичных структурных блоков, относительно деформаций во внутриблочных областях, показаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Превышение относительных горизонтальных деформаций на границах структурных блоков над деформациями, протекающими во внутриблоковых областях

Объект исследования	Максимальные деформации во внутриблоковых областях, мм/м	Деформации на границах структурных блоков под воздействием СГД, мм/м	Превышение деформаций под воздействием СГД над максимальными деформациями во внутриблоковых областях, кол-во раз
Относительные горизонтальные деформации			
Техногенный объект в г Сочи	0.070	0.207	3.0
		0.211	3.0
Карьер «Восточный»	0.076	0.472	6.2
		0.444	5.8
		0.226	3.0
Карьер «Благодатный»	0.013	0.042	3.2
		0.08	6.2

Полученные на различных объектах недропользования результаты говорят о том, что величины модулей относительных горизонтальных деформаций, возникающих в объектах недропользования под воздействием современных геодинамических движений, более чем в 3 раза превышают величины деформаций во внутриблоковых областях вторичных структур.

4.4 Результаты мониторинга вертикальных деформаций сооружений

Мониторинг вертикальных деформаций под воздействием современных геодинамических движений проводился на сооружениях техногенных объектов А и Б с периодичностью 1 раз в месяц.

Рассчитанные на основе результатов мониторинга относительные вертикальные деформации сведены в таблицы 4.6 и 4.7.

В соответствии с результатами мониторинга построены графики средних значений модулей относительных вертикальных деформаций на объектах А и Б в городе Сочи (рисунки 4.27-4.28).

По аналогии с анализом горизонтальных деформаций, произведено сравнение полученных результатов мониторинга вертикальных деформаций с результатами, полученными при мониторинге деформационных процессов на Олимпиадинском и Благодатнинском месторождениях. Результаты мониторинга

относительных вертикальных деформаций на карьерах «Восточный» и «Благодатный» отображены в таблицах 4.8 и 4.9 соответственно.

Построены графики модулей относительных вертикальных деформаций, полученных на Олимпиадинском и Благодатнинском месторождениях. Они отображены на рисунках 4.29 и 4.30 соответственно.

Таблица 4.6 – Вертикальные деформации наблюдательной станции на сооружении А (г. Сочи)

[illegible]



Рисунок 4.27 – График средних значений модулей относительных вертикальных деформаций на наблюдательной станции на объекте А в г. Сочи

Таблица 4.7 – Вертикальные деформации наблюдательной станции на сооружении Б (г. Сочи)

[illegible]

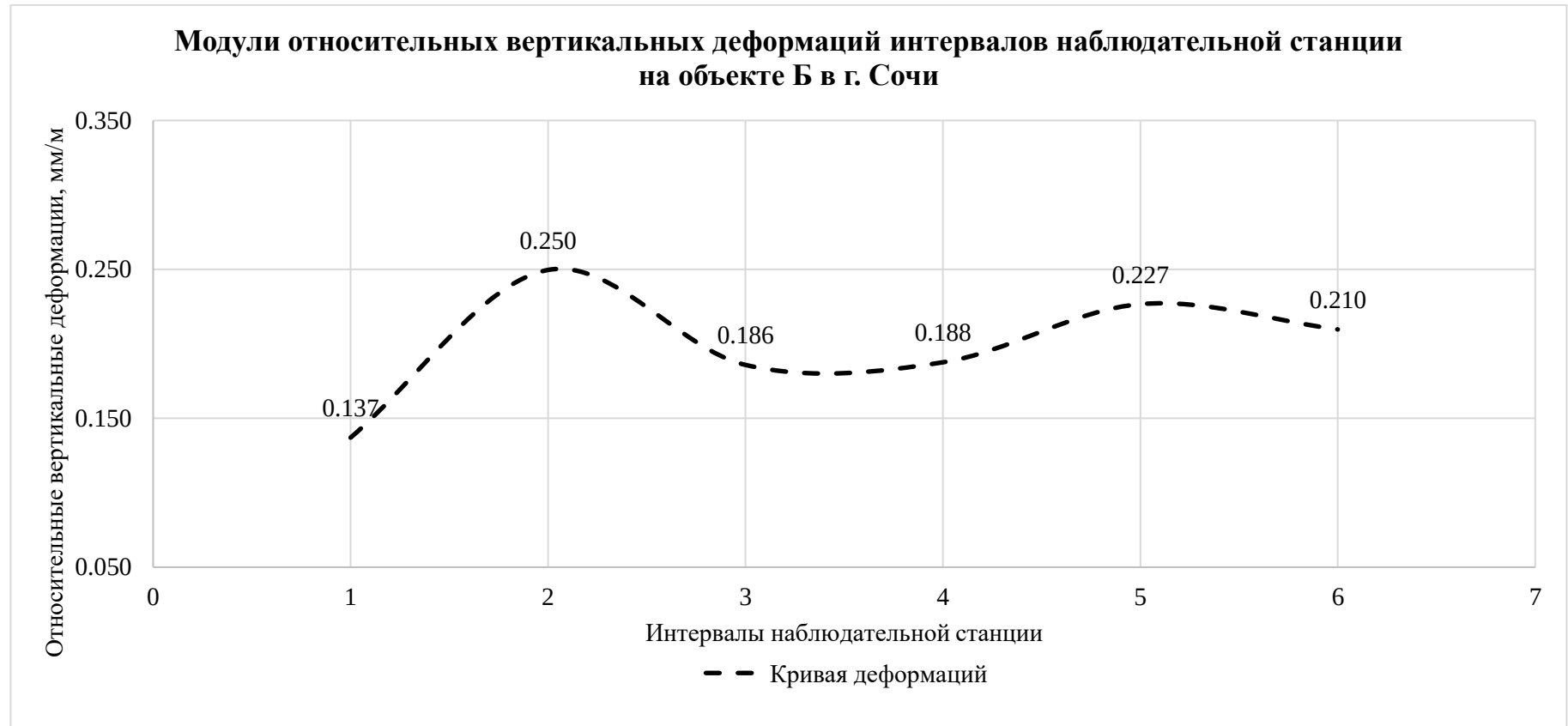


Рисунок 4.28 – График средних значений модулей относительных вертикальных деформаций на наблюдательной станции на объекте Б в г. Сочи

Таблица 4.8 – Вертикальные деформации наблюдательной станции на Олимпиадинском месторождении

Репера	Длина интервала L, м	Отметки реперов линии по сериям наблюдений Н, м						Оседания реперов, мм					Наклоны линий i, мм/м					Наклоны линий i по модулю, мм/м				
		09.14 (1)	02.15 (2)	05.15 (3)	10.15 (4)	02.16 (5)	07.16 (6)	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6
SHSW1	465.441	741.717	741.695	741.705	741.694	741.693	741.699	-18	4	-6	5	6										
SHW7-1		700.446	700.437	700.459	700.459	700.469	700.478	32	41	19	19	9	-0.107	-0.079	-0.054	-0.030	-0.006	0.107	0.079	0.054	0.030	0.006
	356.132												0.132	0.132	0.090	0.098	0.008	0.132	0.132	0.090	0.098	0.008
SHW5-1		675.748	675.739	675.746	675.749	675.727	675.733	-15	-6	-13	-16	6										
	331.749												0.009	-0.036	0.003	-0.036	-0.015	0.009	0.036	0.003	0.036	0.015
SH2-1		666.531	666.507	666.527	666.517	666.502	666.513	-18	6	-14	-4	11										
	386.253												0.028	0.083	0.049	0.026	0.039	0.028	0.083	0.049	0.026	0.039
SH3-1		648.899	648.896	648.903	648.884	648.874	648.87	-29	-26	-33	-14	-4										
	552.639												0.022	0.043	0.040	0.005	0.009	0.022	0.043	0.040	0.005	0.009
SHNO1-1		662.805	662.814	662.819	662.781	662.773	662.764	-41	-50	-55	-17	-9										
	472.309												0.017	-0.070	-0.055	-0.021	0.017	0.017	0.070	0.055	0.021	0.017
SHNO2		665.941	665.909	665.921	665.899	665.909	665.892	-49	-17	-29	-7	-17										
	343.652												0.049	0.049	0.038	0.081	-0.032	0.049	0.049	0.038	0.081	0.032
SHO1		681.319	681.287	681.295	681.288	681.259	681.253	-66	-34	-42	-35	-6										
	423.707												-0.116	-0.045	-0.099	-0.083	-0.014	0.116	0.045	0.099	0.083	0.014
SHSO1-1		709.762	709.76	709.745	709.745	709.745	709.745	-17	-15	0	0	0										
	388.240												0.057	-0.021	0.049	0.059	-0.013	0.057	0.021	0.049	0.059	0.013
SHS2-1		776.741	776.709	776.721	776.725	776.697	776.702	-39	-7	-19	-23	5										
	407.817												-0.010	-0.007	0.002	-0.034	0.020	0.010	0.007	0.002	0.034	0.020
SHS1-1		769.867	769.836	769.852	769.841	769.835	769.832	-35	-4	-20	-9	-3										
	418.725												0.002	0.007	-0.024	0.155	-0.036	0.002	0.007	0.024	0.155	0.036
SHSW3-1		743.417	743.388	743.391	743.455	743.369	743.381	-36	-7	-10	-74	12										
	393.697												-0.028	-0.061	-0.058	-0.030	0.041	0.028	0.061	0.058	0.180	0.317
SHSW4		734.285	734.243	734.247	734.322	734.264	734.26	-25	17	13	-62	-4										
	344.001												-0.020	0.038	0.055	-0.195	-0.029	0.020	0.038	0.055	0.195	0.029
SHSW1		741.717	741.695	741.705	741.694	741.693	741.699	-18	4	-6	5	6										



Рисунок 4.29 – График средних значений модулей относительных вертикальных деформаций на наблюдательной станции на карьере «Восточный»

Таблица 4.9 – Вертикальные деформации наблюдательной станции на Благодатнинском месторождении

Репера	Длина интервала L, м	Отметки реперов линии по сериям наблюдений Н, м						Оседания реперов, мм					Наклоны линий i, мм/м					Наклоны линий i по модулю, мм/м				
		02.15 (1)	05.15 (2)	10.15 (3)	02.16 (4)	07.16 (5)	10.16 (6)	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6
NN2.1	289.835	532.7	532.701	532.699	532.711	532.718	532.7	0	-1	1	-11	-18	0.207	-0.003	0.035	0.003	-0.031	0.207	0.003	0.035	0.003	0.031
NN1.1	268.282	563.514	563.454	563.463	563.466	563.463	563.454	-60	0	-9	-12	-9	-0.130	0.004	-0.063	-0.037	-0.052	0.130	0.004	0.063	0.037	0.052
NNW1	179.464	558.46	558.436	558.427	558.437	558.43	558.435	-25	-1	8	-2	5	0.117	0.017	0.067	0.039	0.028	0.117	0.017	0.067	0.039	0.028
N7	172.800	557.16	557.118	557.118	557.123	557.114	557.114	-46	-4	-4	-9	0	-0.179	-0.041	-0.023	-0.087	0.017	0.179	0.041	0.023	0.087	0.017
NW1.1		559.204	559.186	559.189	559.183	559.192	559.189	-15	3	0	6	-3										

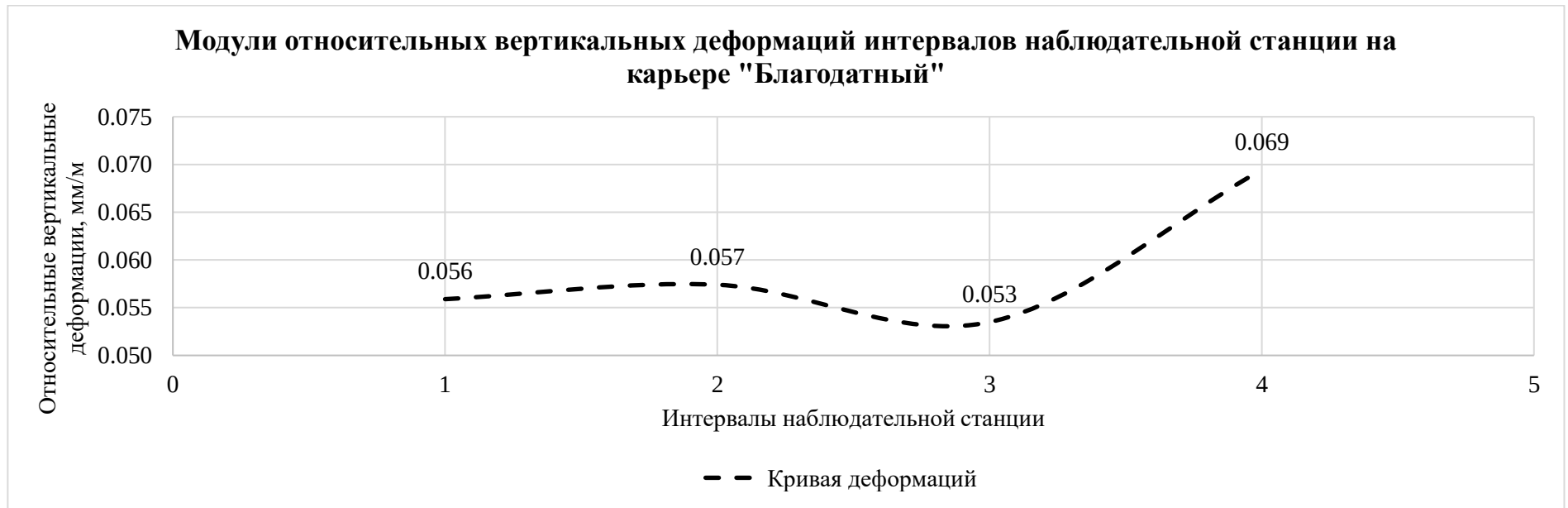


Рисунок 4.30 – График средних значений модулей относительных вертикальных деформаций на наблюдательной станции на карьере «Благодатный»

Результаты мониторинга вертикальной компоненты сдвижения на объектах в городе Сочи показали, что величины модулей относительных вертикальных деформаций сооружений А и Б распределены относительно равномерно как на границах вторичных структур, так и во внутриблочных областях. Однако, в месте дислокации тектонического разлома на объекте Б, а именно, на профильных линиях Б2-Б3 и Б6-Б1, средние величины модулей относительных вертикальных деформаций незначительно превышают величины деформаций, присущие другим профильным линиям.

Аналогичная картина наблюдается при анализе результатов мониторинга вертикальной компоненты сдвижения на Олимпиадинском и Благодатнинском месторождениях. Относительные вертикальные деформации на реперах распределены относительно равномерно, максимальные величины средних значений модулей деформаций зачастую наблюдаются на профильных линиях, расположенных на границах вторичных структурных блоков. К таким профильным линиям относятся пары реперов: на Олимпиадинском месторождении – это интервалы SHO1-SHSO1.1 и SHSW3.1-SHSW4; на Благодатнинском – интервалы N7-NW1.1 и NN2.1-NN1.1. Однако, зависимости величин вертикальных относительных деформаций между собой, локализующихся в зонах вторичного структурирования и внутриблоковых областях, не установлено.

4.5 Сопоставление данных мониторинга вертикальных и горизонтальных деформаций

При анализе результатов мониторинга деформационных процессов на техногенных объектах, расположенных в различных регионах России, рассмотрены абсолютные величины относительных горизонтальных и вертикальных деформаций (см. разделы 4.3 и 4.4).

Для сопоставления результатов мониторинга горизонтальной и вертикальной компонент сдвижения произведено сравнение их суммарных величин по модулю (без учета их знака и направления). Результаты сопоставления горизонтальных и

вертикальных деформаций на объектах А и Б в городе Сочи представлены в виде гистограмм на рисунках 4.31 и 4.32 соответственно.

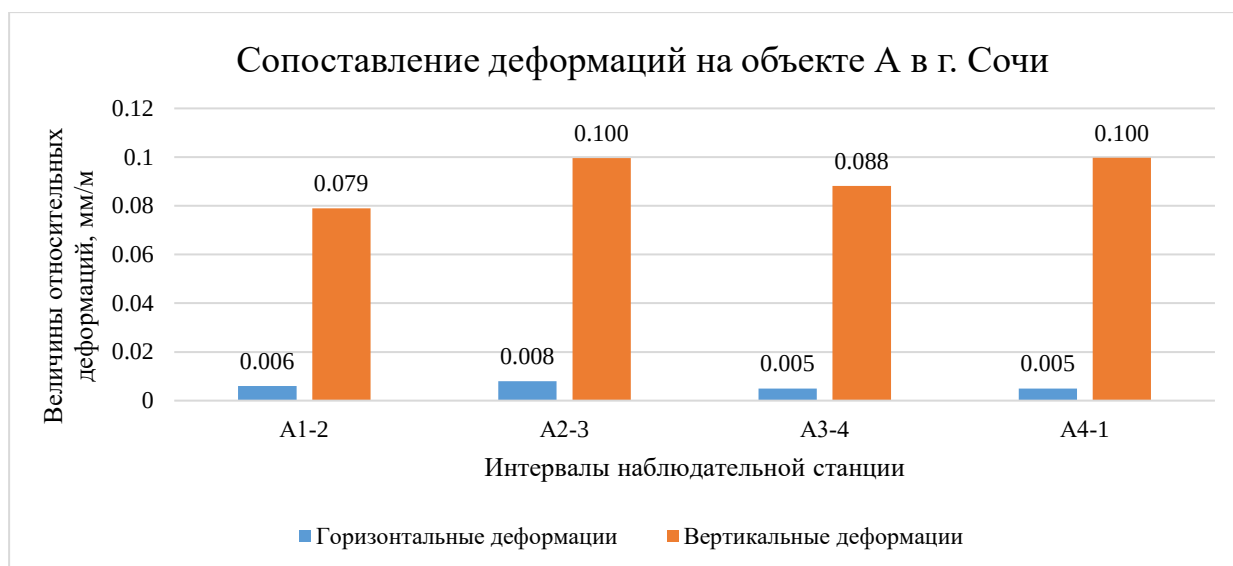


Рисунок 4.31 – Сопоставление горизонтальных и вертикальных деформаций на объекте А в городе Сочи

При сопоставлении модулей относительных деформаций на объекте А в городе Сочи установлено, что величины вертикальных деформаций значительно превышают величины горизонтальных (в 7-12 раз). На объекте А отсутствует информация о наличии тектонических разломных зон.

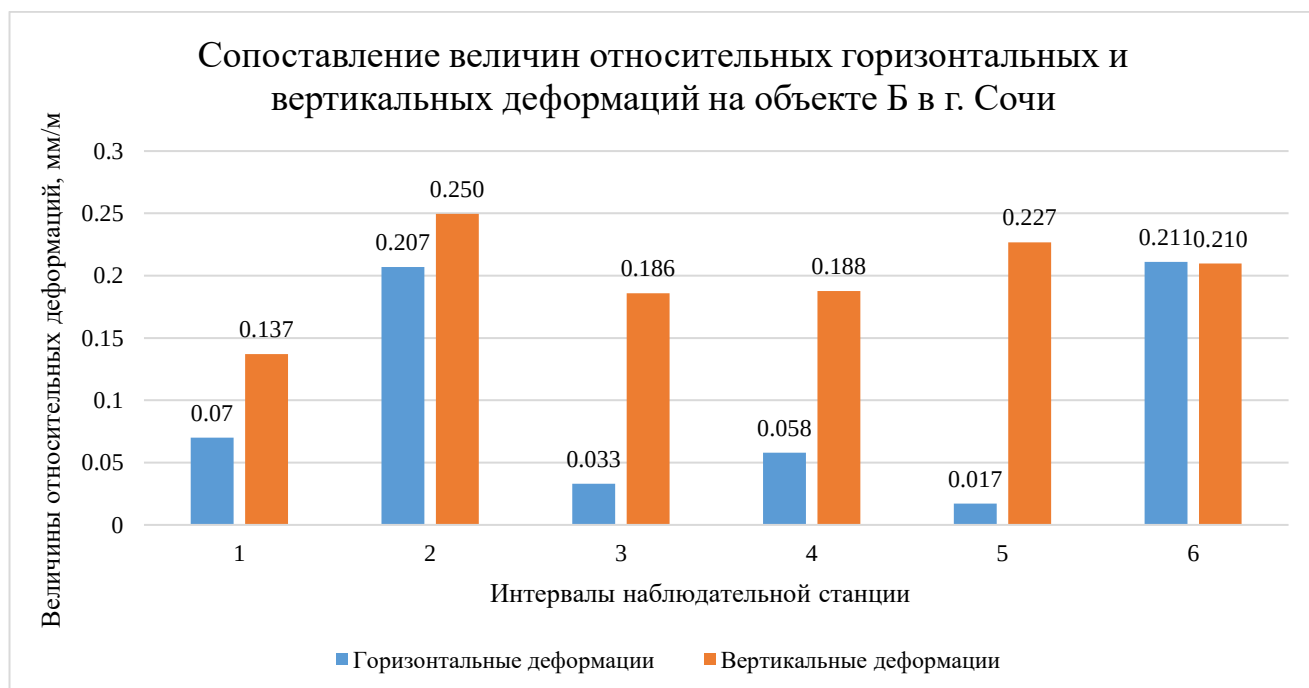


Рисунок 4.32 – Сопоставление горизонтальных и вертикальных деформаций на объекте Б в городе Сочи

При сопоставлении модулей относительных деформаций на объекте Б в городе Сочи установлено, что величины вертикальных деформаций, как правило, значительно превышают величины горизонтальных, за исключением профильных линий Б2-Б3 и Б6-Б1. На этих интервалах величины горизонтальных деформаций сопоставимы с величинами вертикальных. Именно на данных интервалах дислоцирован тектонический разлом, представляющий из себя границу структурного блока (см. рис. 4.20).

Для более глубокого анализа произведено сопоставление горизонтальной и вертикальной компонент сдвижения на Олимпиадинском и Благодатнинском месторождениях, расположенных в Красноярском крае. Результаты сопоставления представлены в виде гистограмм на рисунках 4.33 и 4.34 соответственно.



Рисунок 4.33 – Сопоставление горизонтальных и вертикальных деформаций на Олимпиадинском месторождении



Рисунок 4.34 – Сопоставление горизонтальных и вертикальных деформаций на Благодатнинском месторождении

Как видно из результатов сопоставления величин горизонтальных и вертикальных деформаций на Олимпиадинском месторождении, на некоторых интервалах величины вертикальных деформаций значительно превышают величины горизонтальных. Однако, на интервалах, которые расположены в зонах распространения тектонических нарушений, величины горизонтальных деформаций превышают величины вертикальных (например, на интервалах SHO1-SHSO1.1, SHSO1.1-SHS2.1, SHS1.1-SHSW3.1 и SHSW3.1-SHSW4).

На Благодатнинском месторождении складывается похожая ситуация. Из 4-х профильных линий на 2-х, расположенных во внутриблоковых областях, величины вертикальных деформаций значительно превышают величины горизонтальных.

На профильных линиях, расположенных непосредственно вблизи тектонических разломов, NN2.1-NN1.1 и N7-NW1.1, величины горизонтальных деформаций превышают или сопоставимы с величинами вертикальных.

Таким образом, результаты сопоставления величин суммарных относительных горизонтальных и вертикальных деформаций показывают, что, как правило, вертикальные деформации превышают горизонтальные во

внутриблоковых областях массива горных пород. На границах же вторичных структурных блоков горизонтальные деформации превышают или являются сопоставимыми со значениями вертикальных деформаций (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Результаты сопоставления горизонтальных и вертикальных деформаций

Пара реперов	Горизонтальные деформации	Вертикальные деформации	Превышение горизонтальных деформаций над вертикальными, кол-во раз	Наличие тектонического разлома в интервале
Сочи, техногенный объект А				
A1-2	0.006	0.079	0.08	-
A2-3	0.008	0.100	0.08	-
A3-4	0.005	0.088	0.06	-
A4-1	0.005	0.100	0.05	-
Сочи, техногенный объект Б				
Б1-2	0.070	0.137	0.51	-
Б2-3	0.207	0.250	0.83	Да
Б3-4	0.033	0.186	0.18	-
Б4-5	0.058	0.188	0.31	-
Б5-6	0.017	0.227	0.07	-
Б6-1	0.211	0.210	1.00	Да
Олимпиадинское месторождение				
SHSW1-SHW7.1	0.004	0.055	0.07	-
SHW7.1-SHW5.1	0.042	0.092	0.46	-
SHW5.1-SH2.1	0.020	0.020	1.00	-
SH2.1-SH3.1	0.007	0.045	0.16	-
SH3.1-SHNO1.1	0.037	0.024	1.54	-
SHNO1.1-SHNO2	0.076	0.036	2.11	-
SHNO2-SHO1	0.050	0.050	1.00	-
SHO1-SHSO1.1	0.472	0.071	6.65	Да
SHSO1.1-SHS2.1	0.444	0.040	11.1	Да
SHS2.1-SHS1.1	0.050	0.015	3.33	-
SHS1.1-SHSW3.1	0.140	0.045	3.11	-
SHSW3.1-SHSW.4	0.226	0.129	1.75	Да
SHSW4-SHSW1	0.053	0.067	0.79	-
Благодатнинское месторождение				
NN2.1-NN1.1	0.042	0.056	0.75	Да
NN1.1-NNW1	0.007	0.057	0.12	-
NNW1-N7	0.013	0.053	2.45	-
N7-NW1-1	0.080	0.069	1.16	Да

Выводы

1. Выполнена апробация методики мониторинга деформационных процессов с учетом воздействия современных геодинамических движений на техногенных объектах в различных регионах России – в Сибири и на Кавказе.

2. Произведено сопоставление результатов мониторинга деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений, выполненного в г. Сочи, с результатами мониторинга, проведенного на Олимпиадинском и Благодатнинском месторождениях Красноярского края.

3. По результатам обработки инструментальных измерений установлено, что на границах вторичных структурных блоков величины модулей относительных горизонтальных деформаций более чем в 3 раза превышают величины модулей относительных горизонтальных деформаций, протекающих во внутриблоковых областях массива горных пород.

4. На основании анализа инструментальных измерений выявлено, что на границах вторичных структурных блоков величины модулей относительных вертикальных деформаций зачастую превышают величины модулей относительных вертикальных деформаций, протекающих во внутриблоковых областях массива горных пород. Однако, зависимости величин модулей вертикальных относительных деформаций между собой, локализующихся в зонах вторичного структурирования и внутриблоковых областях, не установлено.

5. По итогам сопоставления величин модулей относительных горизонтальных и вертикальных деформаций установлено, что на границах вторичных структурных блоков модули горизонтальных деформаций превышают или сопоставимы с величинами вертикальных деформаций. Во внутриблоковых областях массива горных пород модули вертикальных деформаций, как правило, превышают горизонтальные.

На основании полученных результатов при мониторинге деформационных процессов под воздействием современных геодинамических движений произведена доработка обоснованной в разделе 3 методики. Добавлен этап анализа результатов измерений, который содержит в себе критерии действия современных

геодинамических движений в массиве горных пород. Данный этап заключается в сопоставлении величин модулей относительных горизонтальных деформаций на объекте между собой, и выявлении величин деформаций, превышающих другие более чем в 3 раза. Также, на стадии анализа результатов мониторинга деформационных процессов необходимо сопоставление локализации повышенных горизонтальных и вертикальных деформаций с расположением тектонических разломных зон в массиве горных пород (рисунок 4.35).

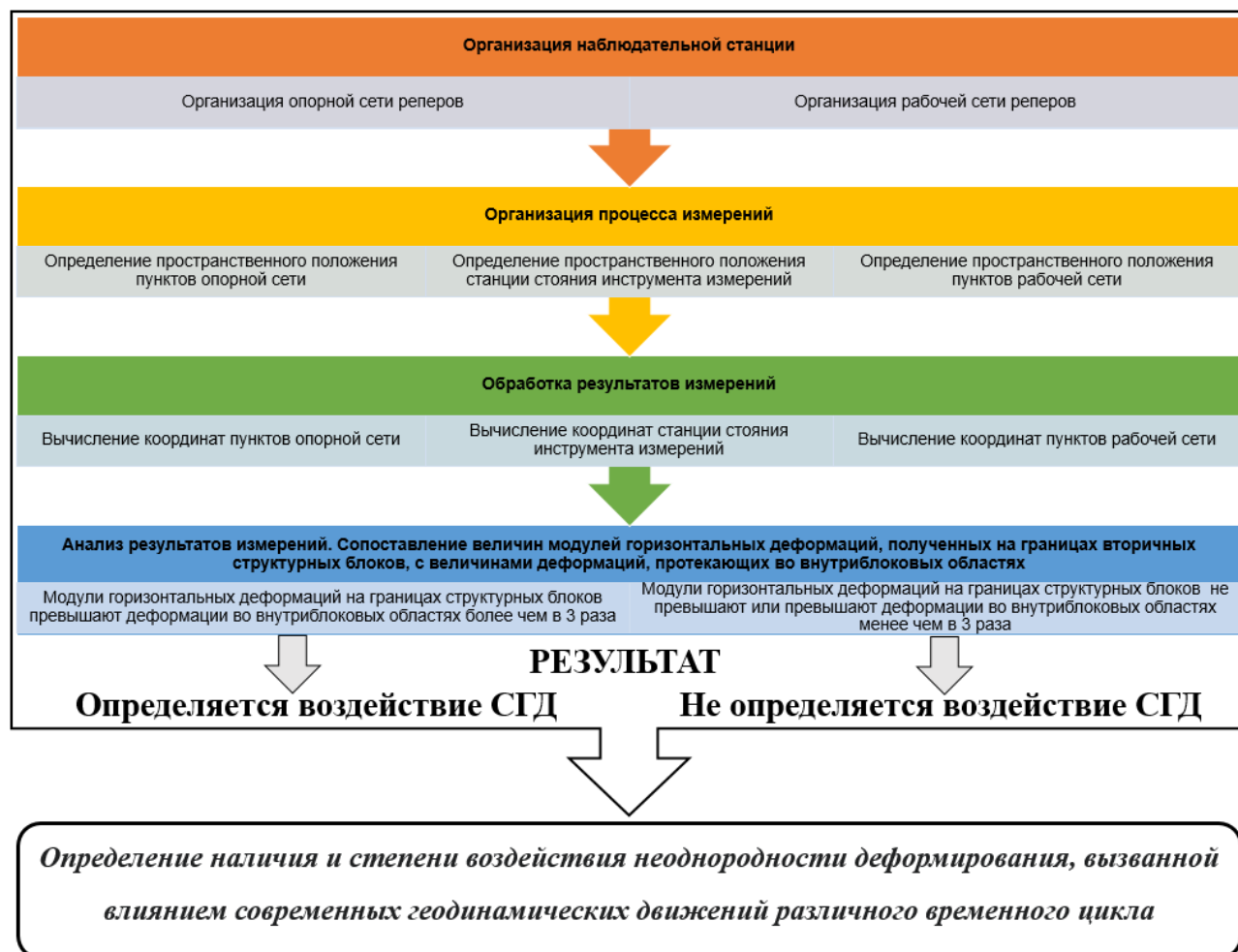


Рисунок 4.35 –Схема методики мониторинга деформационных процессов с учетом воздействия современных геодинамических движений

В данном виде методика мониторинга позволяет выделить степень воздействия современных геодинамических движений в массиве горных пород из совокупности геомеханических факторов, влияющих на формирование деформационных процессов, чем обеспечивается, в случае ее применения, безопасность эксплуатации и устойчивость объектов различного целевого назначения.

Заключение

На основе выполненного комплекса исследований в диссертационной работе решена важнейшая задача, составляющая научный и практический интерес: разработана и обоснована методика мониторинга деформационных процессов, формирующихся с учетом воздействия современных геодинамических движений.

Сформированная методика позволяет оперативно выявлять опасность воздействия современных геодинамических движений на безопасность и целостность объектов недропользования, а также принимать своевременные меры по предотвращению аварийных ситуаций в процессе их дальнейшей эксплуатации.

Основные научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, заключаются в следующем:

1. Установлено, что применение разработанной методики мониторинга деформационных процессов позволяет определить место расположения граничных зон вторичных структур, локализующихся в верхней части литосферы массива горных пород и концентрирующих на своей границе современные геодинамические движения.

2. Предложено и обосновано использование критерия модуля относительных горизонтальных деформаций, способного выделить степень влияния современных геодинамических движений на устойчивость и безопасность эксплуатации объектов недропользования.

3. Определены требования к конструкции наблюдательной станции, необходимой для выделения воздействия современных геодинамических движений на устойчивость и безопасность объектов недропользования. Наблюдательная станция должна учитывать непрерывный характер действия современных геодинамических движений, а также неоднородность и неравномерность деформационного процесса, протекающего под их влиянием.

4. Выявлен характер воздействия современных геодинамических движений на деформационные процессы, формирующиеся в техногенных объектах. Выявлена зависимость, в соответствии с которой величины относительных горизонтальных деформаций, возникающих под воздействием современных геодинамических

движений в граничных зонах вторичного структурирования массива горных пород, более чем в 3 раза превышают величины деформаций, протекающих во внутриблоковых областях вторичных структур.

5. Определен характер взаимодействия относительных горизонтальных и вертикальных деформаций под влиянием современных геодинамических движений. Установлено, что величины относительных горизонтальных деформаций, возникающих под воздействием современных геодинамических движений в граничных зонах вторичного структурирования массива горных пород, сопоставимы с величинами относительных вертикальных деформаций в этих же зонах. А величины относительных вертикальных деформаций, возникающих во внутриблоковых областях вторичных структур массива горных пород, в большей части превышают величины относительных горизонтальных деформаций, протекающих в этих же зонах.

6. Проведена апробация разработанной методики на объектах недропользования. Апробация показала, что:

- предложенная методика мониторинга позволяет достоверно оценить наличие и степень воздействия современных геодинамических движений на целостность объекта недропользования;

- установлены зависимости между величинами относительных горизонтальных деформаций, формирующихся на границах вторичных структурных блоков под воздействием современных геодинамических движений, с величинами деформаций в междублоковых областях, где их действие не столь значительно;

- использование полученных зависимостей позволяет диагностировать действие современных геодинамических движений в массиве горных пород, а также степень их влияния на объекты недропользования.

Применение результатов, полученных в диссертационной работе, а также внедрение их в практику, позволит своевременно выявить опасные деформационные процессы, формирующиеся в областях концентрации

современных геодинамических движений, на различных стадиях проектирования или эксплуатации объектов недропользования.

Список использованных источников

1. Шеметов, Р.С. Особенности мониторинга деформационных процессов объектов недропользования, подверженных воздействию современных геодинамических движений / Р.С. Шеметов // Проблемы недропользования. – 2019. – №1 – с. 57-61.
2. Брызгалов, В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций: Производственное издание / В.И. Брызгалов. – Красноярск: Сибирский ИД «Суриков», 1999. – 560 с.
3. Сашурин, А.Д. Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации / А.Д. Сашурин // Гидротехническое строительство. – 2012. – №1 – с. 37-43.
4. Шеметов, Р.С. Интерпретация результатов проведения мониторинга деформационных процессов сложноконструктивных объектов в предгорье Северного Кавказа / Р.С. Шеметов // Маркшейдерия и недропользование. – 2015. – №1 – с. 54-58.
5. Сашурин, А.Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы / А.Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле: Доклады международной конференции. Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2003. – с. 77-81.
6. Шпаков, П.С. Мониторинг состояния устойчивости откосов уступов и бортов карьеров Жайремского ГОКа / П.С. Шпаков, С.Г. Ожигин, С.Б. Ожигина, О.В. Старостина, М.В. Шпакова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №6 – с. 211-216.
7. Леонтовский, П.М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность / Проф. П.М. Леонтовский. – Екатеринослав, 1913. – 320 с.
8. Пискунов, М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М.Е. Пискунов. – М.: Недра, 1980. – 248 с.
9. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика разломных зон / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2004. – №10 – с. 95-111.

10. Сидоров, В.А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин. – М.: Междувед. геофиз. ком., 1989. – 183 с.
11. Марфенко, С.В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: учеб. пособие: для специальности Прикладная геодезия / С. В. Марфенко; М-во образования Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т геодезии и картографии (МИИГАиК). – М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 2004 (МГУГиК). – 36 с.
12. Левчук, Г.П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ. Учебник для вузов / Г.П. Левчук, В.Е. Новак, В.Г. Конусов. – М.: Недра, 1981. – 438 с.
13. Карлсон, А.А. Измерение деформаций гидротехнических сооружений / А.А. Карлсон. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
14. Шпаков, П.С. Электронные учебники и пособия для специальности «Маркшейдерское дело» направления подготовки «Горное дело» / П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков, М.В. Шпакова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №11 – с. 376-378.
15. Гуляев, Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений / Ю.П. Гуляев; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО "Сибирская гос. геодезическая акад.". – Новосибирск: СГГА, 2008. – 255 с.
16. Зубков, А.В. Методика определения природных напряжений в массиве по деформации карьера с использованием спутниковых навигационных систем / А.В. Зубков, С.В. Сентябов, К.В. Селин // Литосфера. – 2019. – том 19, №5 – с. 767-779.
17. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / М-во цв. мет. СССР. Горное управление: Введ. 3.07.86. – Разраб. ВНИМИ, ВНИПИгорцветмет. – М.: Недра, 1988. – 112 с.

18. Щерба, О.С. Методы тригонометрического нивелирования при маркшейдерских наблюдениях на профильных линиях / О.С. Щерба // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – №16. – с. 53-55.
19. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 59 с.
20. Кузьмин, Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов / Ю.О. Кузьмин // Геологическое изучение и использование недр: Научн.-техн. сб. – 1996. – № 4. – с. 43-53.
21. Руководство по проектированию бортов карьера, под редакцией: Джон Рид, Питер Стейси. – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544 с.
22. Петушков, А.В. Спутниковые системы и технологии позиционирования [Текст]: учебное пособие: для студентов, обучающихся по направлениям 120100.62 "Геодезия и дистанционное зондирование" и 120700.62 "Землеустройство и кадастры" и слушателей курсов повышения квалификации / А.В. Петушков, Е.П. Тарелкин; Негос. частное образовательное учреждение высш. проф. образования "Нац. открытый ин-т г. Санкт-Петербург". – Санкт-Петербург: НОИР, 2015. – 86 с.
23. Панжин, А.А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS / А.А. Панжин // Геомеханика в горном деле – 2000: Материалы Международной конференции. – Екатеринбург, ИГД УрО РАН. – 2000. – с. 320-324.
24. Панжин, А.А. Геомеханическое обоснование метода площадных инструментальных исследований сдвижений горных пород при разработке месторождений: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.20 / Панжин Андрей Алексеевич; [Место защиты: Ин-т горного дела УрО РАН]. – Екатеринбург, 2007. – 175 с.
25. Сашурин, А.Д. Современная геодинамика и безопасность объектов в подземном пространстве / А.Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №3 – с. 113-116.

26. Коста Э Силва, Система мониторинга и управления горными работами при подземной добыче мрамора / Коста Э Силва, М. Матильде, П. Фалькэо Невес // ФТПРПИ. – 2008. – №1 – с. 101-110.
27. Вальков, В.А. Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 25.00.32 / Вальков Вячеслав Александрович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т "Горный"]. – Санкт-Петербург, 2015. – 20 с.
28. Усанов, С.В. Технология мониторинга нелинейных деформаций зданий и сооружений / С.В. Усанов, В.И. Ручкин, О.Д. Желтышева // ФТПРПИ. – 2014. – №4. – с. 53-60.
29. Доброскок, А.А. О совместном геомеханическом и геофизическом мониторинге на шахтах и рудниках / А. А. Доброскок, А. М. Линьков, В. В. Зубков // ФТПРПИ. – 2010. – №1. – с. 16-24.
30. Усанов, С.В. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения / С. В. Усанов, В. В. Мельник, А. Л. Замятин // ФТПРПИ. – 2013. – №6. – с. 83-89.
31. Колесников, Ю.И. О диагностике состояния конструктивных элементов сооружений по шумовому полю (по данным физического моделирования) / Ю. И. Колесников, К. В. Федин, А. А. Каргаполов, А. Ф. Еманов // ФТПРПИ. – 2012. – №1. – с. 3-11.
32. Опарин, В.Н. Методы и системы сейсμοдеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1 / В.Н. Опарин, С.Н. Багаев, Ю.В. Чугуй, В.П. Потапов, В.А. Орлов, В.И. Юшин, Н.И. Геза и др.; Под ред. Н. Н. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 303 с.
33. Опарин, В.Н. Устройства непрерывного контроля параметров деформационно-волновых процессов в массиве горных пород. Ч. III: Зонд для определения поперечных деформаций скважины и его конструктивное устройство / В.Н. Опарин, В.Н. Федоринин, В.М. Жигалкин, В.Ф. Юшкин, В.И. Сидоров и др. // ФТПРПИ. – 2005. – № 5. – с. 106-113.

34. Опарин, В.Н. Устройства непрерывного контроля параметров деформационно-волновых процессов в массиве горных пород. Ч. 1: Принцип измерения продольных перемещений горных пород в скважине и конструкция позиционно-чувствительного датчика / В.Н. Опарин, Ю.В. Чугуй, В.М. Жигалкин, В.Ф. Юшкин, С.В. Плотников и др. // ФТПРПИ. – 2005. – № 3. – с. 106-115.
35. Курленя, М.В. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, А.А. Акинин, В.Ф. Юшкин, Г.Г. Сиденко // ФТПРПИ. – 1997. – № 3. – с. 105-119.
36. Опарин, В.Н. Экспериментальные испытания многоканального оптоэлектронного продольного деформометра / В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, А.А. Акинин, В.В. Аршавский, А.П. Тапсиев // ФТПРПИ. – 2000. – № 6. – с. 107-123.
37. Опарин, В.Н. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород: монография / В.Н. Опарин и др.; отв. ред. В.Л. Шкуратник. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 319 с.
38. Волохов, Е.М. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений / Е.М. Волохов, С.Ю. Новоженин, Н.С. Бак // Записки Горного института. – 2012. – т. 199. – с. 253–259.
39. Несмеянов, С.А. Тектонические разрывы на участках сейсмического микрорайонирования 1982, / С.А. Несмеянов, А.С. Алешин, В.В. Севостьянов и др.; отв. редактор М.В. Рац. – М.: Наука, 1982. – 135 с.
40. СП 126.13330.2012 Геодезические работы в строительстве. Актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84. – М.: Минрегион России, 2012.
41. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М.: Стандартинформ, 2017.
42. СП 11-104-97 Инженерно – геодезические изыскания для строительства. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997.
43. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: Минрегион России, 2011.

44. ГОСТ 24846-2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2019.
45. МДС 13-22.2009 Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. – М.: ООО «Тектоплан», 2010.
46. МРДС 02-08 Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. – М.: ОАО «КТБ ЖБ», 2008.
47. СТО 70238424.27.140.035-2009 Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования. – М.: НП «ИНВЭЛ», 2009.
48. Карлсон, А.А. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами / А.А. Карлсон. – Москва: Издательство «Энергия», 1980. – 201 с.
49. Ямбаев, Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспектива / Х.К. Ямбаев, В.Р. Ященко // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2012. – Том 3. – с. 139-155.
50. Приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 N 61603). – Москва, 2020. – 86 с.
51. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград: ВНИМИ, 1987.
52. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Ленинград: ВНИМИ, 1971.
53. Осипова, А.Ю. Исследование геодинамической активности геологической среды г. Екатеринбурга: автореферат диссертации ... кандидата

технических наук: 25.00.08 / Осипова Анастасия Юрьевна; [Место защиты: Уральский государственный горный университет]. – Екатеринбург, 2010. – 21 с.

54. Шпаков, П.С. Инженерно-геологический и геоэкологический мониторинг состояния сложных объектов горнодобывающего комплекса / П.С. Шпаков, А.Г. Урузбиева, А.И. Маневич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №8 – с. 406-413.

55. Литосферные плиты – режим доступа: <https://geographyofrussia.com/litosfernye-plity/>, дата обращения 03.09.2019г.

56. Садовский, М.А. О свойствах дискретности горных пород / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – №12. – с.3-18.

57. Садовский, М.А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко. – М.: Наука, 1987. – 101 с.

58. Садовский, М.А. От сейсмологии к геомеханике: О модели геофизической среды / М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко, В.Н. Родионов // Вестн. АН СССР. – 1983. – №1. – с.82-88.

59. Шемякин Е.И. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е.И. Шемякин, Г.Л. Фисенко, М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.В. Рева, Ф.П. Глушихин, М.А. Розенбаум, Э.А. Тропп, Ю.С. Кузнецов // Доклад АН СССР. – 1986. – №5. – с. 1088-1094.

60. Шемякин, Е.И. Открытие №400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных горных выработок / Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.Н. Рева, Ф.П. Глушихин, М.А. Розенбаум. // Оpubл. В БИ. – 1992. – №1.

61. Опарин, В.Н. Масштабный фактор явления зональной дезинтеграции горных пород и стратификация недр Луны по сейсмическим данным / В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1997. – №6. – с. 3-17.

62. Курленя, М.В. О масштабном факторе явления зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1996. – №2. – с. 3-14.
63. Кайдо, И.И. Кластерная модель явления зональной дезинтеграции массива вокруг подземных выработок / И.И. Кайдо // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – №16. – с. 188-197.
64. Макаров, П.В. Подход физической мезомеханики к моделированию процессов деформации и разрушения / П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т.1. №1. – с. 61-81.
65. Макаров, П.В. Моделирование процессов деформации и разрушения на мезоуровне / П.В. Макаров // Изв. АН. Механика твердого тела. – 1999. – №5. – с. 109-130.
66. Макаров, П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования / П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8. №6. – с. 39-56.
67. Рац, М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М.В. Рац, С.Н. Чернышев. – Москва: Недра, 1970. – 164 с.
68. Сашурин, А.Д. Становление и развитие Уральской школы геомехаников / А.Д. Сашурин // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сборник научных трудов. Геомеханика в горном деле – 2005. – Вып.3 (93). – с. 3-12.
69. Чернышев, С.Н. Трещины горных пород / С.Н. Чернышев. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
70. Чернышев, С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов / С.Н. Чернышев. – М.: Недра, 1984. – 109 с.
71. Шаумян, Л.В. Природа физико-механических свойств массивов горных пород / Л.В. Шаумян. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 192 с.
72. Лебедич, С.П. Геодинамическая активность и безопасная эксплуатация магистральных нефтегазопроводов / С.П. Лебедич, В.Л. Дворников, Е.И. Селюков, О.А. Черепанов, Ю.С. Рябоштан // Горный вестник. – 1998. – №4. – с. 35-41.

73. Рябоштан, Ю.С. Влияние ротационного поля напряжений на устойчивость территорий и инженерных сооружений / Ю.С. Рябоштан, Е.И. Селюков // Труды научно-технической конференции «Сейсмостойкость крупных транспортных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях», 1-4 декабря 1998г. – М.: АО ЦНИИС. – 1999.
74. Рябоштан, Ю.С. Современная нестабильность литосферы и безопасность трубопроводных коммуникаций и инфраструктур / Ю.С. Рябоштан, Е.И. Селюков и др. // Научно-технический журнал «Нефтегазовое дело» – 2003. – Том 1. №1.
75. Сидоров, В.А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин. – Москва: Наука, 1989. – 183 с.
76. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика разломных зон / Ю.О. Кузьмин // ФИЗИКА ЗЕМЛИ. – 2004. – №10 – с. 95-111.
77. Мельник, В.В. Основы создания базы экспериментальных данных о параметрах современных геодинамических движений / В.В. Мельник, А.С. Ведерников // Проблемы недропользования. – 2016. – №1 – с. 35-40.
78. Rosanne Nikolaidis, Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System / Rosanne Nikolaidis – Dissertation for the degree Doctor of Philosophy in Earth Sciences – University of California, San Diego. – 2002. – p. 265.
79. Мельник, В.В. Обоснование геомеханических факторов для диагностики опасности карстопроявлений при недропользовании: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.20 / Мельник Виталий Вячеславович; [Место защиты: Ин-т горн. дела УрО РАН]. – Екатеринбург, 2010. – 189 с.
80. Харисов, Т.Ф. Обоснование несущей способности крепи вертикальных стволов при совмещенной схеме проходки: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.20 / Харисов Тимур Фаритович; [Место защиты: Ин-т горн. дела УрО РАН]. – Екатеринбург, 2017. – 120 с.
81. Корнилков, С.В. Уральская научная школа геомехаников: фундаментальные и прикладные исследования / С.В. Корнилков, А.А. Панжин, А.Е. Балек, А.В. Зубков, В.В. Мельник, Ю.Г. Феклистов, Ю.П. Коновалова, А.Л.

Пустуев, Р.В. Криницын, А.Л. Замятин, С.В. Усанов // Проблемы недропользования. – 2018. – №3 – с. 10-20.

82. Сашурин, А.Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород / А.Д. Сашурин // Проблемы недропользования. – 2015. – №1 – с. 38-44.

83. Сашурин, А.Д. Современные геодинамические движения и их роль в формировании напряженно-деформированного состояния массива горных пород / А.Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4-5 июня 2014 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – с. 3-12.

84. Опарин, В.Н. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия: монография / В.Н. Опарин и др.; отв. редактор Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012. – 625 с.

85. Каспарьян Э.В. Напряженно-деформированное состояние массива пород Хибинских месторождений и задачи геомеханического районирования / Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №5. – с. 97-107.

86. Рыбин В.В. Совершенствование геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных, тектонически напряженных породах / В.В. Рыбин // Горный журнал. – 2019. – №5. – с. 25-29.

87. Мельник, В.В. Исследование процессов вторичного структурирования массива горных пород и их роли в формировании аварийных ситуаций природно-техногенного характера / В.В. Мельник, А.Л. Пустуев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – с. 105-108.

88. Мельник, В.В. Исследование причин деформирования инженерных сооружений / В.В. Мельник // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №2. – 161-167 с.

89. Панжин, А.А. Экспериментальные исследования динамики смещений в разломных зонах / А.А. Панжин // электронный ресурс, режим доступа: <https://www.kazedu.kz/referat/9018>. Дата обращения: 19.04.2020г.

90. Панжин, А.А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях / А.А. Панжин, Н.А. Панжина // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2007. – №3. – с. 171-183.
91. Селюков, Е.И. Структурно-геодинамическое картирование в комплексе инженерно-геологических изысканий / Е.И. Селюков, Л.Т. Стигнеева // Промышленное и гражданское строительство – 2006. – №9 – с. 38-39.
92. San Andreas Fault / электронный ресурс, режим доступа: <https://cdn.exploreplanet3.com/web/student-resources/EIS/casestudy/plate-boundaries-4.html>. Дата обращения 13.09.2019.
93. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана. – Свердловск: Министерство металлургии СССР, ИГД, 1990.
94. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород. – Ленинград: ВНИМИ, 1986.
95. Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. – М.: Госгортехнадзор России, 1997.
96. Шеметов, Р.С. Обоснование выбора места расположения наблюдательной станции для проведения геомониторинга деформаций сооружений / Р.С. Шеметов, Ю.А. Филиппов // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2017. – №10. – с. 205-211.
97. Практическое руководство по созданию, контролю и реконструкции маркшейдерско-геодезических плановых сетей на шахтной поверхности и наблюдению за сдвижением поверхности с использованием спутниковой аппаратуры. – Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1998. Согласовано: Госгортехнадзор России от 09.12.1998г. №04-35/826.

98. Барулин, А.И. Методика наблюдений за деформациями откосов с использованием электронных тахеометров / А.И. Барулин // Маркшейдерский вестник – 2011. – №3. – с. 22-26.
99. Высшая геодезия. Высоточное нивелирование: учебное пособие. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2011.
100. Азаров, Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений / Б.Ф. Азаров // Ползуновский вестник – 2011. – №1. – с. 19-29.
101. Попов, В.Н. Геодезия: Учебник для вузов. / В.Н. Попов, С.И. Чекалин. – М.: «Горная книга», 2007.
102. Шеховцов, Г.А. Об оценке точности обратной линейно-угловой засечки при передаче координат на монтажные горизонты при строительстве зданий повышенной этажности / Г.А. Шеховцов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» – 2019. – Т. 63. № 3. – с. 275–281.
103. СП 14.13330.2010 Строительство в сейсмических районах. – М.: Минрегион России, 2010.
104. Методические рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям железных дорог в районах распространения мощной коры выветривания сланцев. – Москва: ЦНИИС Минтрансстроя, 1975.
105. «Пластбау3»: комфорт, удобство и доступность / По материалам редакции // Стройпрофиль – 2008. – №6. – с. 64-65.
106. Технология ПЛАСТБАУ-3 / электронный ресурс, режим доступа: <http://proektabc.ru/94-tekhnologiya-stroitelstva/nesemnaya-opalubka/282-plastbau3.html>. Дата обращения: 15.04.2021.
107. СНиП 3.01.03-84 Геодезические работы в строительстве. – М.: ЦНИИОМТП Госстроя СССР, 1985.