

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук  
(ИГД УрО РАН)

*На правах рукописи*

**Коновалова Юлия Павловна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ  
ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ПО ФАКТОРУ СОВРЕМЕННЫХ  
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ**

Специальность 2.8.6 – 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 – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА.....	12
1.1 Влияние современных геодинамических движений на объекты недропользования.....	12
1.2 Современные геодинамические движения земной коры: виды, особенности проявления .....	18
1.3 Практический опыт оценки и выбора безопасных площадок размещения ...	28
1.4 Нормативные основы учета геодинамических факторов .....	33
1.5 Выводы.....	39
2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКИ БЛОЧНОМ МАССИВЕ .....	42
2.1 Представления о массиве горных пород как открытой динамической системе .....	42
2.1.1 Иерархическая блочность и самоподобие массива горных пород .....	42
2.1.2 Процессы самоорганизации в массиве горных пород .....	51
2.2 Критерии выбора самоорганизовавшихся геологических структур как участков безопасного размещения объектов .....	57
2.3 Выводы.....	62
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ. 64	
3.1 Основные параметры современных геодинамических движений .....	64
3.2 Пространственно-временные масштабы и задачи исследования .....	65
3.3 Методы определения параметров современных геодинамических движений.....	68
3.3.1 Пространственно-временная чувствительность средств измерения к выявлению геодинамических движений .....	68
3.3.2 Определение параметров трендовой составляющей геодинамических движений.....	70
3.3.3 Определение параметров вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.....	72

3.3.4 Метод оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.....	82
3.4 Характеристика экспериментальной базы исследований.....	89
3.5 Распределение горизонтальных деформаций земной поверхности на различных пространственно-временных базах.....	95
3.6 Исследование взаимосвязи деформационных параметров трендовой и вариационной составляющих .....	104
3.7 Выводы.....	115
<b>4 МЕТОДИКА ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК ПОД РАЗМЕЩЕНИЕ ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ПО ГЕОДИНАМИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ.....</b>	<b>117</b>
4.1 Необходимые требования к учету геодинамического фактора при выборе площадок.....	117
4.2 Этапы реализации методики и содержание работ.....	120
4.3 Некоторые особенности реализации и условия применения методики.....	125
4.4 Опыт применения методики при выборе площадки под размещение Южно-Уральской АЭС.....	130
4.5 Выводы .....	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>140</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>142</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Аварии на объектах недропользования, для которых массив горных пород и земная поверхность являются либо основанием, либо их конструктивной средой, с давних времен обращают на себя внимание. На сегодняшний день интенсивная урбанизация территорий, освоение подземного пространства, появление высотных, уникальных зданий и сооружений ведут к более тесному взаимодействию техногенных объектов с природной средой и росту риска аварийных ситуаций. Первостепенная роль в этих вопросах отводится объектам повышенного уровня ответственности, среди которых объекты использования атомной энергии, гидротехнические сооружения первого и второго классов, ЛЭП высокого напряжения, объекты горного производства и т.п.

Безопасное функционирование любого объекта недропользования зависит не только от его конструктивных особенностей, но и от достоверной и обоснованной оценки процессов и явлений, происходящих в массиве горных пород. Одним из факторов, определяющих его напряженно-деформированное состояние, являются современные геодинамические движения земной коры, обусловленные совокупностью природных эндогенных и экзогенных воздействий, происходящие в настоящее время и прогнозируемые на весь период срока службы объекта. Эти движения принято относить к «медленной» части спектра геодинамических явлений.

Роль воздействия современных геодинамических движений на объекты недропользования теоретически и практически обоснована в исследованиях Ю.О. Кузьмина, Ю.Е. Федосеева, В.И. Кафтана, А.Д. Сашурина, В.Н. Татарина, В.Н. Морозова, Б.Т. Мазурова, В.К. Панкрушина, И.Л. Учителя, С.П. Войтенко, Б.Б. Капочкина, В.Н. Ярошенко, Е.И. Селюкова, С.Н. Тагильцева, А.Н. Гуляева, А.Ю. Осиповой и др. В литературе приводятся примеры возникновения аварийных состояний, вплоть до разрушения, конструкций зданий и сооружений – от жилых домов до особо ответственных объектов.

Для предупреждения негативного влияния движений на безопасность объектов недропользования большую значимость приобретает необходимость на стадии инженерных изысканий выбирать места их благоприятного размещения с учетом геодинамических факторов.

**Степень разработанности.** До появления систем спутниковой геодезии изучение современных движений земной коры в основном ограничивалось определением вертикальных движений, которые рассматривались, главным образом, во взаимосвязи с землетрясениями, на основе чего и были разработаны методики и нормативные документы по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству. Геодинамическая оценка площадок под строительство особо ответственных объектов производилась, как правило, по фондовым геодезическим материалам в комплексе с данными по неотектонике и сейсмичности. С широким внедрением в практику спутниковых методов измерений изменились представления о геодинамических движениях, их роли и влиянии на объекты недропользования. В связи с этим в обновленных нормативных документах, регламентирующих вопросы учета геодинамических факторов при выборе мест размещения ответственных объектов, стали дифференцироваться новейшие (четвертичные) и современные движения, по значениям параметров которых определяется степень опасности площадок. Параметры современных движений приведены в соответствие с текущими научными представлениями. Существенная роль стала отводиться учету параметров горизонтальных движений. Однако сложность природы этих процессов оставляет открытыми еще много вопросов. При определении параметров геодинамических движений не учитывается в полной мере их зависимость от пространственно-временных масштабов измерений, обусловленная иерархически блочным строением массива горных пород и процессами его самоорганизации, а также фактор их цикличности. Отсутствуют методики, пригодные для массового использования.

Таким образом, исследования, направленные на получение новых знаний о закономерностях пространственно-временного распределения геодинамических

движений по массиву горных пород, и совершенствование методик оценки и выбора мест безопасного размещения объектов недропользования актуальны для науки и практики инженерных изысканий.

**Научно-практическая задача работы** – выбор безопасных мест размещения особо ответственных объектов недропользования по фактору воздействия современных геодинамических движений.

**Идея работы** состоит в том, что выбор безопасных мест размещения объектов недропользования основывается на использовании явления самоорганизации иерархически блочной среды под воздействием современных геодинамических движений.

**Объект исследований** – иерархически блочный массив горных пород.

**Предмет исследований** – изменение напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород под воздействием современных геодинамических движений.

**Целью работы** является выявление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием современных геодинамических движений для обеспечения безопасного размещения ответственных объектов недропользования.

**Задачи исследования:**

1. Обосновать подход и критерии выбора площадок размещения объектов недропользования на базе модельных представлений о блочно-иерархической деформируемой среде массива горных пород как открытой динамической системе с происходящими в ней процессами самоорганизации под действием современных геодинамических движений.

2. Исследовать на базе экспериментальных геодезических данных, полученных на геодинамических полигонах и постоянно действующих спутниковых станциях с различной частотой опроса, закономерности распределения деформационных параметров трендовой (направленной) и вариационной (знакопеременной) составляющих геодинамических движений на пространственных базах до 100 километров.

3. Разработать метод оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной составляющей геодинамических движений.

4. Исследовать взаимосвязи между деформационными параметрами трендовой и вариационной короткопериодной составляющими геодинамических движений.

5. Усовершенствовать методику выбора безопасных участков размещения ответственных объектов недропользования по фактору современных геодинамических движений с учетом выявленных пространственно-временных закономерностей их распределения.

#### **Защищаемые научные положения:**

1. По фактору современной геодинамической активности безопасным местом размещения ответственного объекта недропользования в иерархически блочной среде массива горных пород является самоорганизовавшийся консолидированный структурный блок, определение границ которого основывается на совместном анализе деформационных параметров двух составляющих современных движений земной коры – трендовой и вариационной короткопериодной – на различных пространственных базах от 0,1 до 100 километров.

2. В качестве критерия оценки современных горизонтальных движений земной коры при размещении ответственных объектов недропользования необходимо использовать максимальные значения модуля скорости горизонтальных деформаций, обусловленных пространственно-временным масштабом геодезических измерений, которые являются степенной функцией длины реперного интервала для трендовой составляющей и произведением степенных функций длины реперного интервала и частоты опроса для вариационной составляющей геодинамических движений.

3. Экспресс-оценка направлений главных осей тензора трендовых деформаций осуществляется на основании взаимосвязи с коэффициентом

корреляции более 0,85 их ориентации с вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанной по данным геодезических измерений.

#### **Научная новизна работы:**

1. Обоснован подход к выбору безопасного участка размещения объектов по фактору современных геодинамических движений с точки зрения модельных представлений о геологической среде как открытой динамической системе с присущими ей процессами деструкции и самоорганизации.

2. Предложены критерии выделения самоорганизовавшихся блоковых структур геодезическими методами как геодинамически безопасных мест размещения объектов недропользования.

3. Установлены пространственные и временные зависимости распределения модуля скорости горизонтальных деформации земной поверхности для трендовой и короткопериодной вариационной составляющих геодинамических движений на базах до 100 км.

4. Установлена взаимосвязь деформационных параметров трендовой и короткопериодной вариационной составляющих геодинамических движений.

#### **Практическое значение работы:**

1. Разработан метод оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород, учитывающий вариационную короткопериодную составляющую геодинамических движений, который может использоваться в качестве экспресс-оценки его состояния при геодинамической диагностике территорий.

2. Усовершенствована методика выбора безопасных участков размещения ответственных объектов недропользования по фактору современных геодинамических движений, учитывающая их пространственно-временные закономерности распределения в нелинейной иерархически блочной среде массива горных пород, сочетающая инженерно-геофизические и инженерно-геодезические методы наблюдения.

**Методы исследований:** долгосрочный и краткосрочный геодезический мониторинг по определению трендовых и вариационных короткопериодных

современных геодинимических движений традиционными геодезическими методами и технологиями спутниковой геодезии; математическая обработка результатов полевых измерений, а также данных постоянно действующих ГНСС-станций; статистическая обработка результатов; аналитические методы исследований.

**Достоверность научных положений** подтверждается большим объемом полевых геодезических данных, полученных на геодинимических полигонах и постоянно действующих ГНСС-станциях за период более 20 лет, использованием апробированных методов их математической обработки, методов классической теории упругости и механики сплошной среды, положительным опытом использования для геодинимической диагностики территорий, в том числе для выбора мест размещения ответственных объектов (Белоярская и Южно-Уральская АЭС).

**Личный вклад автора** состоит в многолетнем проведении натурных геодезических наблюдений, в математической обработке геодезических измерений, установлении пространственно-временных закономерностей распределения параметров современных геодинимических движений, разработке метода оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием короткопериодных движений.

**Реализация работы** осуществлена при геодинимической диагностике площадки размещения 4-ого энергоблока Белоярской АЭС, при выборе площадки под строительство Южно-Уральской АЭС, при оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород на многочисленных месторождениях Урала и Казахстана.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, 2015, 2017, 2019, 2021 гг.), VII Российско-Китайском научно-техническом форуме «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах – 2018», (г. Екатеринбург – г. Пермь, 2018 г.), Национальной научно-технической конференции «Рудная геология, геофизика, инженерная геология и

гидрогеология», (УГГУ, г. Екатеринбург, 2021 г.), Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (УГГУ, г. Екатеринбург, 2021 г., 2023 г.), VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН «Геодинамика и минерагения Северной Евразии» (г. Улан-Удэ, 2023 г.), XII научно-практической конференции с международным участием «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» (г. Магнитогорск, 2023 г.), IX Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2023 г.).

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» по следующим направлениям:

– напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений (п. 1);

– изучение геодинамической активности регионов и ее влияния на напряженно-деформированное состояние горного массива, региональную сейсмичность, состояние сооружений, транспортных коммуникаций, инженерных сетей, в том числе в связи со строительством, эксплуатацией, реконструкцией, консервацией и ликвидацией горнодобывающих предприятий и подземных сооружений (п. 8);

– геомеханические и экологические факторы при выборе способов и средств разрушения горных пород в массиве, мест размещения опасных объектов, в том числе ядерно-топливного комплекса (п. 12).

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 11-ти печатных работах, в том числе в 6-ти статьях в научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержит 171 страницу машинописного текста, в том числе, 48 рисунков, 9 таблиц. Список использованных источников включает в себя 251 наименование.

# 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА

## 1.1 Влияние современных геодинамических движений на объекты недропользования

Безопасное функционирование любого объекта зависит не только от его конструктивных особенностей, но и от воздействия на него факторов природного, техногенного или природно-техногенного характера. Некоторые виды чрезвычайных ситуаций и катастрофических событий не вызывают сомнения в источнике их возникновения. Обычно это касается опасных природных явлений: землетрясение, вулканизм, ураган, цунами, карст. Однако, в первую очередь, при рассмотрении причин возникновения аварий выявляют техногенные факторы, связанные с нарушением или сбоем технологических процессов. При этом принимают во внимание изношенность объектов, низкое качество материалов, ошибки проектирования и нарушения регламента эксплуатации объекта. Подобные нарушения очень часто имеют место, что позволяет большую часть аварийных ситуаций на объектах относить к категории техногенных. Но чаще всего остаются без внимания причины природного характера, которые являются недостаточно изученными и не явно оказывающими воздействие на объекты недропользования. Среди таких причин значимая роль принадлежит современным движениям земной коры [1], которые формируются комплексом эндогенных, экзогенных факторов. По масштабам проявления эти воздействия подразделяются на глобальные, региональные и локальные. Каждому виду воздействий свойственны свои особенности: степень локализации, характер и интенсивность проявления.

Современные геодинамические движения, происходящие в приповерхностной части литосферы и на земной поверхности в настоящее время и прогнозируемые на весь период срока службы объекта недропользования, формируют напряженно-деформированное состояние массива горных пород, как

среды, являющейся основанием для различных сооружений. Накопленный опыт экспериментальных исследований свидетельствуют об их повсеместной распространенности. Современные геодинамические движения принято относить к «медленной» части спектра геодинамических явлений, а «быстрой» его составляющей является сейсмичность [2].

Долгое время современные движения земной коры и земной поверхности рассматривались, главным образом, во взаимосвязи с землетрясениями, на основе чего были разработаны методики и нормативные документы по сейсмическому районированию и сейсмостойкому строительству. Критерии и требования к безопасности по размещению ответственных объектов по фактору медленных геодинамических движений до недавнего времени не соответствовали уровню современных представлений о них и механизме их воздействия на объекты недропользования [3].

На основании анализа данных наблюдений на геодинамических полигонах различного назначения за почти полувековой период Ю.О. Кузьминым [2, 4-6] был обнаружен новый класс тектонических движений, получивших название современных суперинтенсивных деформаций земной поверхности, приуроченных к зонам разломов различного ранга платформенных, слабосейсмичных регионов. Среднегодовые скорости относительных деформаций, вызываемых этими движениями, имеют достаточно высокие показатели –  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  в год. Доказано, что деформационные процессы такого порядка могут накапливать в среде напряжения порядка  $1 \div 5$  МПа в течение первых десятков лет. Эти напряжения сопоставимы с порогом прочности известных конструкционных материалов и поэтому можно ожидать их значительного, необратимого изменения в областях максимального проявления суперинтенсивных деформаций. В работах автора приводятся многочисленные случаи возникновения аварий, вызванных суперинтенсивными деформациями [4-6].

Вопросы проявления современной геодинамики на территории города Екатеринбурга рассмотрены в работах А.Н. Гуляева, А.Ю. Осиповой, С.В. Тагильцева [7-11]. Анализируя характер деформаций и повреждений зданий,

сооружений, линейных объектов (дорог, теплотрасс, водокommunikаций), они пришли к выводу, что существенную роль в причинах этих явлений играет геодинамический фактор. По данным МП «Водопровод» на территории Екатеринбурга ежегодно происходит около 1000 аварий на линиях городского водопровода. При картировании мест возникновения таких аварий было выявлено, что большинство аварийных участков находится в пределах линейных зон тектонических нарушений. Практика исследований показывает, что активность очень часто свойственна локальным тектоническим нарушениям небольшой протяженности – от нескольких километров до первых сотен метров. Такие разломы встречаются повсеместно, в том числе и в платформенных областях [7, 8, 11]. По оценкам Гуляева А.Н. [9, 10] характер повреждений инженерных объектов подобен характеру повреждений, возникающих в результате 6-7 бальных по шкале MSK-64 землетрясений, хотя на территории города сейсмических событий такой силы не отмечалось за всю его историю.

Взаимосвязь между разрывами трубопроводов и местами пересечения ими тектонических нарушений также отражена в статье Сашурина А.Д. [1], в которой автор приводит статистические данные, характеризующие аварийность на трубопроводах Федоровского месторождения за 1984-1993 гг. Как отмечается в статье, из 282 аварийных случаев, не связанных с технологическими причинами, 135 (47,5 %) порывов находилось на пересечении с тектоническими нарушениями. При увеличении повторяемости аварий процент таких разрывов возрастал и при пятикратной повторяемости достигал 81,3 %.

Еще одним примером взаимосвязи современной геодинамики и техногенных аварий могут служить аварийные ситуации на подземном канализационном коллекторе г. Сургута, где в ходе экспериментальных исследований в разломных зонах и на примыкающих к ним территориях были выявлены современные геодинамические движения циклического характера с широким спектром частот и амплитуд [12,13].

Авторы работ [14-15] Селюков Е.И., Рябоштан Ю.С. по многочисленным многолетним результатам комплексных геофизических и геодезических

исследований геологической среды на площадях от метров до нескольких километров выделяют геодинамические зоны – линейно вытянутые участки горного массива, где в наибольшей степени происходят изменения значений современных полей напряжений. Отмечается необходимость изучения строения массива горных пород на таких пространственных масштабах, изменения его состояния во времени и учета всех этих факторов при строительстве и эксплуатации различных объектов.

Вопросы рисков разрушений опасных объектов из-за быстропротекающих геодеформаций асейсмического характера, как их определяют авторы, обсуждаются на протяжении почти двадцати лет в работах И.Л. Учителя, С.П. Войтенко, Б.Б. Капочкина, В.Н. Ярошенко [16-20]. Помимо выявления эпизодических данных об асейсмичных реверсивных амплитудных движениях по данным постоянно действующих ГНСС–станций авторы выделили и классифицировали геодеформации асейсмического характера внутрисуточного масштаба, используя данные мониторинга широкополосных сейсмических станций [18]. По их мнению, выявленные аперiodические геодинамические процессы волнового характера с частотой менее 0,1 Гц нельзя классифицировать как объемные сейсмические волны землетрясений. Однако энергия таких колебаний, как отмечают авторы, соответствует энергии землетрясений с магнитудой 6 и более [18]. Этот вывод созвучен заключениям А.Н. Гуляева о характере повреждений на трубопроводах, которые обсуждались выше.

В публикациях украинских исследователей рассмотрены закономерности проявления кратковременной изменчивости геодеформаций в аварийности сетей газопроводов г. Одессы. Около 80% аварий на них они связывают с геодеформациями [16, 17]. Геодинамическими процессами они обуславливают разрыв в декабре 2011 года нескольких циркуляционных водоводов Запорожской ТЭС диаметром 1800 мм, обеспечивающих охлаждение реакторов Запорожской АЭС [19,20].

Недостаточная изученность ряда физических, физико-механических, физико-химических процессов становилась причиной и достаточно масштабных

аварий на объектах техносферы [21]. Эти факторы сыграли свою значимую роль в возникновении аварии на 4 энергоблоке Чернобыльской АЭС, в обрушении крыши Трансвааль парка в г. Москве, в аварии на подстанции Чагино, аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Ошибочные решения были допущены в плане учета геодинамических факторов на стадии проектирования при выборе места размещения объектов Чернобыльской АЭС и Саяно-Шушенской ГЭС [22]. Обе станции были воздвигнуты на достаточно сложных в тектоническом отношении территориях.

Чернобыльская АЭС расположилась на границе Днепровско-Донецкого прогиба среди серии глубинных разломов северо-восточного - юго-восточного простирания [22] (рисунок 1.1). Как отмечается в работе [23] со ссылкой на [24], в более поздних исследованиях НАН Украины были сформулированы основные требования по недопущению причин аварий на объектах, подобных Чернобыльской АЭС, среди которых, в первую очередь, обращалось внимание на актуальность выявления геодинамических зон на площадках размещения.

Саяно-Шушенская ГЭС также была неудачно размещена с позиций тектонического строения массива горных пород [22] (рисунок 1.2). На этапе проектирования станции ученые обращали внимание на геодинамическую активность участка и на ее возможную опасность для станции. Современные геодинамические движения фиксировались в 1964-1969 гг. [25]. Автор статьи [22] приводит слова Брызгалова В.И., возглавлявшего длительное время работу станции, который в своей монографии [26] отмечает, что разломы на территории строительства станции и процессы (движения земной коры), протекающие в геологических структурах, не были детальным образом исследованы. По его словам, в проекте не предполагалось наблюдение за этими процессами, а предусматривалась лишь установка аппаратуры в теле плотины.

По версии автора работы [22] именно проявление геодинамических явлений на участках размещения объекта могло способствовать причинам разрыва шпилек крепления крышки гидротурбины, что выдвинуто в официальных данных расследования в качестве основной причины аварии.

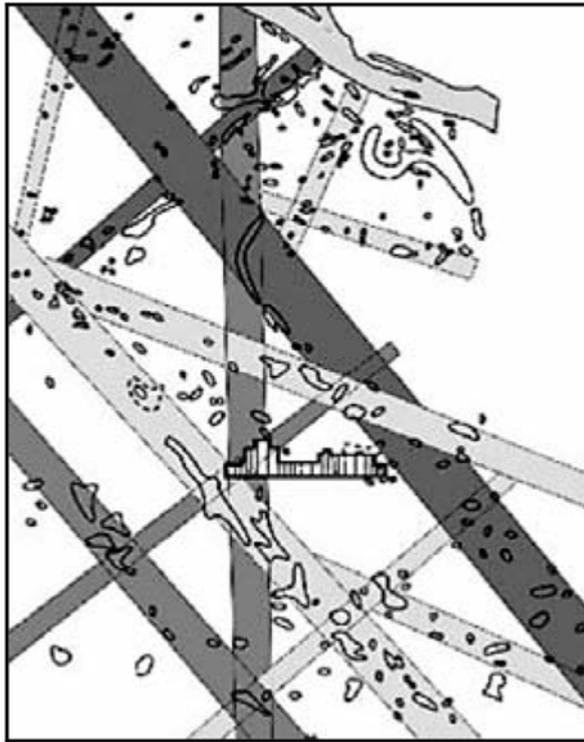


Рисунок 1.1 – Схема расположения геодинамических зон в окрестностях ЧАЭС [25]

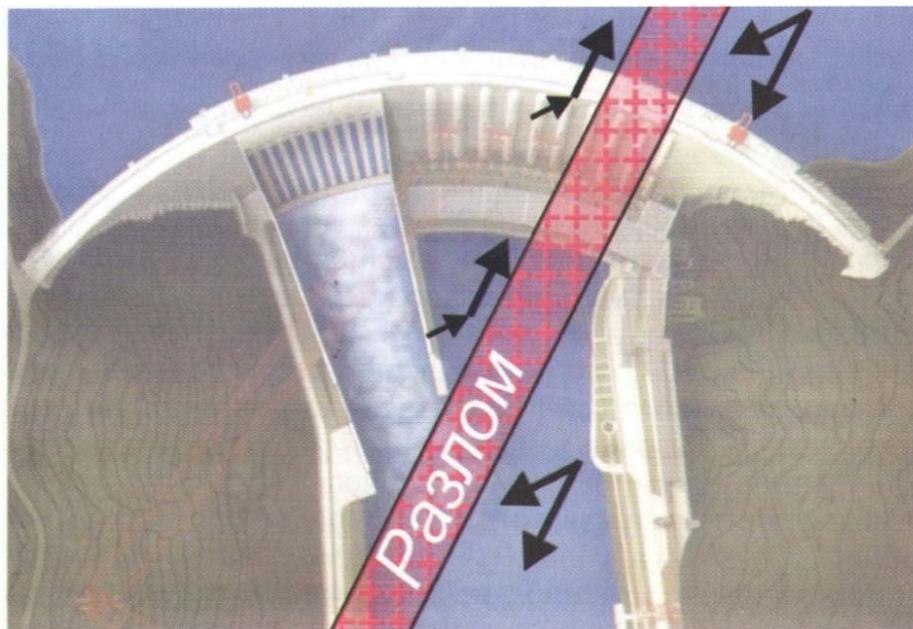


Рисунок 1.2 – Расположение разлома и прогнозируемые геодинамические движения структурных блоков в районе плотины Саяно-Шушенской ГЭС [23]

Таким образом, приведенные в разделе примеры и исследования различных ученых о воздействии современных геодинамических движений на объекты

недропользования свидетельствуют о существенной их роли и необходимости учета на всех этапах функционирования объекта – от выбора площадок под его размещение до ликвидации. Грамотный подход к учету геодинамических факторов при инженерных изысканиях, базирующийся на современных исследованиях в области геодинамики, позволит снизить риски возникновения аварийных состояний, вплоть до разрушения, конструкций зданий и сооружений – от жилых домов до особо ответственных объектов.

## **1.2 Современные геодинамические движения земной коры: виды, особенности проявления**

Становление и развитие геодинамики как самостоятельной научной дисциплины, занимающейся изучением динамических процессов в физическом теле Земли и ее оболочках, происходило в рамках геологии и представляло собой сложный процесс, полный противоречий, борьбы различных гипотез, великих геологических споров, продолжавшихся многие годы, а затем на новом уровне знаний приобретающих значительную остроту [27].

При смене тектонических парадигм основополагающим фактором являлся вопрос о механизме процессов и, как следствие, о приоритете вертикальных или горизонтальных движений. Так в начале XIX в Л. Бухом и А. Гумбольдтом была предложена первая тектоническую гипотеза «кратеров поднятия». Эли де Бомон, опираясь на идеи гипотезы «кратеров поднятия» и пытаясь придать ей глобальный характер, предложил гипотезу контракции, в которой ведущая роль принадлежала вертикальным движениям.

Период конца XIX века до 60-х годов XX века являлся периодом, когда в связи с открытием радиоактивности и получением новых данных по строению складчатых сооружений была подорвана физическая основа концепции контракции. Взамен ее появлялись новые противоречащие друг другу тектонические гипотезы, поскольку в поисках механизма тектогенеза ученые шли разными путями. Выдвигались гипотезы, в которых основная роль отводилась

горизонтальным движениям (А. Вегенер, Ф. Тейлор, А. Холмс, Дж. Джоли и др.). Другие гипотезы отстаивали преобладание вертикальных тектонических движений (Э. Хаарман, Р. Беммелен, Б. и Р. Виллисы и др.) [27]. Сторонников первого направления называли мобилистами, второго – фиксистами.

В 60-е годы XX в. на смену практически утвердившейся фиксистской парадигме пришла новая, противоположная ей мобилистская концепция, получившая название тектоники плит, которая стала господствующей парадигмой на следующие десятилетия. Тектоника плит практически мгновенно подверглась проверке методами глубоководного бурения. В 1980-е годы методы высокоточных лазерных измерений на поверхности Земли и с искусственных спутников позволили непосредственно измерять движения литосферных плит [27, 28].

Появление и быстрое распространение новой теории тектоники литосферных плит и привело к оформлению геодинамики как самостоятельной дисциплины в области наук о Земле в 70-е годы прошлого столетия [29,30].

На сегодняшнем этапе развития геодинамики в рамках создания глобальной геодинамической модели, учитывающей практически весь накопленный к настоящему времени фактический материал по глубинному строению Земли и ее поверхностной геологии, горизонтальные и вертикальные движения рассматриваются совместно.

В настоящее время движения земной коры фиксируются различными инструментальными методами. Факт же их существования на протяжении всего геологического периода развития Земли заметен невооруженным глазом. Яркие примеры их присутствия приводит в своих многочисленных публикациях по геодинамической тематике Л.И. Серебрякова [31].

Под термином современные движения земной коры (СДЗК) в геологии понимают деформационные процессы и явления, относящиеся к современному (голоценовому) периоду четвертичного периода, то есть примерно к последним 10000 лет эволюции земной литосферы. Для их исследования применяются геолого-геоморфологические методы, которые дают большие осреднения. Эти методы изучают суммарный результат тектонических движений на протяжении

длительного интервала времени, в течение которого характер движений мог меняться в значительной степени и не соответствовать их нынешним параметрам и полям напряжений [32]. Именно к таким движениям относится большинство критериев в нормативных документах, регламентирующих инженерно-геодезические и инженерно-геологические изыскания.

Однако различными способами и методами фиксируются менее продолжительные деформационные явления, которые, очевидно, являются высокочастотными компонентами четвертичных процессов. В этой связи к концу XX века в литературе стали четко разделять понятия общей геодинамики и современной геодинамики.

Объектами изучения современной геодинамики являются зоны современных активных разломов и области сейсмической и вулканической активизации. Длительность современных геодинамических процессов заключена в интервале от нескольких часов до первых сотен лет [2,4]. Как было показано в предыдущем разделе, именно эти процессы оказывают самое негативное влияние на объекты недропользования.

В СССР изучение современных движений земной коры началось с изучения вертикальных движений с использованием высокоточного нивелирования. Масштабное нивелирование проводилось в 1945-1946 гг. [31,33]. В 1971 году была представлена первая карта на территорию Европейской части СССР и Восточной Европы, построенная по данным повторных нивелирований больших территорий с интервалами между повторными измерениями в десятки лет [34]. По данным исследований следовало, что в платформенных асейсмичных областях наблюдаются относительно небольшие скорости движений – 3-5 мм/год, в отличие от сейсмоактивных районов, где они могут достигать 20 мм/год [35-41]. Выявлялись аномальные протяженные зоны с повышенным градиентом аномальных изменений, приуроченные к зонам глубинных разломов.

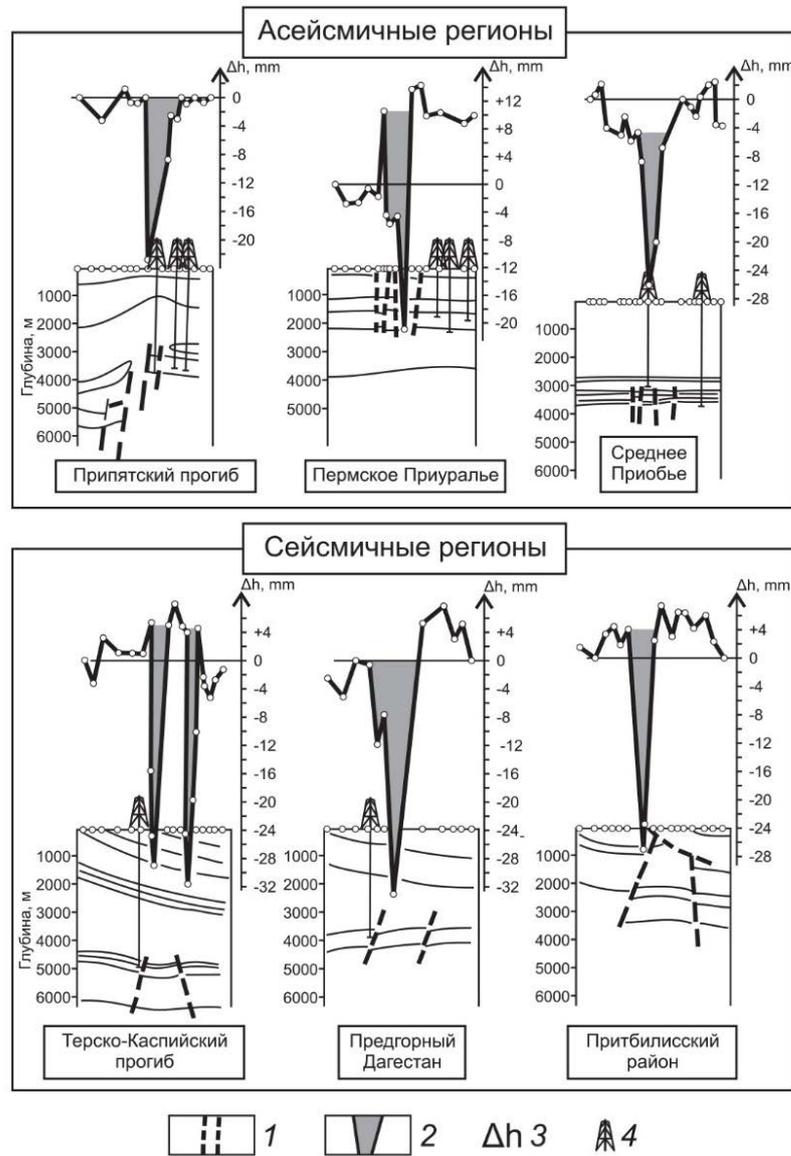
При сравнении скоростей движений, полученных из нивелирования и по геолого-морфологическим данным, было выявлено несоответствие, получившее название «парадокс больших скоростей», заключающийся в отсутствии

унаследованного характера современных движений земной коры от движений прошлых геологических эпох. «Парадокс больших скоростей» объяснялся суперпозицией вертикальных движений различных знаков.

Парадигма унаследованного характера развития современных геодинамических процессов была нарушена, когда с 1970-х годов в рамках изучения деформаций земной коры были созданы десятки полигонов в орогенных, сейсмоопасных [4, 14, 31, 42] и в платформенных асейсмичных регионах [43]. На основании измерений, проводимых с периодичностью, составляющей месяцы и годы, были выявлены интенсивные локальные аномалии современных движений, приуроченных к зонам разломов различного типа и порядка, не только в сейсмических районах, но и в асейсмичных областях, которые считались, согласно картам вертикальных движений земной коры, геодинамически спокойными регионами (рисунок 1.3) [2, 4, 5, 6]. Более того, в некоторых случаях аномальная геодинамическая активность разломных зон в асейсмических областях оказалась выше, чем в сейсмоактивных. Эти движения получили название суперинтенсивных деформаций земной поверхности в зонах разломов. Они имеют высокие амплитуды (до 50-70 мм в год), короткопериодичны (0,1-1 года), пространственно локализованы (0,1-1 км) и знакопеременны, могут иметь чрезвычайно высокие среднегодовые скорости относительных деформаций – до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ . Исследования показывают, что возникновение суперинтенсивных деформаций в разломных зонах происходит под влиянием крайне малых внешних воздействий природного или техногенного происхождения. Таким образом, эти движения являются параметрически индуцированными движениями земной поверхности в зонах разломов и оказывают особо негативное влияние на объекты недропользования.

Полученные результаты изменили понятие современного активного разлома, делая акцент на его опасности для объектов. Было предложено под современным активным разломом понимать разломную зону, где происходят современные короткопериодные суперинтенсивные деформации со скоростями относительных деформаций более  $10^{-5}$ , то есть скорость настолько велика, что может достигнуть предельных для объекта значений деформаций за период его эксплуатации.

Поэтому современный активный разлом классифицируется согласно предложению Кузьмина Ю.О. как опасный разлом.



1 – зоны разрывных нарушений, 2 – зоны аномальных вертикальных движений, 3 – амплитуды современных вертикальных движений, 4 – пробуренные скважины

Рисунок 1.3 – Примеры суперинтенсивных движений [4]

С развитием средств и методов космической геодезии появилась возможность высокоточных и масштабных по охвату территории наблюдений за современными движениями земной коры. Выполнено большое количество проектов на глобальном, региональном и локальном уровнях для решения геодинамических задач. Действуют сети GPS-наблюдений, охватывающие многие

сейсмоактивные регионы [44-54], где исследуются предсейсмические и постсейсмические деформации. С помощью ГНСС-методов изучается геодинамика разломных зон [55-57], характер распределения движений по ним [5, 58], определяются скорости современных геодинамических движений. Большое количество геодинамических полигонов создается в окрестностях крупных техногенных объектов: месторождений полезных ископаемых, нефтяных и газовых месторождений, атомных и гидроэлектростанций.

Важным преимуществом ГНСС-методов является возможность получения данных с высокой временной детальностью – от дискретной до квазинепрерывной. В зависимости от продолжительности наблюдений и частоты получения данных выделяются движения с различными амплитудными и частотными характеристиками.

Спутниковые методы позволяют организовать непрерывный мониторинг геодинамических движений с использованием как постоянно действующих станций ГНСС, так и сеансов суточных наблюдений на локальных геодинамических полигонах. В результате спектральной обработки непрерывных наблюдений с помощью спутниковых методов с частотой опроса от одного раза в сутки до одного раза в час обнаружены колебательные компоненты с периодами от 575,26 сут до 7,17 сут [59] и 1 сут и 0,5 сут с амплитудами до 4 мм [60]. Суточные изменения также обнаружены в глобальных сетях постоянно действующих станций [61]. Авторы их связывают с влиянием суточного прилива, чего нельзя сказать о гармониках, выявленных в исследовании [60], поскольку приливные изменения оказывают малые влияния на близко расположенные пункты измерений.

По данным непрерывных суточных измерений спутниковыми методами компонент векторов базовых линий длиной от нескольких сотен метров до пяти километров на локальных геодинамических полигонах горнодобывающих предприятий Урала, Сибири, Казахстана с дискретностью интервала осреднения данных 10-15 минут установлено наличие смещений, превышающих точность измерений, а также выявлены циклы продолжительностью 3,5 часа и 40 минут [13, 62]. Такие движения авторы называют циклическими короткопериодными

движениями, поскольку продолжительность их циклов укладывается один или более раз в сеанс наблюдений.

Пример результатов с достаточно малым временным интервалом опроса приводится в работе [63], где вертикальные движения грунтового репера, заложенного в пределах геодинамически активной зоны на одном из участков Южного берега Крыма, получены высокоточным нивелированием с трехминутными дискретными интервалами наблюдений в течение 96 минут (рисунок 1.4). Выявлен шестидесятиминутный период, а величина максимальных вертикальных движений в 15 раз превышает точность измерений.



Рисунок 1.4 – График вертикальных движений грунтовых реперов с 3-минутным интервалом наблюдений с точностью измерений 0,05 мм [63]

Применение методики мгновенного одноэпохового позиционирования позволило авторам работы [64] уменьшить дискретность интервала наблюдений, не теряя при этом точности измерений, что привело к возможности использования спутниковых измерений для выявления быстрой составляющей геодинамического процесса – сейсмической.

В свою очередь анализ результатов широкополосных сейсмостанций с дискретностью сканирования масштаба минуты-секунды позволил авторам работ [16-20, 65], как уже отмечалось в предыдущем разделе, выделить и классифицировать гедеформации асейсмического характера внутрисуточного масштаба, не связанные с землетрясениями (рисунок 1.5) [65]. Глобальная сеть сейсмологических измерений, фиксируя такие деформации, не подтверждает их наличие кустом из трех-четырех сейсмостанций, что закономерно для сейсмических волн землетрясений.

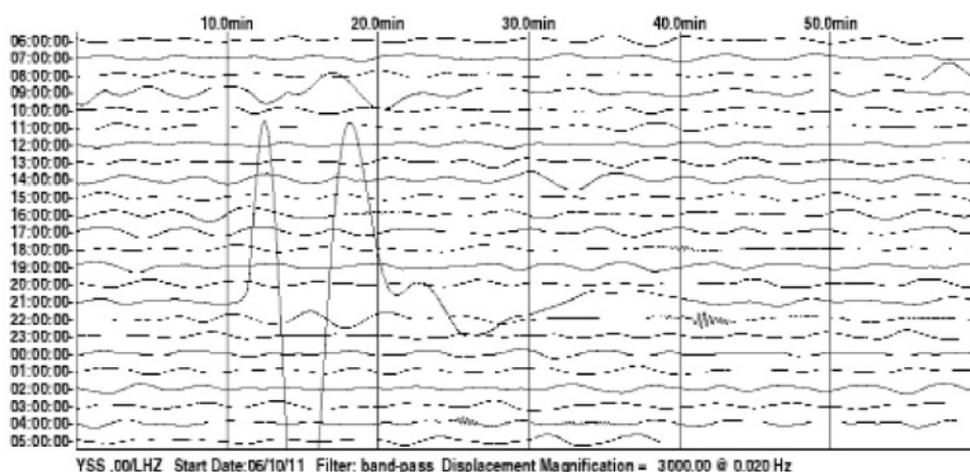


Рисунок 1.5 – Свободные гедеформации с периодом около 5 мин [65]

Таким образом, в научной литературе современные движения подразделяют на *направленные (трендовые)* и *знакопеременные (вариационные)*. Направленными принято считать движения, для которых за временной интервал длительностью не менее двух лет можно выделить трендовую составляющую. Знакопеременные движения происходят на фоне трендовых или при их отсутствии в виде разнопериодных обратимых перемещений – вариаций.

На вид выделяемых движений влияет частота опроса при проведении измерений (дискретность измерений). Чем меньше частота опроса, тем больше амплитуды движений и меньше продолжительность циклов (рисунок 1.6). В связи с этим выделяются *длиннопериодные* и *короткопериодные* геодинамические движения. С позиций современной геодинамики *длиннопериодные* движения – это

движения, циклы которых выявляются при наблюдениях с периодичностью 0,5-1 года. Если смещения геодезических пунктов получены с частотой опроса от 10 лет и более, то такие движения можно отнести к *трендовым* движениям, которые, по сути, являются разновидностью длиннопериодных движений с большим периодом. К *короткопериодным* движениям относятся движения, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеанс непрерывных наблюдений. При многочасовом сеансе непрерывных наблюдений продолжительность циклов может составлять от нескольких секунд до нескольких часов. Зачастую амплитуды вариационных движений меньшей продолжительности превосходят по величине трендовую составляющую.

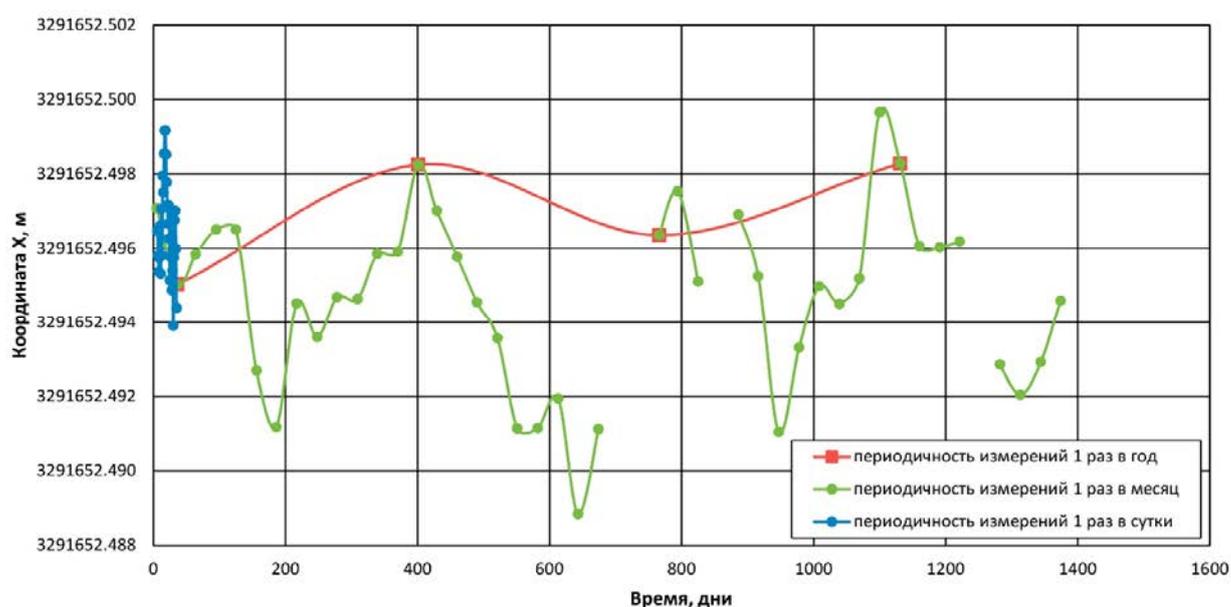


Рисунок 1.6 - Изменение координаты постоянно действующей станции ГНСС на протяжении 4 лет с различной периодичностью измерений

Короткопериодная цикличность современных геодинамических движений может по-разному влиять на объекты недропользования. Воздействие циклических движений может проявляться в непосредственном влиянии циклических деформаций на сам объект, когда амплитуда знакопеременных деформаций превысит допустимые деформации конструктивных элементов сооружения, от проявления усталостных эффектов при деформациях ниже допустимых значений, а также через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под

влиянием переменных циклических нагрузжений [12]. Причины цикличности многогранны. Их выявлению посвящено много исследований. Приливные, ротационные силы и связанные с ними сезонные явления (вариации температуры, влажности, атмосферного давления, количество выпавших осадков, перераспределение потоков вод и воздушных масс и т.д.) выступают в качестве основных причин присутствия колебательных компонент в геодинамических движениях [67-71]. Нельзя полностью отрицать и наличие систематических ошибок при определении смещений спутниковыми методами [72-75]. Тем не менее, несмотря на отсутствие на данном этапе возможности однозначной дифференциации причин проявления короткопериодной цикличности, представляется необходимым при геодинамической диагностике территорий учитывать деформации, обусловленные ею. В противном случае определяемые значения деформаций могут быть занижены.

Соотношения в периодичностях современных и древних тектонических движений представлены в работе [66].

Параметры геодинамических движений зависят не только от временной детальности наблюдений, но и от пространственной. При изменении густоты пунктов измерительной сети для наблюдений за геодинамическими движениями резко изменяется информативность получаемых результатов [2]. Очевидно, что зависимость изменчивости параметров геодинамических движений от пространственных масштабов обусловлена иерархически блочным строением массива горных пород, и на сколько бы малой ни была пространственная база измерений, на любом участке поверхности будут присутствовать тектонические нарушения различных иерархических рангов. Причем от ранга тектонического нарушения, как правило, не зависит его геодинамическая активность. Высокий уровень подвижности может фиксироваться не только на крупных нарушениях. Более того, и по самому нарушению параметры подвижности распределяются неравномерно [5, 58].

Таким образом, концепция выбора места безопасного размещения объекта в геодинамическом аспекте должна базироваться на представлениях о массиве

горных пород как об иерархически блочной неравновесной структуре, параметры которой зависят от пространственно-временной детальности исследуемых геодинамических явлений.

### **1.3 Практический опыт оценки и выбора безопасных площадок размещения**

Проблема геодинамической безопасности особо ответственных объектов недропользования особо актуальна для объектов атомной энергетики. В практике инженерных изысканий вопросам выбора площадок для их безопасного размещения всегда уделялось особое значение.

Начало строительства большинства АЭС пришлось на конец 1960-х – начало 1970-х годов. Изначально на предпроектной стадии изысканий геоморфологическими и геофизическими методами производилась оценка тектонической активности районов строительства и расположенных на территории разломов. В первую очередь прорабатывался вопрос сейсмической безопасности. Закономерности распределения современных геодинамических движений земной поверхности определялись по фондовым геодезическим данным – результатам повторного нивелирования высших классов, которое в СССР проводилось в рамках обновления главной высотной основы, и построенным на его основе картам современных вертикальных движений. Предусматривалась также организация геодинамических полигонов на территории площадки строительства, которая впоследствии, в начале 1980-х, годов стала регламентироваться нормативными документами. По факту такие геодинамические полигоны были созданы лишь на некоторых станциях.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 году требования к учету сейсмических и медленных геодинамических процессов были значительно повышены. Правительственная экспертная комиссия начала обследование территорий ряда АЭС на предмет их безопасного сейсмического и тектонического положения. После проведенных исследований на фоне ухудшения экономической ситуации в стране и протестов экологических организаций было принято решение

об отказе о строительстве в 1989 году Крымской АЭС, третьего энергоблока Игналинской АЭС в 1988 году.

На Крымской АЭС на момент проверки экспертной комиссией были возведены фундаменты и стены основного здания, существовал трехуровневый геодинамический полигон, на котором проведено три нивелирных цикла (1984-1986 гг.) [76,77]. На всех трех пространственных уровнях была выявлены участки с высокой колебательной активностью между эпохами – 6-10 мм/год. Градиенты скоростей движений и их значения превысили нормативные значения, что и явилось одной из причин полного отказа от строительства станции.

При обосновании строительства 3 энергоблока Игналинской АЭС анализировались материалы результатов повторного нивелирования за промежутки около 30 лет (1950-1980 гг.) на район 450×500 км<sup>2</sup>, включающий Литву, Латвию и Северо-Западную Белоруссию [78]. Геодинамического полигона ни на территории площадки, ни в окрестностях станции не было. Анализ материалов показал, что размах изменений скоростей вертикальных движений и в пространстве, и во времени достигает 6-7 мм/год, что для платформенных областей считается большой величиной. Семьдесят процентов разрывных структур, установленных по геодезическим данным, активны. Установленные закономерности в распределении вертикальных движений привели к необходимости заморозки строительства 3 энергоблока.

Приведенные исследования являются примерами изучения площадок строительства атомных станций в советский период времени, когда определялись только вертикальные компоненты движений и чаще по фондовым геодезическим данным, а наблюдения на многоуровневых геодинамических полигонах, способствующие возможности определения параметров геодинамических движений на различных пространственных уровнях, являлись единичными случаями.

В середине 1990-х годов с началом внедрения спутниковых технологий отраслевыми нормативными документами предусматривалось расширение геодинамических полигонов на всех объектах использования атомной энергии. В

1995 году сотрудниками Геофизического центра РАН и Института физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН были организованы геодинамические полигоны на ряде АЭС: Нововоронежской, Калининской, Ростовской [79, 80]. В начале своих исследований авторы уделяли первостепенное внимание проработке методических аспектов использования спутниковых методов в геодинамических целях. Одной из главных задач была возможность выявления этих движений, когда их параметры соизмеримы с точностью ГНСС-методов того времени. Проведенная в форме мониторинга за трендовыми горизонтальными движениями в 1995-2002 гг. геодинамическая диагностика территорий атомных станций была направлена в основном на дополнительную оценку сейсмологической опасности [79, 81-83].

Эти наблюдения стали одним из первых примеров использования спутниковых методов для диагностики горизонтальных геодинамических движений на достаточно больших территориях в окрестностях площадок размещения АЭС. Основной задачей исследований являлся охват измерениями основных близлежащих разломных структур с целью выявления их геодинамической активности и оценки возможностей проявления сейсмических событий. Традиционные геодезические методы, как известно, не позволяли проводить наблюдения на таком масштабном уровне. Однако, пространственно-временная детальность ГНСС-наблюдений в этих проектах не предусматривала рассмотрение геодинамических движений в качестве внешнего фактора воздействия, способного непосредственно влиять на устойчивость и безопасность сооружений атомных станций.

В последующие годы по мере внедрения ГНСС-методов в практику геодинамических исследований было выполнено достаточно много подобных проектов [42, 84-88]. В работе [89] авторы приводят результаты исследования зон активных разломов и сейсмичности в районах существующих и проектируемых АЭС, а также крупных ГЭС и ТЭС на территории европейской части России и стран ближнего зарубежья. Методика их исследований базировалась на детальном анализе геологических материалов, космоснимков, данных GPS-измерений, что

позволило оценить в первом приближении горизонтальную и вертикальную подвижность участков земной коры в районе размещения станций.

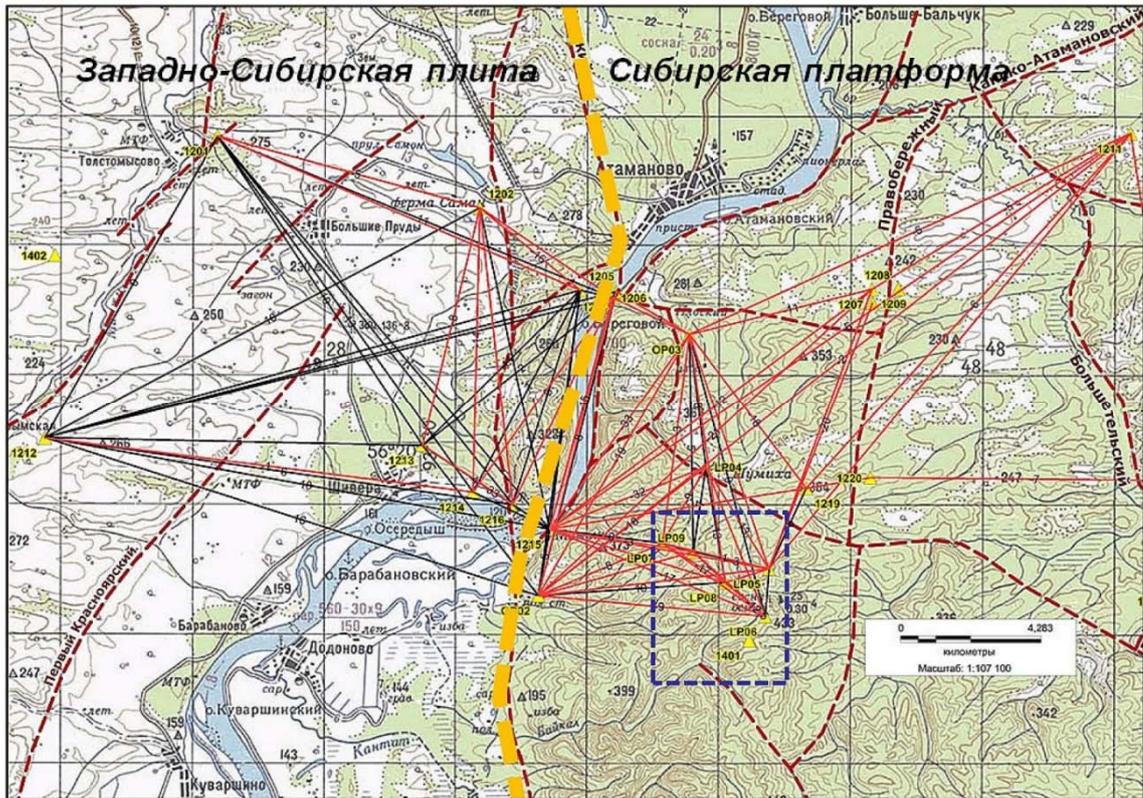
Объектами атомной энергетики, для которых также очень важна проблема выбора места их размещения, являются хранилища радиоактивных отходов. Четкой методологической основы выбора участков захоронения, несмотря на рекомендации МАГАТЭ, на сегодняшний день нет ни в одной стране в мире. США после затрат в 9 миллиардов долларов (десятая часть сметы) прекратили строительство подземного национального хранилища радиоактивных отходов Юкка Маунтин. Швеция после Фукусимы приостановили свой аналогичный проект хранилища Форсмарк [90].

Нижнеканский гранитоидный массив, расположенный на юге Енисейского кряжа на границе крупнейших тектонических структур – Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянского орогена, с начала 2000-х годов рассматривался местом первой в России изоляции в глубинные геологические структуры радиоактивных отходов. В настоящее время там начато строительство пункта их захоронения. В 2010 году был создан геодинамический полигон для наблюдений за скоростями современных движений земной коры (рисунок 1.7).

Перед созданием полигона на протяжении почти 10 лет прорабатывались методические основы площадных наблюдений за движениями, интерпретации результатов, критерии дифференцирования земной поверхности по скоростям и градиентам деформаций и прогнозирования устойчивости геологической среды, совершенствовалась методика моделирования напряженно-деформированного состояния [91-93]. Проводились исследования на экспериментальном полигоне на одной из площадок захоронения отходов в Московской области [94, 95]. Авторы в своих исследованиях обращали внимание и на пространственно-временные факторы в изучении движений, и на их цикличность, и на необходимость оперирования деформационными характеристиками движений для принятия инженерных решений при анализе результатов наблюдений [66, 95, 96].

Результаты наблюдений на Нижнеканском полигоне подробно изложены в публикациях [79, 97]. По данным деформационного анализа выделено 4

аномальных участка. Однако, скорости деформаций на них не превышают, по мнению авторов исследования, критических значений для геодинамических зон, обозначенных в современной литературе.



Черные базисные линии – растяжение; красные базисные линии – сжатие; синий пунктир – положение участка строительства “Енисейский”; оранжевый пунктир – зона контакта Западно-Сибирской плиты с Сибирской платформой.

Рисунок 1.7 – Схема геодинамического полигона в районе Нижнеканского массива по наблюдениям 2010-2013 гг. [79]

Следует отметить, что критические значения скорости деформаций, являющиеся основополагающим критерием для выделения структурных блоков как потенциально возможных безопасных участков размещения объектов недропользования, зависят от пространственно-временной детальности наблюдений.

Таким образом, в вопросах геодинамического районирования и диагностики площадок размещения объектов недропользования с внедрением спутниковых методов произошли значительные изменения за последние 20 лет. Новые

технологии позволили поменять взгляды на геодинамические движения, степень их опасности и возможности учета на всех стадиях существования объекта. Однако существуют неоднозначности, связанные с определением критериев опасности деформационных процессов, отсутствуют четкие методики регистрации геодинамических движений с учетом пространственно-временного фактора их распространения.

#### **1.4 Нормативные основы учета геодинамических факторов**

Нормативные документы, регламентирующие условия и требования к созданию особо ответственных объектов недропользования (АЭС, ГЭС, и т.д.), предусматривают изучение и сопоставление природных и техногенных условий конкурирующих участков расположения проектируемых сооружений для выбора площадок, наиболее перспективных для строительства. В геодинамическом аспекте первостепенная роль в этих документах отводится сейсмологическим изысканиям. На участках с неблагоприятными природными процессами и явлениями (оползни, осыпи, карстовые проявления, тектонические нарушения, неустойчивые склоны и др.) следует наблюдать за современными геодинамическими движениями в целях определения их количественных характеристик, оценки и прогноза развития неблагоприятных процессов [98, 99]. Учет современных геодинамических движений совсем не предусмотрен нормативной документацией по строительству высотных объектов, а также уникальных зданий и сооружений [100, 101].

В мировой практике наиболее проработаны в геодинамическом аспекте нормативные документы по выбору площадок безопасного размещения АЭС. Разработанная система нормативных документов в области использования атомной энергии содержит критерии и требования к обеспечению безопасности АЭС [102]. Выбор площадок под размещение объектов ядерной энергетики на международном уровне регламентируется стандартами МАГАТЭ [103-106]. Европейский Союз и США руководствуются Еврокодами [107-108] и национальными стандартами

США [109]. В России безопасность объектов использования атомной энергии от внешних природных и техногенных факторов регулируется федеральными нормами и правилами (НП), которые являются обязательными на всех этапах жизни объекта, и системой руководств по безопасности (РБ), носящих рекомендательный характер. Требования НП и рекомендации РБ в основном не противоречат стандартам МАГАТЭ [102].

Требования и критерии учета современной геодинамической активности, связанной с движениями земной коры, при выборе площадок размещения атомных станций регламентируются несколькими нормативными документами [110-114]. В последние несколько лет в эти документы были внесены поправки, учитывающие изменения в представлениях о современных геодинамических движениях.

В отечественной и мировой практике используется телескопический принцип изыскания региона, района, пункта, площадки АЭС, позволяющий по мере приближения к месту размещения объекта повышать детальность и достоверность обоснования безопасности [102]. Согласно до сих пор действующему руководящему техническому материалу 1984 года по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций ГКИНП-10-186-84 [112] изучается район строительства АЭС, который охватывает территорию радиусом 100-150 км; один или несколько в пределах района альтернативных пунктов строительства, имеющих размеры порядка  $10 \times 15$  км, и в пределах намеченного пункта одна или несколько площадок строительства размерами порядка  $3 \times 3$  км, на которых должны располагаться основные объекты атомных станций. В более новом нормативном документе СП 151.13330.2012 «Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС» [113] в качестве района строительства рассматривается территория размером  $300 \times 300$  км. Телескопический принцип исследования территорий позволяет учесть пространственную изменчивость параметров геодинамических движений.

В силу давности создания ГКИНП-10-186-84 основным методом изучения деформаций земной поверхности, который регламентируется этим документом,

является высокоточное нивелирование. Поэтому требования к устойчивости АЭС, которые обозначены в нем, относятся только к крену оснований зданий и сооружений, который составляет  $1 \cdot 10^{-4}$  за 30 лет или  $3,3 \cdot 10^{-6}$  в год. Однако этот критерий завышен как минимум на порядок и в сравнении с данными о фоновой подвижности земной коры, и в сравнении с допусками для ответственных прецизионных объектов атомной энергетики [3].

НП-032-19 [110], устанавливая основные критерии и требования к безопасному размещению АЭС, в плане рассмотрения геодинамических аспектов не допускает выбор площадок, расположенных непосредственно на активных разломах, по которому за последние 1 миллион лет (четвертичный период) произошло относительное перемещение примыкающих блоков земной коры на 0,5 м и более. Применимость данного критерия в реальных условиях далеко неоднозначна. Четвертичных отложений во многих случаях вообще может не быть, и данный критерий предполагает очень малую среднюю скорость по разлому в год –  $5 \cdot 10^{-4}$  мм/год, что является несопоставимым с реальными скоростями современных движений [3]. Таким образом, активный в данном понимании разлом не является опасным разломом с точки зрения риска воздействия смещений такого уровня на объекты недропользования.

Численные значения критериев степени опасности приведены в нормативном документе – НП-064-17 [111]. В новой редакции документа различают современные дифференцированные движения земной коры, а также тектонический крип и новейшие (неоген-четвертичные) движения. Для каждого вида движений приведены значения их параметров, согласно которым осуществляется классификация степеней опасности. В качестве параметра используется градиент скорости тектонических движений (скорость деформации), то есть отношение амплитуды тектонического перемещения маркирующей поверхности в геодинамической зоне к ширине зоны в единицу времени. Для современных дифференцированных движений выделяются площадки трех степеней опасности: I – геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности  $10^{-5}$  год<sup>-1</sup> и выше; II – от  $10^{-8}$

до  $10^{-5}$  год<sup>-1</sup>; III – менее  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup>. Неблагоприятными для размещения АЭС являются территории возможного проявления процессов, явлений и факторов I и II степени опасности. Приведенные в обновленном нормативном документе критерии согласуются со среднегодовыми значениями скоростей деформаций в разломных зонах, представляющими опасность для объектов. Для новейших (неоген-четвертичных) движений границы значений градиента скорости тектонических движений для классификации площадок по степеням опасности находятся в пределах от  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup>.

Адекватные современным представлениям о современных движениях критерии пригодности безопасных площадок для особо сложных и уникальных сооружений, в том числе атомных станций, регламентированы в общестроительных правилах СП 11-104-97 [98]. Данным нормативом в пункте 10 предусмотрено определение на основе геодезических наблюдений скорости и ориентировки современных движений в районах развития разрывных тектонических смещений. Документ выделяет движения с различными периодичностями – от криповых до мгновенных сейсмогенных движений. Кроме того, в данном нормативе определены деформационные критерии для зданий АЭС и объектов I и II уровней ответственности: горизонтальное растяжение-сжатие –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; наклон (крен) –  $3 \cdot 10^{-3}$ ; предельно допустимый наклон в основании реакторных отделов АЭС –  $1 \cdot 10^{-3}$ .

СП 151.13330.2012 [113], вступивший в силу в 2012 году, устанавливая требования к инженерным изысканиям для выбора мест размещения АЭС, для оценки пригодности территорий по фактору современных геодинамических движений ссылается на Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии [110,111] и рекомендует создание спутниковыми методами геодинамических полигонов на уровне пункта и площадок размещения для оценки параметров горизонтальных движений, их амплитуд, скоростей, градиентов скоростей, деформаций. Для анализа параметров вертикальных движений используются фондовые геодезические данные и результаты высокоточного нивелирования. Особое внимание уделяется территориям с повышенной

сейсмичностью, и полученные характеристики геодинамических движений рассматриваются в связи с ней. Значений критических величин определяемых параметров в данном своде правил нет.

В связи с тем, что при выборе мест размещения изучение современных движений осуществляется на трех масштабных уровнях (район, пункт, площадка), на каждом этапе для оценки уровня геодинамической активности необходимы свои деформационные критерии, поскольку деформации не являются инвариантной величиной при иерархически-блочном строении массива горных пород. Для оценки опасности деформаций на разных масштабных уровнях авторами работы [66] предложено использовать зависимость скоростей деформаций от расстояний между пунктами наблюдений, полученную по данным повторных спутниковых измерений в исследованиях Т.В. Гусевой с соавторами [115] (рисунок 1.8). Предложение введено в РБ-019-17 [114], в котором для выявления и оценки параметров зон возможных очагов землетрясений рекомендуется учитывать современные геодинамические движения, и в приложении №4 приведены критерии для оценки предельной величины скорости деформации земной коры для территорий различной площади. Следует отметить, что в этих критериях не учтен в полной мере временной фактор. Приведенные скорости деформаций (рисунок 1.8) являются результатом осреднения за временной интервал несколько лет. Как известно, с уменьшением интервала осреднения они могут увеличиваться. Современные средства измерения и методики обработки позволяют уменьшить интервал наблюдений для оценки вариационных параметров движений, которые, как отмечалось в разделе 1.2, способны оказывать на объекты определенные воздействия.

Таким образом, за последние 5-7 лет в основные нормативные документы в области использования атомной энергии, регламентирующие выбор площадок размещения АЭС, внесены уточнения и сделаны поправки в соответствии с результатами фундаментальных исследований современной геодинамики, полученными в конце XX – начале XXI века. Кроме того, введены новые нормативы [110, 111, 113, 114]. В оценке степени пригодности площадки

основополагающая роль стала отводиться деформационным параметрам современных геодинамических движений земной коры. Дифференцируются современные и новейшие (четвертичные) движения. Введены критерии безопасности, относящиеся не только к четвертичным, но и к современным геодинамическим движениям. Существенная роль отводится оценке параметров горизонтальных движений в связи с широко внедрившимися спутниковыми методами их измерения.

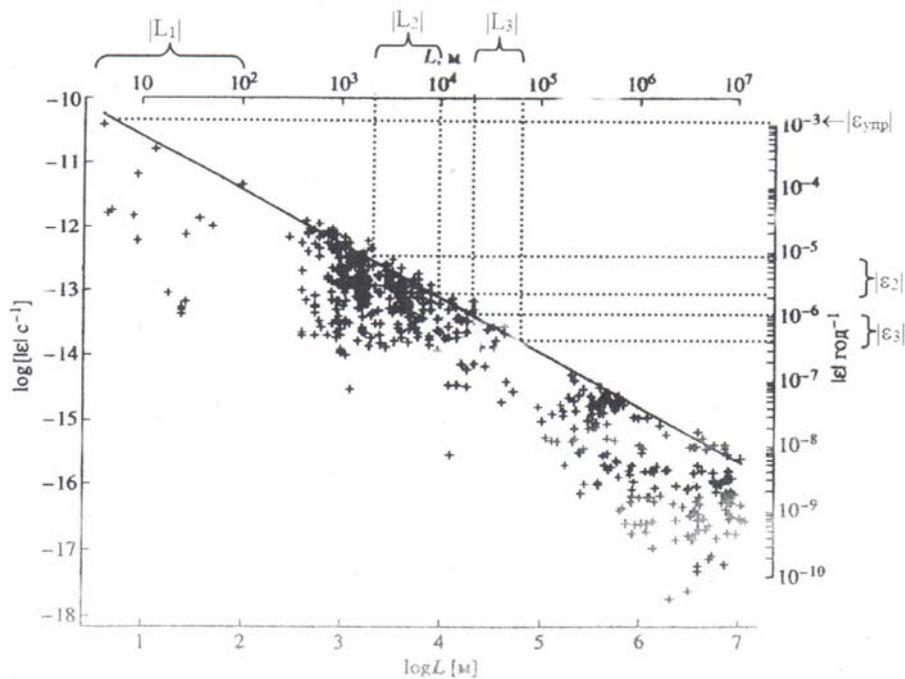


Рисунок 1.8 - Распределение модулей скоростей предельных горизонтальных деформаций в зависимости от расстояния между пунктами наблюдений [115]

Следует отметить, что в нормативных документах в рекомендациях для оценки параметров современных движений земной коры слабо отражена необходимость учета иерархически блочной структуры массива горных пород, процессы самоорганизации и другие фундаментальные явления, определяющие его напряженно-деформированное состояние и безопасность находящихся на нем объектов. Этими процессами обусловлена зависимость параметров геодинамических движений от пространственно-временных масштабов наблюдательных систем. Данную особенность рекомендуется учитывать в одном из нормативов [114], но с позиций пространственного масштаба. В действующих

нормативных документах не учитываются параметры вариационной составляющей современных геодинамических движений, которые определяются временными масштабами измерений. Как было показано в предыдущих разделах работы, деформации, определенные без учета короткопериодных вариаций в движениях, могут быть занижены. Особенно это касается короткопериодных движений, имеющих циклы от нескольких минут до нескольких часов и достаточно большие амплитуды, поскольку их прямое или опосредованное воздействие на объект недропользования может быть существенным. Определение деформаций земной коры с учетом короткопериодных вариаций геодинамических движений накладывает дополнительные требования к параметрам наблюдательных систем. Также необходима информация о значениях максимальных деформаций, обусловленных данной составляющей движений.

## 1.5 Выводы

Исходя из проведенного анализа данных о степени изученности и параметрах современных геодинамических движений земной коры, их влиянии на объекты недропользования, о способах учета геодинамического фактора при выборе благоприятных площадок размещения ответственных объектов и нормативной документации по этому вопросу, сделаны следующие выводы:

1. Современные геодинамические движения, распространенные повсеместно, включая асейсмичные области, формируют в иерархически блочной среде массива горных пород деформации с дискретным характером распределения, представляющие потенциальную опасность для объектов недропользования. Для нейтрализации негативного влияния движений на безопасность объектов необходимо на стадии изысканий выбирать места их благоприятного размещения с учетом геодинамических факторов.

2. Современные геодинамические движения (вертикальные и горизонтальные) приурочены к тектоническим нарушениям, имеют

неравномерный характер распространения по ним, цикличны, фиксируются на различных пространственно-временных уровнях.

3. Зависимость изменчивости параметров геодинамических движений от пространственно-временных масштабов наблюдательных систем обусловлена иерархически блочным строением массива горных пород и эндогенными и экзогенными процессами, определяющими современное геодинамическое состояние недр. Принято их условное разделение на трендовую составляющую, сохраняющую в течение относительно продолжительного периода свою направленность и скорость перемещения и выявляемую в процессе многолетних измерений с периодичностью от 0,5 года или однократных повторных наблюдениях через интервал от 10 лет и более, и вариационную составляющую, проявляющуюся в виде короткопериодных движений, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеанс непрерывных измерений и составляет минуты, часы, сутки. Влияние вариационной составляющей движений на объекты может проявляться прямым и косвенным образом.

4. Согласно нормативной литературе и в реализованных за последние десятилетия проектах по выбору мест безопасного размещения особо ответственных объектов геодинамические движения исследуются на пространственных уровнях от 3 до 150 километров по фондовым данным и на основе измерений в течение периода 3-5 лет, что, являясь затратным во временном аспекте процессом, не охватывает всего возможного потенциально опасного спектра движений, доступных для выявления современными методами. Так, например, за рамками изучения остаются движения на временных масштабах, сопоставимых со сроком службы объектов – 30-50 лет, а также параметры вариационной короткопериодной составляющей, неучет которых приводит к занижению значений определяемых деформаций, что является особенно критичным при размещении ответственных объектов. Следовательно, приведенные в документах критерии оценки в полной мере не рассматривают фактор пространственно-временной изменчивости параметров геодинамических движений.

5. Выбор площадок размещения ответственных объектов по геодинамическому фактору должен осуществляться с учетом закономерностей распределения геодинамических движений и вызываемых ими деформаций на различных пространственно-временных масштабах в иерархически блочной среде массива горных пород с присущими ей процессами самоорганизации. На сегодняшний день методики, учитывающей данные особенности и пригодной для массового использования, не разработано.

## **2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ИЕРАРХИЧЕСКИ БЛОЧНОМ МАССИВЕ**

### **2.1 Представления о массиве горных пород как открытой динамической системе**

Воздействие современных геодинамических движений на объекты недропользования реализуется, как отмечалось в предыдущей главе, через деформирование массива горных пород в основании объекта. В соответствии с результатами экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированное состояние массива горных пород определяется двумя его фундаментальными свойствами – иерархически блочной структурой и постоянной подвижностью этих блоков по отношению друг к другу, вызванной современными геодинамическими движениями [116-119]. Данные свойства позволяют использовать модельные представления о реальной геологической среде как об открытой динамической системе [120-122], в которой присутствуют явления самоорганизации, способствующие образованию относительно стабильных пространственно-временных структур. Рассмотрение массива горных пород с точки зрения эволюции открытой динамической системы дает возможность обосновать подход к выбору безопасных участков размещения объектов по геодинамическому фактору.

#### **2.1.1 Иерархическая блочность и самоподобие массива горных пород**

Земная кора имеет сложное неоднородное строение, обусловленное особенностями генезиса, историей развития и динамикой эндогенных и экзогенных процессов. Любой участок земной коры как на поверхности, так и на значительных глубинах пересекается огромным количеством легко наблюдаемых разномасштабных нарушений сплошности (разломы, зоны трещиноватости, трещины разного масштаба и т.д.), которые формируют границы обособленных

областей изометричной формы с квазиоднородным для каждого масштаба строением – структурные блоки [123].

Сеть пересекающихся глубинных разломов оконтуривает литосферные плиты – тектонические структуры самого большого масштаба. В настоящее время выделяют восемь крупных и около полутора десятков мелких литосферных плит. Границы литосферных плит определяются по сейсмологическим, палеомагнитным и геодезическим данным. Постоянное повышение точности и детальности этих исследований позволяет выделять плиты более мелкого масштабного уровня [124-125], оставляя вопрос об их количестве дискуссионным.

На меньших масштабах квазиоднородные области представлены геоблоками, мегаблоками и т.д. Линейные размеры блоков подчиняются определенной иерархии. Каждый блок  $n$ -го иерархического уровня, являясь частью более крупного блока  $(n-1)$ -го уровня, включает в себя определенное количество блоков следующего  $(n+1)$ -го уровня. При этом структурная иерархия блоков в земной коре существует на различных масштабных уровнях – от масштабов плит до размеров кристаллической решетки.

Идея об иерархически-блочном строении твердых тел и сред берет начало из геофизических исследований в работах академиков Садовского М.А. [126] и Пиотровского В.В. [127]. Сложное иерархическое строение литосферы выявляется различными методами. Для анализа используются данные геологических карт, дешифрирования спутниковых снимков [128-132], геофизические данные, связанные с амплитудами и скоростями сейсмических волн, гравитационными и магнитными аномалиями [133-137], данные из наблюдений структурных отдельностей в процессе горных работ [138-139].

Так, например, иерархическая структура литосферы в работах Петрова О.В. [140-141] выявлена на основе анализа гравитационных и магнитных аномалий. На основе количественных методов разложения рельефа и аномалий геоида автором выделены геоблоки двенадцати порядков регионального и локального уровня площадью от  $(1-1,5) \cdot 10^6$  до  $5-7$  км<sup>2</sup>. Более крупные структуры неоднородностей анализируемых полей характеризуются большей глубиной проникновения.

Кроме того, на основании линеаментного анализа и дешифрирования космических снимков разработаны оригинальные методики, выявляющие тектоническую раздробленность литосферы на разных глубинных уровнях. Выявленные в работе [131] структуры имеют иерархический характер – с увеличением глубины рассмотрения увеличивается масштаб выявляемых неоднородностей и блоков.

Вопросы разломно-блоковой делимости литосферы рассматривались также в работах Гольдина С.В. [142], Кочаряна Г.Г., Спивака, А.А. [143], Адушкина В.В., Родионова В.Н. [144, 145], Шермана С.И. [146-148]. Таким образом, блочное строение твердой оболочки Земли можно считать общепризнанным.

Характеристикой степени неоднородности иерархически блочной геологической среды являются тектонические разломы и трещины разного масштабного уровня. Существует достаточно большое количество классификаций разломов, приспособленных к решению технологических задач и изучению различных процессов соответствующего масштабного уровня. Как правило, ранжирование структурных нарушений выполняется во взаимосвязи с их протяженностью.

Распространенная в геомеханике классификация предложена М.В. Рацем, который выделили несколько различных порядков структурных неоднородностей – от нулевого порядка, разбивающие массивы пород на блоки с линейными размерами свыше 10 км, до четвертого порядка, связанного со структурными нарушениями межкристаллических областей, а также с дефектами структуры в решетках порообразующих минералов [149].

Классификация блоковых структур И.М. Батугиной и И.М. Петухова [150], рекомендуемая в методических указаниях ВНИМИ [151] для геодинамического районирования земной коры, базируется не столько на конкретных размерах блоков различного ранга, а на возможности их выделения на картах различного масштаба.

В качестве примера одной из детально проработанных классификаций следует отметить классификацию С.И. Шермана, основанием в которой является

отношение длины структурной неоднородности к мощности деформируемого слоя и глубине его проникновения в земную кору [146-148]. Классификация по данному критерию позволила выявить закономерности в соотношениях различных параметров структурных неоднородностей между собой.

Классификация С.И. Шермана взята за основу к ранжированию нарушений массива горных пород, которое представлено в СП 23.13330.2011 [152]. Для примера классификация структурных нарушений из указанного нормативного документа приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Классификация структурных нарушений в соответствии со СП 23.13330.2011

Ранг	Характер нарушения	Мощность зоны дробления	Протяженность нарушения
I	Разломы глубинные, сейсмогенные	Сотни и тысячи м	Сотни и тысячи км
II	Разломы глубинные, несейсмогенные	Десятки и сотни м	Десятки и сотни км
III	Разломы региональные	Метры и десятки м	Километры и десятки км
IV	Разломы локальные	Десятки и сотни см	Сотни и тысячи м
V	Крупные трещины	Свыше 20 мм	Свыше 10 м
VI	Средние трещины	10-20 мм	1-10 м
VII	Мелкие трещины	2-10 мм	0,1-1 м
VIII	Тонкие трещины	Менее 2 мм	Менее 0,1 м

Исследования второй половины XX века показали, что строение массива горных пород значительно сложнее, чем представлено в многочисленных классификациях. Важной особенностью иерархичности дискретного и блочного строения геологической среды является ее *самоподобие*.

Считается установленным, что размеры блоков не произвольны, а образуют некоторый дискретный ряд, в котором отношение размеров блоков  $n$ -ого порядка к размеру соседних блоков порядка  $(n+1)$  и  $(n-1)$  удовлетворяет универсальному принципу делимости при деструкции:

$$\frac{L_{(n+1)}}{L_n} = \frac{L_n}{L_{(n-1)}} = k, \quad (2.1)$$

где  $k$  – шаг иерархической делимости среды (среднее отношение линейных размеров блоков соседних иерархических уровней) или коэффициент вложения блоков.

Академиком М.А. Садовским на основании анализа большого количества природных объектов от размеров минеральных проб до размеров небесных объектов было показано, что шаг иерархической делимости близок к величине  $\sim 3-3,5$  [126, 153].

Опираясь на результаты исследований Садовского М.А. и Пиотровского В.В., Кочарян Г.Г. и Спивак А.А. [143] приводят соотношение, связывающее ранг иерархического уровня и минимальную протяженность нарушения (фактически линейный размер блока  $L_n$ ):

$$L_n = \begin{cases} (3 - 6) \cdot 10^{\left(\frac{n-11}{2}\right)}, & \text{для } n = (2k - 1), \\ (1 - 2) \cdot 10^{\left(\frac{n-10}{2}\right)}, & \text{для } n = 2k. \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $k$  – целое число, изменяющееся от 1 до 9,

$L_n$  – характерный размер блока порядка  $n$ , км.

Согласно соотношению (2.2), наибольший размер блока (при  $k=9$ ) составляет  $L_{18} = (10-20) \cdot 10^3$  км, что соответствует размерам литосферных плит, а минимальный размер блока (при  $n = 1$  и  $k = 1$ ) –  $L_1 = 3-6$  см.

Значения шага иерархической делимости близкого к трем приводят в своих работах Гольдин С.В. [142], Шемякин Е.И. [154-155]. Курленя М.В. и Опарин В.Н. связывают средние размеры геологического блока  $n$ -ого иерархического уровня с атомно-ионными радиусами и межъядерными расстояниями в молекулах основных породообразующих элементов с диаметром ядра Земли, обосновывая значения шага делимости близким к двум [156-157]. Значения коэффициента делимости на уровне 2-3 подтверждается также в исследованиях иерархичности энергетики землетрясений [158], а также характеристик в геологических и сейсмических циклах [159].

Положения М.А. Садовского о самоподобной иерархии и блоковой делимости литосферы Земли подтверждается и другими экспериментальными данными [160].

Математическим выражением самоподобия являются степенные законы. Законом такого вида описывается и распределение блоков и разломов по размерам, и распределение различных параметров разрывных нарушений, и распределение параметров сейсмического процесса.

На основании экспериментальных исследований в работах С.И. Шермана [161, 162] общий вид закона, описывающего разломно-блоковую делимость литосферы, имеет вид:

$$L_{\text{бл}} = A / N_{\text{бл}}^C, \quad (2.3)$$

где  $L_{\text{бл}}$  – размер разрывных или блоковых структур;

$N_{\text{бл}}$  – их количество;

$A$  – параметр, зависящий от размеров структур в выборке;

$C$  – коэффициент пропорциональности, определяемый физическими свойствами горных пород, скоростью деформирования среды и равный от 0,4 для разломов до 0,22 для блоков. Соотношение получено на основе анализа частных зависимостей  $L_{i \text{ бл}} = f(N_{i \text{ бл}})$ , представленных на рисунке 2.1.

В работах [163-165] приводятся степенные зависимости, связывающие длину разрыва, ширину разломной зоны и величину смещения по разрыву. Эти зависимости установлены для разрывных нарушений разных типов и в широком диапазоне масштабов и, более того, они справедливы не только для Земли, но и для других планет земной группы [166].

Для изучения разломно-блоковой делимости литосферы применяется фрактальный анализ, который позволяет математически описать явление самоподобия с помощью количественной характеристики – фрактальной размерности. Фрактальная размерность  $D$  – это величина, не зависящая от масштаба рассмотрения (измерения) и являющаяся показателем степени в степенном законе вида [167]:

$$N \sim r^{-D}, \quad (2.4)$$

где  $r$  – масштаб рассмотрения,

$N$  – количество уменьшенных копий, необходимое для заполнения исходного объекта.

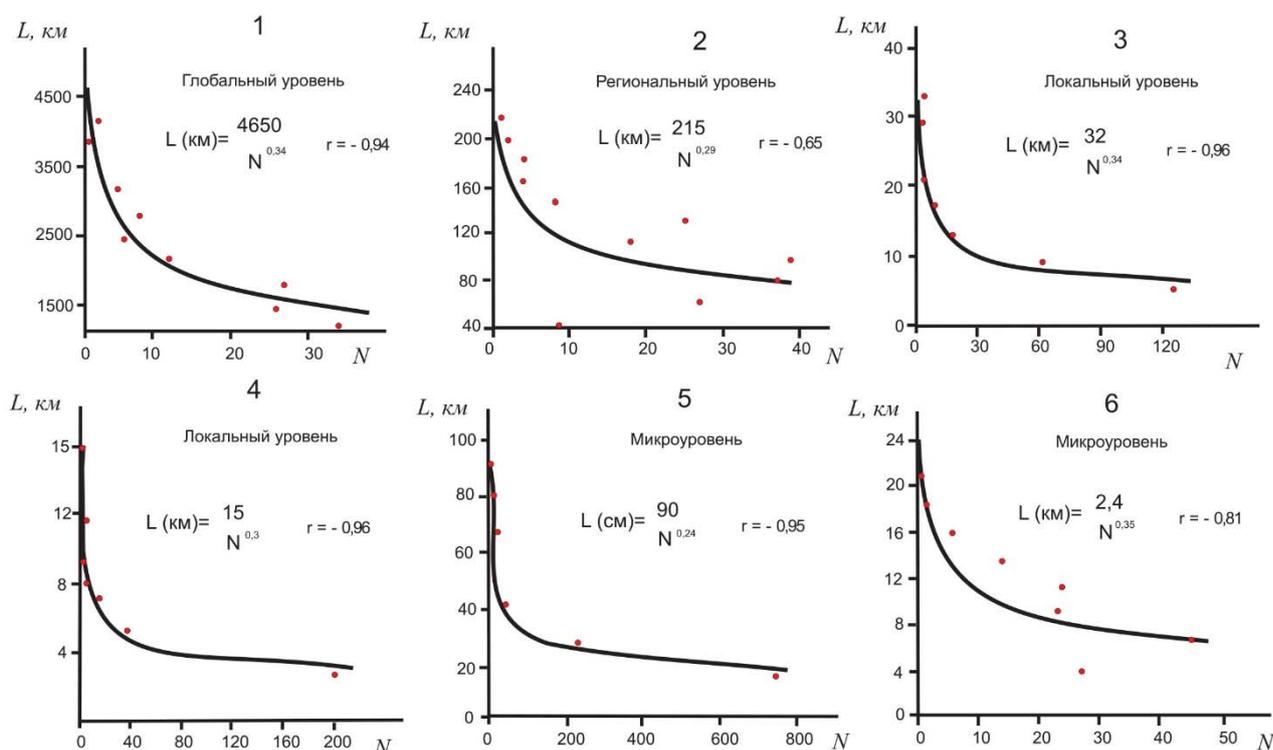


Рисунок 2.1 – Соотношения поперечных размеров  $L_{бл}$  разноранговых блоков и их количества  $N_{бл}$  [162]

Фрактальная размерность представляет собой меру самоподобия рассматриваемой иерархической совокупности и степень сложности структуры. Захаров В.С. в диссертационной работе [167] со ссылкой на [168] приводит пример самоподобной сети разломов (рисунок 2.2) и определения ее фрактальной размерности (рисунок 2.3). Точки, полученные на различных масштабах рассмотрения, ложатся на одну общую прямую, соответствующую однородному степенному закону с показателем  $D = 1,8$ . Это означает, что процесс (в данном случае – разрушение) идет одинаковым образом и не зависит от размеров объекта [167].

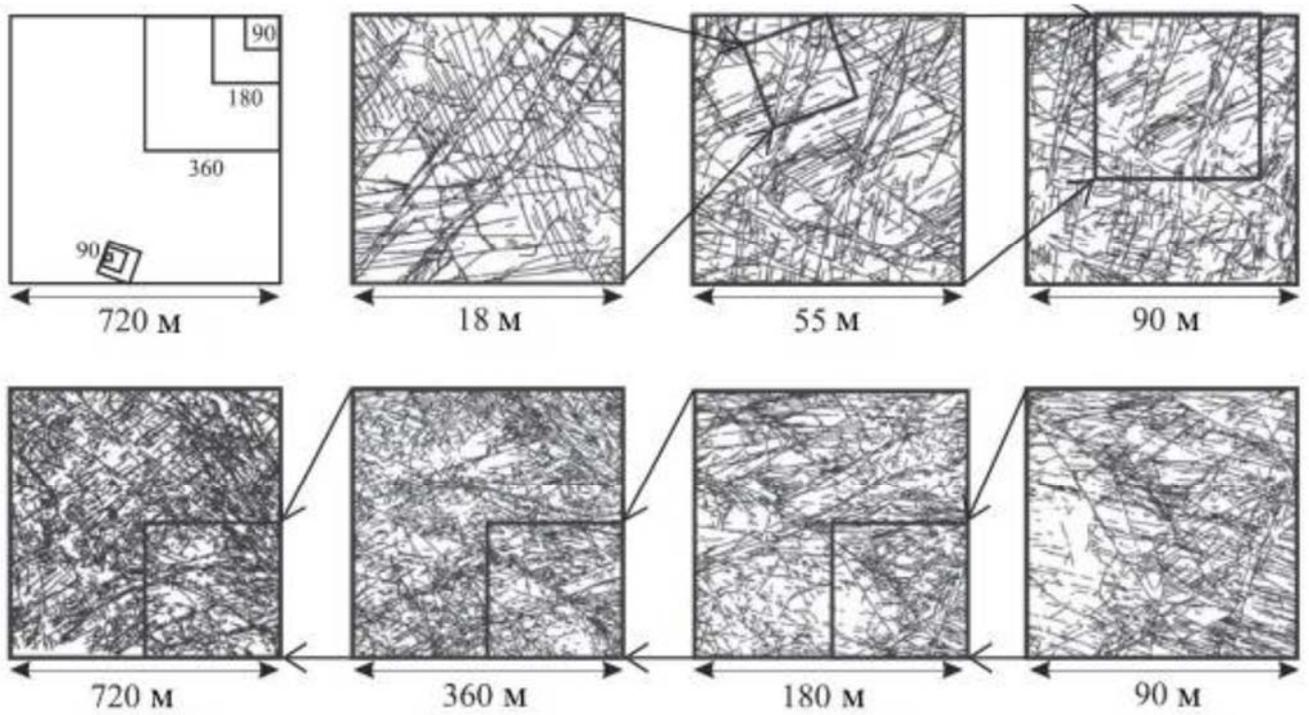


Рисунок 2.2 – Пример самоподобия разломной сети [167]

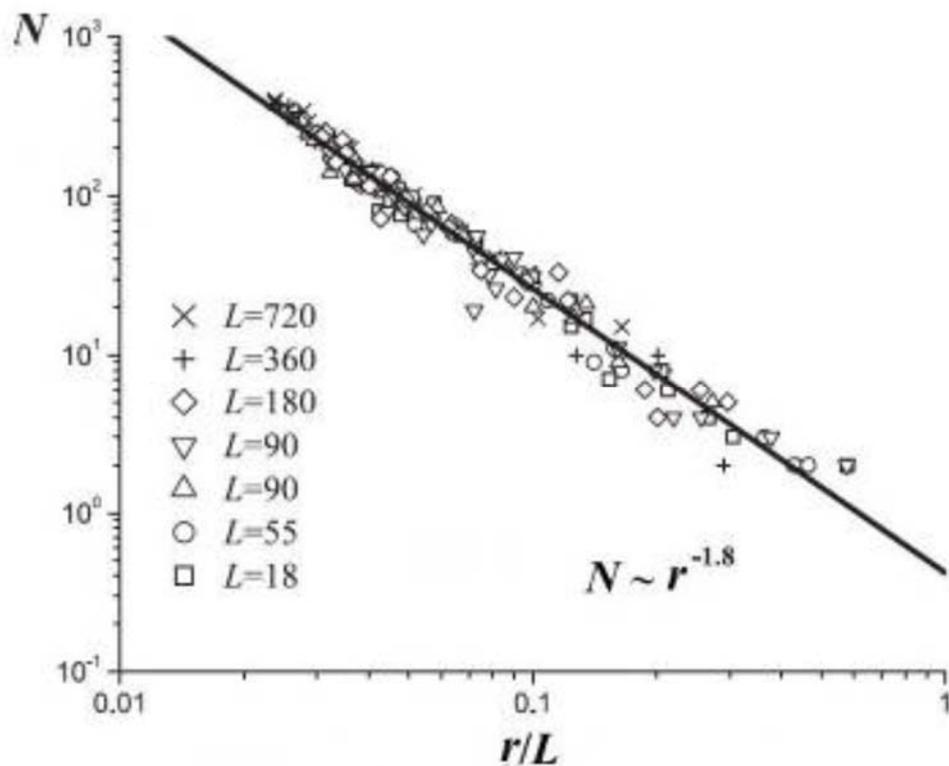


Рисунок 2.3 – Вычисление фрактальной размерности разломной сети, представленной на рисунке 2.2 [167]

Оценки фрактальной размерности массива горных пород на других пространственно-временных масштабах, а также по данным физического

моделирования показали, что в большинстве случаев она находится в диапазоне  $D$ , равном 1,1 – 1,9 [167-170].

Проявления блоковой структуры литосферы и коры на разных масштабных уровнях выявляются на основании анализа данных временных рядов GPS [167, 171-174]. Показано, что данные GPS можно использовать не только для определения движения плит и микроплит, но и для определения и выявления небольших подвижных блоков, отражающих внутреннюю, дифференцированную кинематику более мелких структурных элементов [172, 173].

Сейсмические процессы, протекающие в иерархически блочной самоподобной среде, также имеют ярко выраженные самоподобные свойства: законы Гутенберга-Рихтера (распределения землетрясений по магнитудам) и Омори (распределения количества афтершоков сильных землетрясений во времени) [175, 176]. Самоподобные свойства сейсмотектонического процесса проявляются также в динамических характеристиках порождаемых им временных рядов [167].

В результате развития деформационных процессов под воздействием геодинамических движений в блочно-иерархической среде массива горных пород возникает напряженное состояние, имеющее сложную структуру, анизотропию, неоднородность и изменчивость во времени. То есть для напряженно-деформированного состояния земной коры характерен масштабный эффект, выраженный в иерархии блоков и структур и иерархии полей тектонических напряжений. Основываясь только на таком представлении геомеханической модели массива, выбрать безопасную и устойчивую площадку для размещения объекта недропользования довольно сложно. При выборе любого масштаба при коэффициенте иерархичности порядка 2-3 в среде всегда будут иметь место структурные неоднородности сравнимого с этим масштабом иерархического уровня [118, с.122].

Однако многочисленными экспериментальными и аналитическими исследованиями показано, что иерархически блочное строение и фрактальные свойства, являющиеся неотъемлемыми признаками открытых динамических

систем, присущи не только массиву горных пород, а всем без исключения твердым и сыпучим телам и средам, но не как изначально заданные, а как следствие процессов самоорганизации под воздействием внешних механических нагрузок [160]. В ходе этих процессов размер активного структурного элемента может изменяться: происходят консолидация и распад структур разного ранга в соответствии с динамикой деформирования. Такие вновь образованные структурные элементы, именуемые диссипативными, определяют внутренний и внешний энергообмен в геологической среде и режим динамического равновесия. Наличие структуры позволяет среде удерживать равновесие в широких диапазонах изменений параметров внешних возмущений [177].

Таким образом, выход из тупиковой ситуации в выборе благоприятной площадки размещения объектов недропользования, обусловленной деструкцией массива горных пород на иерархически блочную среду, обеспечивает способность этой среды в условиях постоянной геодинамической подвижности к самоорганизации и формированию консолидированных блоков, ведущих себя как относительно целостная система, не нарушенная активными подвижками тектонических структур и включающая в себя исходные генетические блоки.

### **2.1.2 Процессы самоорганизации в массиве горных пород**

Уже в начале XX века величайший мыслитель В.И. Вернадский писал Земле, как о сложной открытой единой динамической системе. До XX века классическая наука базировалась на линейном редуccionистском подходе Аристотеля, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, присущих более простым явлениям, то есть свойства системы являются непосредственным следствием свойств отдельных ее элементов. В этом принципе суперпозиции выражается линейность системы. Мир с точки зрения линейности логично построен, во многом предсказуем, доступен интуитивному пониманию. Линейные системы описываются простыми линейными уравнениями.

Противоположного подхода придерживался Гераклит, утверждавший, что Вселенная находится в постоянном движении и если целое, разобрать на части, то собрать его обратно воедино без потерь невозможно. И реальный мир является нелинейным. В нем всё непрерывно изменяется, и идеальные формы евклидовой геометрии являются скорее исключениями, а не нормой. В основе исследования нелинейных явлений лежит понятие сложной системы как системы, состоящей из множества взаимодействующих составляющих(подсистем), вследствие чего она приобретает новые свойства, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня. То есть в сложной системе не выполняется принцип аддитивности, а имеет место синергетический эффект, и к ней не применим системный анализ.

Под открытой системой принято понимать систему, способную обмениваться с окружающим пространством (надсистемами и соседними системами) веществом, энергией и информацией.

Все сложные открытые системы различной природы являются гомеостатическими. Принцип гомеостаза или динамического равновесия выражается принципом Ле Шаталье, согласно которому всякая неравновесная система стремится измениться таким образом, чтобы свести к минимуму эффект внешнего воздействия, вследствие чего формируется структура или область, в пределах которой система стремится поддерживать устойчивое равновесие. Под влиянием воздействия внешней среды в системе динамического равновесия возникают изменения, в ходе которых образуются структуры, из которых более благоприятные для системы сохраняются, а менее благоприятные устраняются отбором, т.е. идет процесс самоорганизации. При этом в открытых неравновесных системах сохранение собственной структуры осуществляется за счет рассеяния – диссипации вещества и энергии. Таким образом, самоорганизующиеся структуры являются диссипативными. Поэтому во всех открытых системах имеют место процессы самоорганизации и диссипации, а самоорганизация выступает как фактор развития системы [118, с.24].

Самоорганизация возникает при наличии иерархической структуры. Самоорганизация – процесс упорядочения (пространственного, временного или пространственно-временного) в открытой системе, за счёт согласованного взаимодействия множества элементов её составляющих. Этот процесс происходит быстрее при наличии в системе внешних и внутренних источников энергии. Самоорганизация – результат синтеза хаоса и порядка. В самоорганизующейся системе они не исключают, а, наоборот, порождают и дополняют друг друга – от порядка через хаос к новому порядку. При этом рождение порядка из хаоса и хаоса из порядка обуславливается не внешней средой, а внутренней природой диссипативной системы, действующими в ней механизмами [178].

Синергетика, которая изучает явление самоорганизации в открытых системах (живых, неживых, общественных), далеких от термодинамического равновесия, пытается охватить все этапы этого универсального процесса как процесса эволюции порядка – его возникновения, развития, самоусложнения и разрушения, т.е. весь цикл развития системы в аспекте её структурного упорядочения.

Явления самоорганизации известны достаточно давно, но изучались в основном на образцах в лабораторных масштабах. Исследования проводились в основном применительно к жидким и сыпучим средам [179, 180]. Исследования диссипативного структурирования деформируемых твердых тел выполнялись в рамках методов физической мезомеханики, введенных акад. В.Е. Паниным и его школой [181].

Представления о горных массивах как открытых самоорганизующихся системах сформировались в работах Садовского М.А., Родионова В.Н и было продолжено в трудах Адушкина В.В., Спивака А.А., Кочаряна Г.Г., Козырева А.А. и др. [182-186].

Явления самоорганизации изучались применительно к природно-техническим системам, которые все являются открытыми, и где всегда имеет место внешнее воздействие, которое в значительной мере определяет процессы самоорганизации в эволюционирующей среде.

Самоорганизация геологической среды проявляется в образовании в приконтурных зонах подземных и открытых горных выработок нарушенных пород, мощность которых определяется свойствами и состоянием массива пород. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок, получившее статус геомеханического открытия [187], описано в трудах Е.И. Шемякина, М.В. Курлени, В.Н. Опарина и др. и заключается в образовании кольцевых чередующихся зон ненарушенных и разрушенных пород при проходке подземных выработок, когда напряжения в массиве горных пород становятся соизмеримы с пределом прочности пород на одноосное сжатие либо превышают его.

Особенности поведения геологической среды в горных массивах, находящихся под сильным техногенным влиянием, выявляются в геофизических полях. В натурных условиях проводились в основном геофизические исследования при взрывных и вибрационных воздействиях [188-190]. Техногенная сейсмичность является отражением процессов самоорганизации геологической среды вследствие эволюции ее напряженно-деформированного состояния в природно-технических системах, в то время как природная сейсмичность связана с эволюционными процессами в земной коре. Эволюция любого фрагмента природной и природно-технической системы сопровождается рядом больших и малых катастроф, а каждая катастрофа является следствием разрушения старых структур и возникновения новых. [191, с.11].

Процессы самоорганизации также находят отражение в параметрах деформирования геологической среды, определяемого по результатам геодезических измерений [177, 190, 191, 192]. Многолетними геодезическими наблюдениями в природно-техногенной системе «Хибины» выявлен аномальный характер деформирования массива горных пород в Саамском разломе и его окрестностях (рисунок 2.4) [194]. С позиции геодинамики он интерпретируется как следствие самоорганизации геологической среды в результате совместного взаимодействия природных и техногенных факторов, которые обусловили подъем

материала-заполнителя разлома за счет снятия вертикальной нагрузки при обработке месторождения в районе разлома [118, с.114; 192].

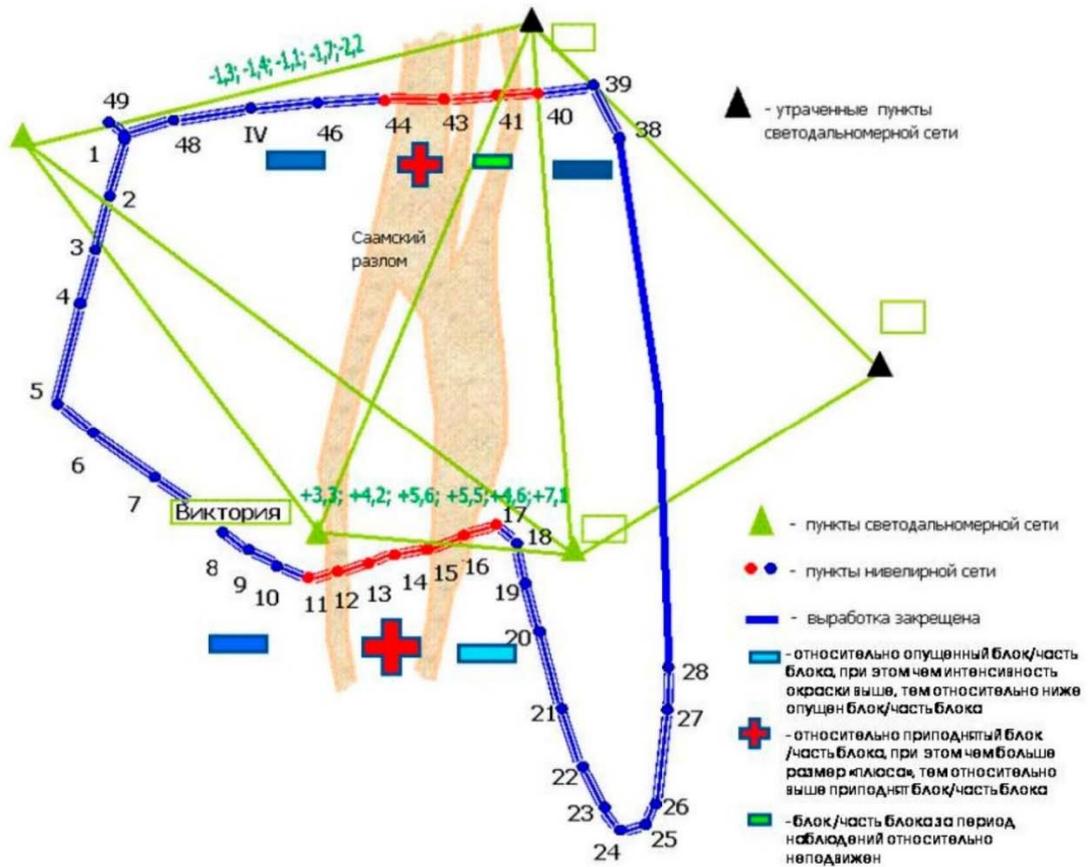
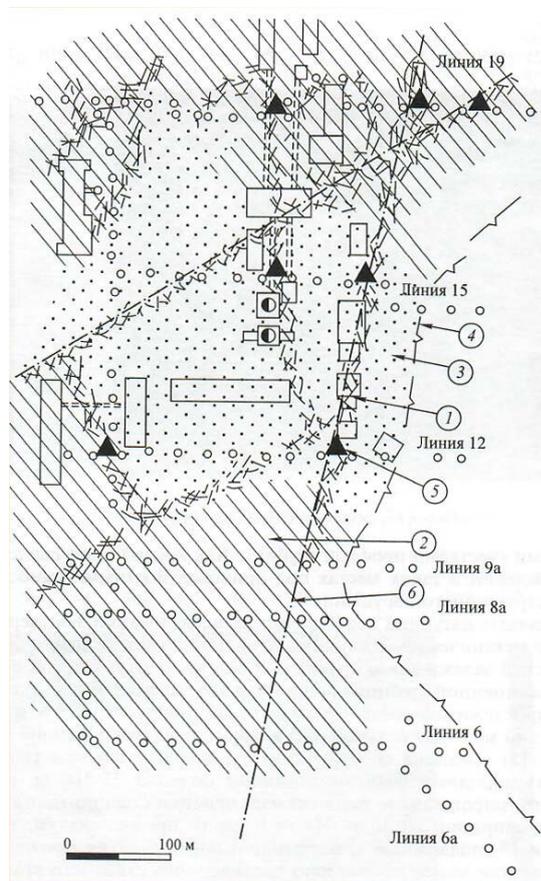


Рисунок 2.4 – Характер дифференциации относительных смещений в пределах сети наблюдений на гор. +252 м Кировского рудника ОАО "Апатит" [192]

Изучению диссипативного структурирования скального массива на крупномасштабных пространственно-временных уровнях при энергетическом воздействии техногенного поля статических напряжений, формирующегося вокруг подземных выработок, выработанных пространств и зон обрушения в процессе ведения горных работ посвящена диссертационная работа Балека А. Е. [193,194]. На основании результатов геодезических мониторинговых наблюдений за деформациями горных пород на различных пространственно-временных базах, проводимых автором в течение более 20 лет на подземных рудниках Уральского региона, обнаружено явление дискретизации деформационного поля скального массива, что подтверждено геофизическим зондированием породной толщи.

Явление заключается в формировании не известных ранее временно стабильных структур деформируемого массива: пространственно-протяженных зон концентрации деформаций, разделяющих его на области (объемы), в которых массив может рассматриваться как сплошная среда. Автором установлено, что ширина формирующегося участка со свойствами сплошной среды составляет от  $1/3$  до  $1$  ширины целикового участка рудной залежи, отработка которого обуславливает возникновение в прилегающем массиве области с массовой сменой направления разворота углов  $\alpha$  главных осей тензора первоначальных напряжений, а границы (зоны концентрации деформаций) совпадают с наиболее крупными геологическими нарушениями в пределах данной области (рисунок 2.5).



1 – сильнотрещиноватые и подвижные участки массива, в том числе оперяющие тектонические нарушения, 2 – слаботрещиноватые и менее подвижные участки, 3 – консолидированные породные объемы, 4 – граница зоны разрывных трещин, 5 – реперные интервалы с устойчивой многолетней концентрацией горизонтальных деформаций, 6 – тектонические нарушения.

Рисунок 2.5 – Районирование поверхности промплощадки шахты «Северопесчанская» по степени подвижности структурных элементов горного массива [193]

Нелинейные механизмы легли в основу объяснения явления суперинтенсивных деформаций в зонах разломов [2-6], когда малые воздействия приводят к аномально большим откликам среды на них. Парадоксы «больших» и «малых» скоростей и эмпирически выявленные характеристики пространственно-временной миграции суперинтенсивных деформаций в разломных зонах, трактуемые как автоволновые процессы, также относятся к явлениям, которые изучаются в теории самоорганизации открытых, нелинейно функционирующих систем [195-197].

## **2.2 Критерии выбора самоорганизовавшихся геологических структур как участков безопасного размещения объектов**

Свидетельства, представленные в предыдущих разделах, показывают, что литосфера не является системой один раз сформировавшихся и по-разному напряженных иерархических блочных структур, а представляет собой самоорганизующуюся среду, находящуюся в постоянном процессе деформирования, дезинтеграции и повторной консолидации. Перестройка структуры и адаптация деформационных полей к новому временно устойчивому состоянию происходит на различных масштабных уровнях.

Для описания динамических процессов разломно-блоковой структуры литосферы используются модели, в основе которых лежат колебательные системы с нелинейными законами сухого трения. Анализ этих моделей приводится в работе Захарова В.С. [167], где он, обобщая опыт предшественников, предлагает модель взаимодействия разномасштабных блоков в литосфере, которая наиболее полно отражает сложность процессов, происходящих в литосфере.

Согласно этой модели (рисунок 2.6) под действием внешних и внутренних сил крупные блоки взаимодействуют друг с другом по разнотипным подвижным зонам, глубина проникновения которых определяется реологической расслоенностью литосферы и коры и которые, как и блоки, не являются

однородными. Поскольку блоки обладают собственной иерархической структурой, то образующие их блоки меньшего масштабного уровня также находятся во взаимодействии. Эти дифференциальные движения и фиксируются геодезическими и геологическими методами. Взаимодействие блоков по границам проявляется также в сейсмической активности, для объяснения особенностей которой используются модели с нелинейным трением (модели движения сцепленных блоков по разлому, модели движения вращающихся дисков).

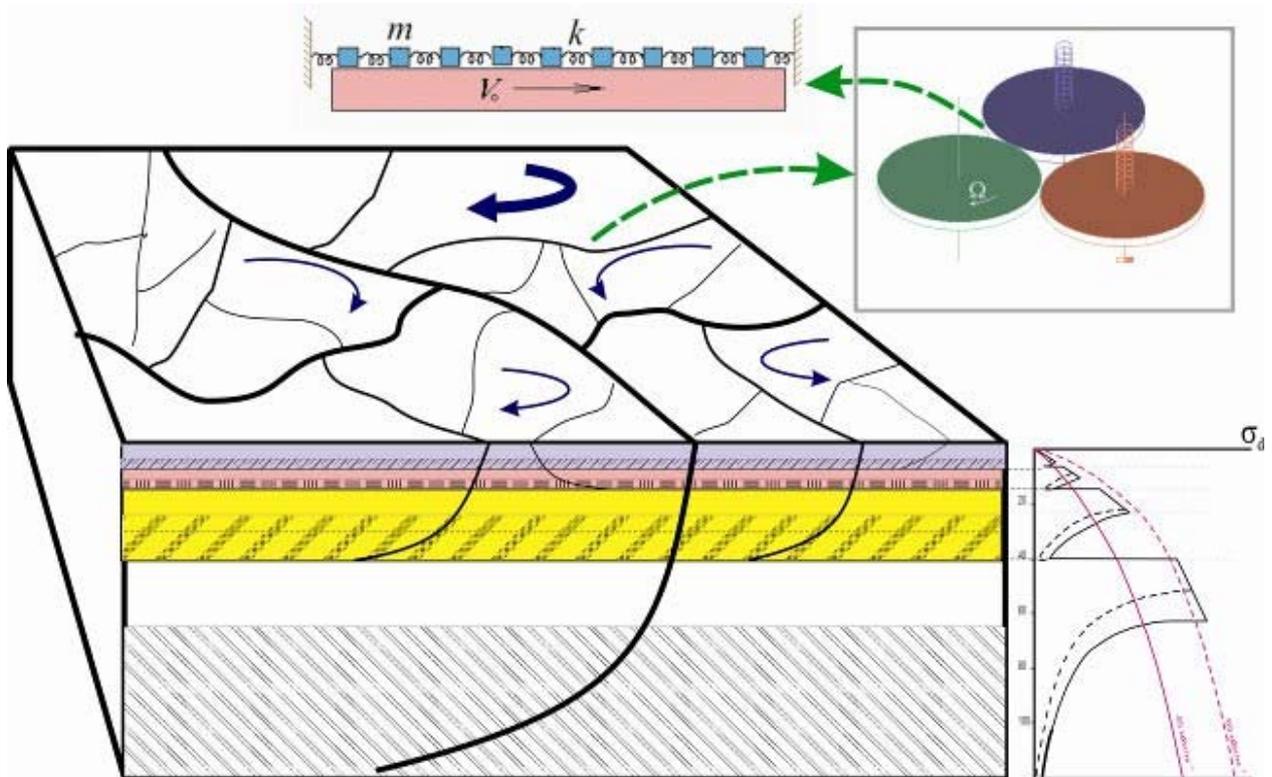


Рисунок 2.6 – Модель взаимодействия разномасштабных блоков литосферы (по Захарову В.С. [167])

В соответствии с количеством проявленных ослабленных слоев в литосфере выделяется уровни ее деструкции. Обычно это 2-3 уровня [162, 198]. При проявлении большего количества ослабленных слоев увеличивается и степень иерархии. При изменении внешних воздействий расслоение может меняться, а, следовательно, и блоки могут либо объединяться в консолидированные блочные структуры, реагирующие согласованно на эти воздействия, либо распадаться на более мелкие блоки. То есть активность разломных зон с течением времени может меняться.

Как отмечает Захаров В.С., такая система взаимодействия блоков моделирует нелинейное поведение гранулированной среды – совокупности большого числа дискретных твердых частиц, пространство между которыми заполнено другим веществом, с допустимыми поступательными и вращательными относительными перемещениями, при непрерывном постоянном поступлении энергии [167]. В таких средах могут наблюдаться и дифференциальные движения отдельных элементов, и согласованное движение временно возникающих и распадающихся их объединений. Важной особенностью их движений и деформаций являются внезапные всплески и колебания в пространстве и во времени.

Такие особенности проявления геодинамических движений, как неравномерный характер их распространения по тектоническому нарушению, несоответствие параметров движений рангу нарушения, находятся в соответствии с изложенными представлениями о динамических процессах разломно-блоковой структуры литосферы.

Примеры экспериментальных исследований, в которых фиксируются высокие градиенты смещений и деформаций на границах самоорганизовавшихся структур различного масштаба, представлены в литературе. Разница смещений на границе блоков и в их внутренних частях может различаться в несколько раз, а в некоторых случаях, при проявлении аномальных суперинтенсивных деформаций, на 1,5-2,0 порядка [4, 193, 199]. Характер смещений и деформаций также может быть разным. Это могут быть повышенные деформации, вызванные трендовыми подвижками [199], а могут быть движения колебательного характера с разными амплитудами и периодами в зависимости от пространственно-временного разрешения измерительной системы [12, 13, 190]. Так в работе [190] на Таштагольском месторождении установлено наличие короткопериодных смещений на границах блоков, зафиксированных не только на земной поверхности, но и в горных выработках в течение непрерывных многочасовых геодезических измерений. Подобные результаты геодезических наблюдений на геодинамических полигонах рудников ОАО «Апатит» представлены в работе [118, с.70]. Наличие знакопеременных смещений на активных структурах отмечается в работе [177],

посвященной исследованиям дифференциальных движений блоков в ходе сейсмозрывных воздействий, позволяющих подобным образом интенсифицировать деформационные процессы для тщательного их изучения.

Таким образом, самоорганизовавшийся консолидированный породный блок можно определить, как относительно стабильную пространственно-временную структуру (участок земной коры), сформированную в геологической среде в ходе процессов самоорганизации блоками более мелких масштабных иерархий, не нарушенную внутри активными подвижками этих блоков, то есть приближенную по свойствам к сплошной среде. Границы такой образовавшейся структуры могут быть представлены разноранговыми тектоническими нарушениями. Деформации, обусловленные современными геодинамическими движениями, и локализующиеся на границах консолидированного блока, повышены и превышают в несколько раз таковые в его внутренних областях. В массиве горных пород, представленном такими блоками, основная часть смещений и деформаций выражается межблочными подвижками между консолидированными блоками, а меньшая часть происходит в виде внутривблочных смещений и деформаций. Таким образом, объекты, расположенные в пограничных зонах консолидированных блоков, испытывают воздействие повышенных деформаций, а во внутренних зонах – пониженных. *В связи с этим консолидированные блоки могут являться местами безопасного размещения объектов недропользования.*

*Выявление консолидированного блока должно происходить в рамках конкретной решаемой задачи и в соответствующих пространственно-временных масштабах. Для выбора площадок под особо ответственные объекты, такие как АЭС, нормативными документами регламентировано исследование территорий на трех пространственных уровнях в радиусе 100-150 километров. Следовательно, масштабы выделяемых консолидированных структур будут соответствовать размерам альтернативных пунктов 10 × 15 км и площадок размещения 3 × 3 км (раздел 1.4).*

Для детальной временной оценки вариаций активности разломов и тектонических нарушений существует только три группы методов: геодезические,

сейсмологические, вулканологические [162, с.332]. В рамках понятия «современный активный разлом» необходимо рассматривать процессы, которые происходят в настоящее реальное время (месяцы, годы, первые десятилетия) или происходили не более чем в предшествовавший столетний период. Поэтому геодезическими методами кроме мониторинговых наблюдений в течение трехлетнего периода, которые регламентируются нормативными документами [112], необходимо определять параметры трендовых движений за многолетний период, что на практике реализуется путем переопределения координат пунктов Государственной геодезической сети (ГГС) за время, прошедшее с момента их оборудования. В связи с тем, что на активных разломах и нарушениях, фиксируются короткопериодные знакопеременные смещения вплоть до внутрисуточного масштаба (раздел 1.2), то определение вариационной составляющей движений также значимо при оценке активности структурных нарушений для выделения границ консолидированного блока.

*В связи с тем, что породные структуры более мелких масштабных иерархий, формирующие консолидированный блок, реагируют на внешнее силовое воздействие как единое целое, то одним из критериев определения такого блока является согласованное движение геодезических пунктов, расположенных в пределах этой структуры.* В научной литературе представлены различные методы выделения блоковых структур по данному критерию на основе анализа параметров скоростей и направлений движения пунктов, а также деформационного анализа по данным наземных и спутниковых наблюдений [171, 172, 200-206]. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны, а также диапазон применимости. Для исключения неоднозначности в интерпретации данных при выделении блоковых структур необходима подробная информация геологического и тектонического характера и достаточная плотность покрытия территории геодезическими пунктами. Кроме того, следует учитывать временные масштабы проявления современных геодинамических движений.

Геодинамическое районирование исследуемой территории с целью выделения самоорганизовавшихся структур предлагается проводить по фактору

вариативности напряженно-деформированного состояния, определяемого по результатам измерения геодинамических движений на различных масштабных уровнях (район – пункт – площадка) и временных интервалах (от трендовых движений пунктов за десятки лет до вариационных, полученных в течение непрерывных суточных измерений за смещениями реперных интервалов). Путем совместного рассмотрения деформационных полей разного пространственно-временного уровня с привлечением геологической, геоморфологической, тектонической, сейсмической информации выделяются самоорганизовавшиеся консолидированные геологические структуры (блоки) различных размеров. При таком подходе важным является знание возможного диапазона изменения модуля скорости горизонтальных деформаций для разных пространственно-временных баз с целью выделения границ блоков, где наблюдаются повышенные его значения.

Таким образом, в условиях нелинейной иерархически блочной среды с происходящими в ней процессами самоорганизации оценка параметров деформаций и напряжений невозможна в отрыве от соответствующих пространственно-временных масштабов. Исследованиям по выявлению закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием современных геодинамических воздействий на пространственно-временных уровнях, значимых для выявления консолидированных блоков, посвящена следующая глава работы.

### **2.3 Выводы**

К настоящему времени сведения, накопленные современной наукой, свидетельствуют о двух важнейших свойствах эволюции геологической среды, которые сформулированы академиком С.В. Гольдиным: все доступное изучению вещество внутренних областей Земли образует иерархически блочную структуру; перемещения вещества происходят на любых пространственных и временных масштабах. Эти фундаментальные свойства позволяют рассматривать земную кору

как открытую динамическую систему, в которой под воздействием внешних и внутренних источников энергии развиваются процессы самоорганизации.

Таким образом, в массиве горных пород, как части земной коры, находящейся в сфере инженерного воздействия, происходит движение блоковых структур в широком пространственно-временном спектре. Движение блоков порождает напряженно-деформированное состояние, которое в свою очередь, динамично и иерархично в соответствии с иерархией блочных структур. Процессы самоорганизации приводят к явлению консолидации блоков – образованию относительно стабильных пространственно-временных структур, которые могут являться местами безопасного размещения объектов недропользования.

На границах самоорганизовавшихся блоков наблюдается концентрация параметров современных геодинамических движений, что подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями. Опасность для объектов недропользования представляют граничные зоны между самоорганизовавшимися блоками, где деформации могут в несколько раз, а в некоторых случаях на 1,5-2,0 порядка, превышать их внутриблочные значения.

Критерии выбора консолидированных блоков должны определяться конкретными пространственно-временными рамками решаемой задачи, а также учитывать пространственно-временные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния, формируемого современными трендовыми и вариационными короткопериодными составляющими геодинамических движений, исследованию которых посвящена третья глава работы.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Как отмечалось в предыдущих главах работы, современные геодинамические движения обладают пространственно-временной изменчивостью: от выбора параметров системы измерений зависит объективность определения их деформационных параметров. Эта особенность должна учитываться при выборе консолидированных структурных блоков как мест безопасного размещения ответственных объектов. Поэтому данная глава работы посвящена исследованию распределения деформационных параметров движений на таких пространственно-временных интервалах, которые являются значимыми при выборе площадок, а выявленные зависимости могут являться основанием для разработки критериев и методик геодинамической оценки территорий.

#### 3.1 Основные параметры современных геодинамических движений

Согласно определению понятия «современная геодинамика», сформулированному в работах [2, 4-6] измеряемыми величинами в геодинамике являются горизонтальные и вертикальные движения. А напряжения и деформации определяются вычислительными методами. Таким образом, движения в современной геодинамике являются одновременно и объектом наблюдения, и объектом интерпретации [2].

Основными кинематическими параметрами геодинамических движений являются *смещения*, которые характеризуются *скоростью* и направленностью (*векторы смещений*). Однонаправленность векторов смещений является одним из критериев выделения консолидированной самоорганизовавшейся структуры.

Учитывая факт того, что современные геодинамические движения цикличны на всех временных уровнях, к комплексу основных параметров следует отнести *амплитуду* выявленных циклов, выражаемую в миллиметрах, *частоту* или

продолжительность циклов (период), определяемую соответственно в герцах или в единицах времени. Сопоставление выделяемых периодичностей во временных рядах с различными природными процессами и явлениями помогает понять природу геодинамического состояния недр, которое определяется совокупностью природных (эндогенных и экзогенных) и техногенных воздействий.

Важным параметром геодинамических движений являются также *деформации* земной поверхности и массива горных пород, определяемые как отношение изменения длины измеряемой дистанции на поверхности за определенный интервал времени к длине этой дистанции. Именно деформации, происходящие в основаниях объектов недропользования, определяют основу их безопасности.

Пространственно-временные особенности современных геодинамических движений описывает такой параметр как *скорость деформации*, который в нормативных документах фигурирует под термином *градиента скорости тектонических движений* и определяется как отношение амплитуды тектонического перемещения маркирующей поверхности в геодинамической зоне к ширине зоны и времени последней активизации, в год [111, 112]. Данный параметр выступает критерием геодинамической оценки территории при выборе площадок размещения ответственных объектов недропользования.

### **3.2 Пространственно-временные масштабы и задачи исследования**

При выборе площадок под размещение АЭС, ГЭС, объектов захоронения радиоактивных отходов согласно нормативным документам [112,113] исследования современных геодинамических движений необходимо проводить на трех масштабных уровнях в течение не менее трех лет. Согласно действующему нормативному документу 1984 года [112] рекомендовано 5-8 циклов наблюдений за этот период.

В связи с тем, что определяемые параметры геодинамических движений зависят не только от пространственных, но и от временных масштабов наблюдений

и при большой частоте опроса, доступной современным средствам измерений, могут достигать потенциально опасных для сооружений значений, то их учет представляется важным моментом. То есть в исследованиях необходимо учитывать, как трендовую составляющую геодинамических движений, так и вариационную с внутрисуточной частотой опроса.

Трендовые движения теоретически можно определять на любом пространственном уровне по имеющимся реперам и пунктам ГГС – от 100-150 км (район исследования) до 3-5 км (площадка исследования). Однако в практике инженерных изысканий в пределах района исследования трендовые движения не определяются. Как правило, оценка района проводится по фондовым данным и касается только вертикальных движений. Использование же спутниковых технологий позволяет определить горизонтальные трендовые движения пунктов Государственной геодезической сети, равномерно покрывающих территорию района исследования, исходные координаты которых были получены при их оборудовании 30–60 лет.

Выявление вариационных короткопериодных движений в течение многочасовых сеансов непрерывных измерений целесообразно проводить на масштабном уровне 3-5 км (размер площадки размещения объектов). На таких пространственных базах короткопериодные движения выявляются с хорошей точностью (раздел 3.3.3), и именно они позволяют оценить изменчивость естественного напряженно-деформированного состояния, которая, как отмечено в разделе 1.2, влияет на объекты прямым образом или опосредованно, способствуя развитию усталостных эффектов в конструкциях, а также тиксотропных явлений в массиве горных пород.

Таким образом, для выделения границ консолидированных блочных структур, как мест безопасного размещения объектов, необходима оценка параметров двух составляющих геодинамических движений – трендовой составляющей с частотой опроса от 10 лет и более (в рамках данного определения в разделе 1.2) и вариационной составляющей в виде короткопериодных движений на базах, регламентируемых нормативными документами при выборе площадок

АЭС. Следует отметить, что оценка параметров этих двух составляющих осуществляется в короткие сроки, без мониторинговых наблюдений.

Для оценки степени интенсивности выявляемых деформаций земной поверхности на этих двух временных уровнях важно знать максимальные значения модуля скорости деформаций на различных пространственных базах. Они могут являться критерием оценки определяемых деформаций при выборе мест безопасного размещения объекта. Поэтому *первая задача*, решаемая в рамках данной работы, заключается в *определении максимальных значений модуля скорости горизонтальных деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений для разных пространственных баз* (раздел 3.5).

В научных публикациях встречаются исследования по выявлению зависимости модуля скорости деформаций от длин реперных интервалов [115]. Однако они не охватывают ни короткопериодных движений на малых временных интервалах суточного масштаба, ни трендовых движений, сопоставимых со сроком службы объектов (30-50 лет). Таким образом, наши исследования дополняют уже существующие и ориентированы на пространственно-временные масштабы, значимые с точки зрения выбора безопасных площадок размещения объектов.

При определении границ консолидированного блока необходимо сопоставление и анализ деформационных полей, формируемых трендовой и вариационной короткопериодной составляющими. Поэтому еще одной задачей данной работы стала *разработка метода определения изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием короткопериодных движений* (раздел 3.3.4).

Для выявления возможных взаимосвязей между деформационными параметрами трендовых и короткопериодных движений интерес представляет *сравнение их на одинаковых пространственных базах до 6 километров, т.е. в пределах площадок размещения объектов*. Решение этой задачи излагается в разделе 3.6.

### 3.3 Методы определения параметров современных геодинамических движений

#### 3.3.1 Пространственно-временная чувствительность средств измерения к выявлению геодинамических движений

Для фиксирования деформаций геологической среды, происходящих в широком временном (от сейсмического до геологического) и пространственном (локальном, региональном, глобальном) диапазонах под действием комплекса эндогенных, экзогенных и техногенных факторов используются методы наземной и спутниковой геодезии, включая радиоинтерферометрические, деформометрические, а также геоморфологические методы. Перечисленные системы регистрации имеют разную чувствительность, то есть способность к выявлению сигнала определенной амплитуды. Как показывает опыт, чем чувствительнее метод, тем меньше по значению амплитуда выделяемого сигнала, что является одним из постулатов теории измерений (рисунки 1.4, 1.6). Таким образом, определяемые параметры движений зависят от пространственно-временных особенностей систем наблюдений, а также способов измерений и методов их обработки.

На рисунке 3.1 показана чувствительность различных методов к определению скоростей деформаций на разных временных масштабах. Пороговые значения чувствительности методов спутниковой геодезии (GPS, зеленая линия) и радарной интерферометрии (InSAR, синяя линия) основываются на их разрешающей способности в определении смещений на уровне 2 мм и 2 см соответственно. Разрешающая способность деформометрических методов (красная линия на рисунке) для скоростей деформаций составляет  $10^{-6}$  в год на временных масштабах «дни-недели» и снижается до  $10^{-5}$  в год при переходе на внутрисуточный диапазон и периоды свыше одного месяца. Чувствительность GPS-методов на временных интервалах, превышающих несколько месяцев, оказывается выше чувствительности деформометров. Применение специальных методик обработки

спутниковых измерений позволяет использовать эти методы в сейсмологии (пунктирная зеленая линия на рисунке), когда регистрируются движения с частотами 20 Гц и более [64].

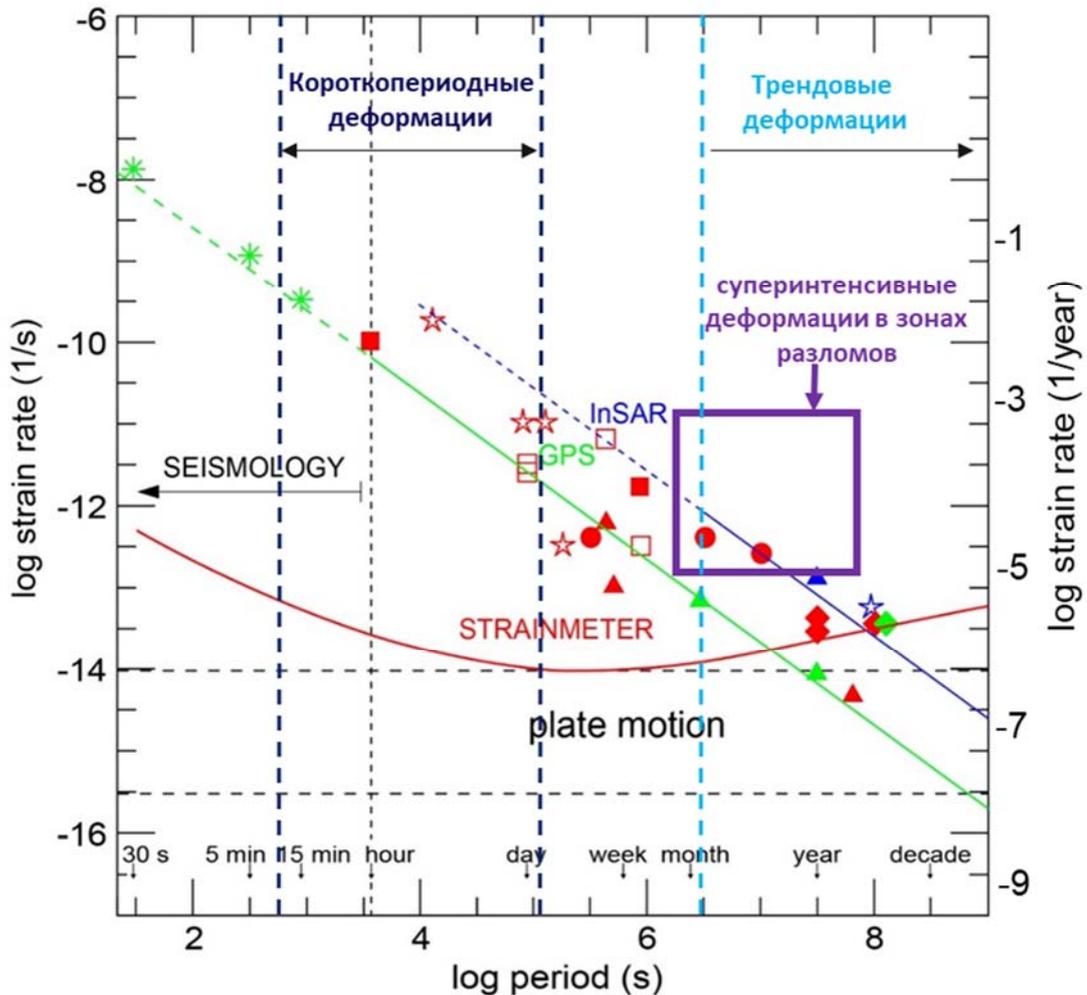


Рисунок 3.1 – Чувствительность разных методов к определению скоростей деформаций, обусловленных геодинамическими движениями. По [64], с изменениями

Трендовые (или криповые) скорости деформаций по границам тектонических плит, структурных блоков находятся на уровне  $10^{-8}$  –  $10^{-6}$  в год и фиксируются спутниковыми методами на временном масштабе «месяцы-годы-десятилетия», а также с помощью деформометрических методов во временном интервале – «дни-недели». Деформации со скоростями выше  $10^{-6}$  в год принято относить к предсейсмическим, постсейсмическим деформациям, медленным землетрясениям,

длиннопериодным асейсмическим деформациям (символы на рисунке). Суперинтенсивные деформации в зонах разломов, имеющие скорости от  $10^{-5}$  в год и выше (сиреневый прямоугольник на рисунке) [2, 4-6], регистрируются наземными геодезическими методами (нивелирование и светодальномерные измерения). Выявление их возможно благодаря высокой пространственно-временной детальности измерений. Также применение специальных методик спутниковых наблюдений и обработки сигналов позволяет выделять короткопериодные движения путем непрерывных измерений во внутрисуточном временном диапазоне [13, 62].

Таким образом, спутниковые методы являются универсальными методами, позволяющими определять деформации не только в широком пространственном, но и временном диапазоне. Следовательно, они могут быть использованы для фиксации параметров короткопериодных и трендовых движений на всех трех пространственных уровнях, регламентированных нормативными документами для выбора и оценки площадок под размещение ответственных объектов. Дискретный характер распределения деформаций и их скоростей в иерархически блочной среде отражается на их величинах, зависящих от пространственного масштаба, на котором они определяются. Исследования этих пространственных и временных взаимосвязей изложены в следующих разделах данной главы.

### **3.3.2 Определение параметров трендовой составляющей геодинамических движений**

Трендовые движения определяются на основе анализа изменений, фиксируемых точными измерениями пространственных координат реперов наблюдательной станции, происходящих в промежутках между повторными циклами наблюдений. Таким образом, их определение относится к дискретным измерениям. По полученным разностям пространственных координат отстраиваются полные векторы смещений пунктов, отражающие произошедшие за наблюдаемый период движения земной коры и вызванные ими деформации.

При исследовании района радиусом 100-150 км оценку трендовых движений целесообразно проводить по смещениям пунктов Государственной геодезической сети (ГГС), произошедших с момента их заложения 30-60 лет, методами спутниковой геодезии. Как правило, на такой площади можно задействовать для наблюдений около 30 пунктов ГГС I-III классов, равномерно покрывающих территорию и пригодных для проведения спутниковых измерений.

Следует отметить, что сравнение высот пунктов, полученных спутниковыми методами, с их исходными значениями может иметь ошибочный результат в плане наличия движения ввиду того, что исходные высоты определялись нивелирными методами, а стандартные модели геоида, используемые при обработке спутниковых измерений, не гарантируют получения результата, согласующегося с наземными измерениями. Поэтому для геодинимической оценки района размещения объекта целесообразно определять горизонтальные трендовые движения, а вертикальные движения анализировать по картам вертикальных движений земной коры [34, 35] и фондовым данным.

При переопределении координат пунктов ГГС возникает ряд методических сложностей, связанных с точностными характеристиками геодезических построений, полученных традиционными наземными методами (при закладке пунктов) и методами спутниковой геодезии (на момент переопределения), а также выбором исходных пунктов. Учитывая основной принцип получения координат в геодезии «от общего к частному», в качестве исходных пунктов используются пункты высокого класса, расположенные на исследуемой территории. Их взаимная стабильность в двух сравниваемых циклах наблюдений имеет важное значение. Ошибки привязки к исходному направлению создают кажущиеся развороты и масштабные деформации всей сети. Хорошо известным примером подобных ошибок являются векторы смещений, величины которых возрастают с удалением от исходных пунктов.

В связи с этим выбор исходных пунктов производится с привлечением многосторонней информации геодезического и техногенного характера.

На первом этапе на исследуемой территории для измерений выбираются пункты геодезической сети I класса с целью отбора среди них максимально стабильных для использования их в качестве исходных при определении координат пунктов этого же класса и более низких классов точности. Для исключения отмеченных выше погрешностей производится совмещение одноименных пунктов исходной и современной сетей по методу наименьших квадратов и определяются предварительные поправки за различие масштабов и ориентировки сравниваемых реализаций. Найденные поправки, конечно, отягощены влиянием действительных смещений некоторых пунктов, которые на основании анализа максимальных расхождений последовательно исключаются. Совмещение по указанному условию оставшихся пунктов позволяет уточнить взаимную ориентировку и масштаб сравниваемых реализаций и получить уточненные векторы смещений для исключенных пунктов. Таким образом, путем анализа и приближений производится выбор исходных геодезических пунктов I класса. От выбранных исходных пунктов на втором этапе переопределяются координаты остальных пунктов этого же и более низкого класса точности.

Для построения деформационных характеристик массива трендовые горизонтальные смещения пунктов ГГС преобразуются с использованием математического аппарата механики сплошной среды в тензорное представление деформационного поля. Как правило, геодезическую сеть с полученными трендовыми горизонтальными смещениями пунктов разбивают на треугольники и относят получаемые компоненты тензора деформаций к их геометрическим центрам. Для получения параметров деформаций могут использоваться различные методики, широко представленные в литературе [208].

### **3.3.3 Определение параметров вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений**

Определение параметров вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений выполняется путем определенной обработки

временных рядов измерений, получаемых в ходе непрерывных сеансов спутниковых наблюдений. Задача обработки сводится к получению смещений геодезических пунктов (реперов) через определенные временные интервалы непрерывного ряда измерений. В настоящее время для этого используются два метода: метод относительного позиционирования и метод Precise Point Positioning (PPP). Оба метода могут быть реализованы в статическом и кинематическом режимах обработки данных.

Метод PPP является разновидностью абсолютного метода позиционирования и позволяет получать высокоточные результаты позиционирования в автономном режиме (при использовании только одного приёмника, без базовой станции). Метод PPP имеет сложности в определении фазовых неоднозначностей, и в настоящее время разрабатываются методики, позволяющие улучшить решение этой задачи.

Метод относительного позиционирования в режиме статики является самым точным и наиболее используемым методом, в котором достижимы точности  $10^{-7}$  и даже лучше, что эквивалентно миллиметровой точности на базовых линиях длиной в несколько километров [209]. При статическом относительном позиционировании в режиме статики два или более одновременно работающих приемника, установленных на концах измеряемых базовых линий, позволяют получить пространственное смещение точек, на которых стоят приборы, в вертикальном и горизонтальном (север-юг, запад-восток) направлениях относительно некоторого начального положения через определенные заданные интервалы времени (рисунок 3.2).

Относительный режим позиционирования по фазовым измерениям заключается в обработке разностей фазовых измерений между спутниками и между станциями, в результате чего нейтрализуются ошибки часов приемников и спутников, снижается влияние ионосферной и тропосферной задержек, погрешности спутниковых эфемерид. Остаются ошибки, связанные с многолучевостью (переотражением спутниковых сигналов от поверхностей), которые носят систематический характер и достаточно непросто поддаются исключению, несмотря на большое количество разработанных для этого способов.

Для определения смещений через короткие временные интервалы чаще используется статическое относительное позиционирование.

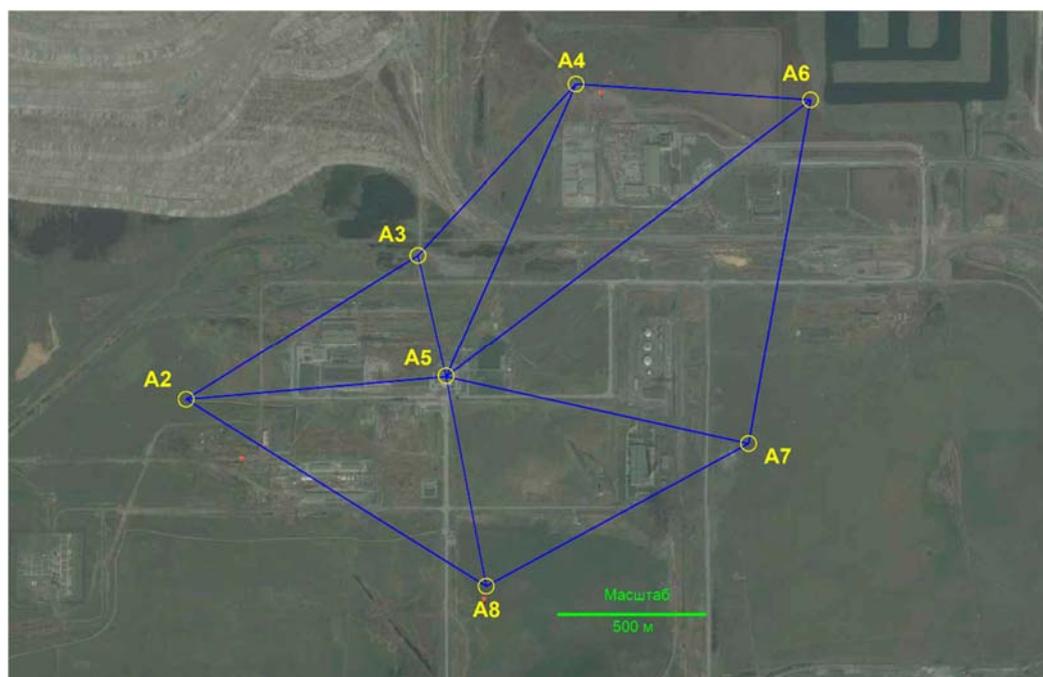


Рисунок 3.2 – Пример наблюдательной станции непрерывного спутникового мониторинга для выявления вариационной составляющей геодинамических движений (Качарское месторождение, промплощадка)

Непрерывный спутниковый мониторинг получил распространение при выявлении колебаний различных сооружений (мостов, плотин, зданий) [210–214], сооружений башенного типа [215–217], а также для наблюдений за быстропротекающими процессами земной коры: оползнями, землетрясениями, вулканами [64, 218–225], медленными геодинамическими движениями [13, 62], в том числе на основе постоянно действующих станций ГНСС [54, 59, 226].

Для выделения смещений пункта в ходе непрерывного мониторинга ключевым моментом является частота опроса или, другими словами, длина временного интервала, с которой обрабатывается непрерывный ряд спутниковых измерений. Чем меньше частота опроса, тем детальнее получается описание динамических процессов. С другой стороны, при малых временных интервалах присутствует риск ошибок из-за факторов, которых не исключает метод относительного статического позиционирования. К таким факторам относится

количество наблюдаемых спутников, их взаимное расположение на небе (геометрический фактор), а также явление многолучевости.

В литературе приводятся примеры выделения смещений через временные интервалы, равные одному часу [210], 30 минутам [211], 10-15 минутам [62, 214, 215, 227, 228], обработанные в статическом режиме. Для выявления быстрых сейсмических движений используются и более короткие интервалы [213, 216, 220, 222, 223, 229, 230], вплоть до временных интервалов, равных интервалу регистрации (записи) спутникового сигнала (одноэпоховое позиционирование), который в современных спутниковых приемниках может достигать 20-50 Гц. К одноэпоховому позиционированию и использованию спутниковых систем для выявления сейсмических колебаний в последнее время в научной литературе наблюдается повышенный интерес ввиду технического совершенствования как самих спутниковых приборов, так и программного обеспечения для обработки их измерений.

В работе [209] отмечается, что, с точки зрения точности измерений, 10-ти минутный интервал обработки является оптимальным интервалом для обработки в режиме быстрой статики базовой линии до 20 км двухчастотным приемником для условий не менее 4 спутников, хорошего геометрического фактора и благоприятных атмосферных условий. При таких условиях гарантировано разрешение неоднозначностей. А увеличение числа спутников позволяет уменьшить продолжительность сеанса на 20 %. По данным многих исследований перечисленные выше условия и отсутствие эффекта многолучевости позволяют при использовании 10-15-ти минутных интервалов получить решение, соответствующее заявленному уровню точности спутниковых приемников.

Кроме того, очевидно, что оптимальная длина интервала обработки должна соответствовать скорости смещения объекта. В работе [228] доказано, что наиболее длинный по продолжительности временной интервал обработки, и, следовательно, теоретически более точный, но выбранный неадекватно реальной скорости смещения объекта, может давать больше грубых ошибок, чем наименее длинный интервал. Однако геодинамические процессы, которые сегодня доступны для

регистрации современными ГНСС-приемниками, проявляются в широком спектре частот – от сейсмических колебаний в диапазоне от 20 Гц до 0,002 Гц, до медленных геодинамических движений ниже 0,002 Гц, которые исследуются в данной работе. От интервала регистрации/записи спутникового сигнала (частота дискретизации) зависит и точность определяемых смещений, и возможность выявления максимальных периодичностей геодинамических процессов. Поэтому вопрос выбора оптимальной длины интервала при обработке непрерывного ряда измерений для выявления геодинамических движений в низкочастотном диапазоне сводится к оценке чувствительности выбранного ГНСС-оборудования к выделению смещений за этот интервал с максимальной точностью.

В программах обработки спутниковых наблюдений для оценки точности используется параметр RMS (Root Mean Square) – аналог среднего квадратического отклонения. Чем благоприятнее условия наблюдения и лучше показатели геометрического фактора, характеризующиеся коэффициентом понижения точности по местоположению – PDOP, тем меньше значения RMS (рисунок 3.3).

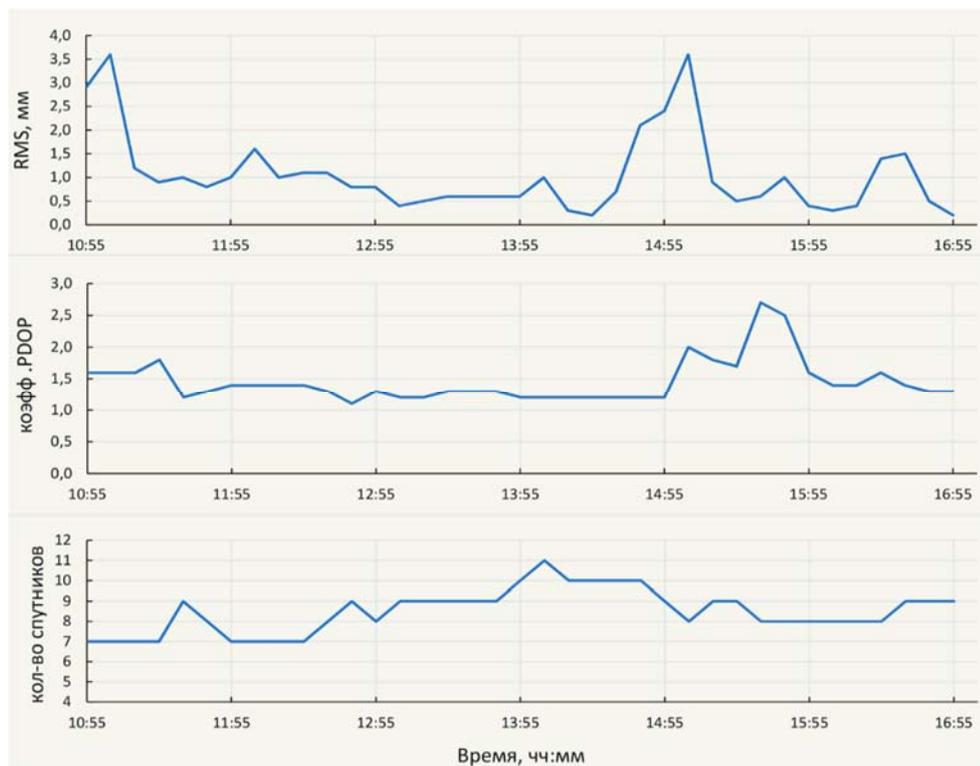


Рисунок 3.3 – Сопоставление значений среднего квадратического отклонения (RMS), геометрического фактора (PDOP) и количества спутников GPS для фрагмента временного ряда для 10-ти минутных интервалов

По нашим исследованиям и данным литературных источников при 8-9 спутниках с хорошей геометрией положения на небе при отсутствии отражающих поверхностей при 10-ти минутном интервале обработки в режиме статики RMS для интервалов может находиться в пределах 1 мм, а при 2-х минутном интервале – 1-2 мм. Следует заметить, что показатель RMS характеризует внутреннюю сходимости результатов измерений, то есть их отклонения от средней величины, и в ряде случаев является невосприимчивым к действию систематических ошибок, к которым относится многолучевость, являющаяся одной из трудноустраняемых ошибок, особенно при коротких сессиях наблюдений.

Для оценки реальной точности определяемых спутниковыми методами смещений применяют их сравнение с результатами измерений, получаемых другими приборами (тахеометры, инклинометры, акселерометры). Например, по данным сравнения результатов GPS измерений и акселерометров, выполненного в работах [231-233], установлено, что сопоставление этих приборов возможно в диапазоне периодов от первых секунд до нескольких десятков секунд. При более длинных периодах разрешающая способность акселерометра не позволяет использовать его в качестве эталона для оценки спутниковых измерений. В этих случаях, наоборот, спутниковые измерения используются в качестве эталонных для корректировки записей акселерометров на низких частотах [234, 235].

*Поэтому для оценки точности спутниковых определений в низкочастотном диапазоне используются экспериментальные установки, позволяющие смещать спутниковую антенну на известное расстояние и однозначно определять минимальную величину смещения, которую можно зарегистрировать данным приемником за конкретный временной интервал. Такие исследования выполняются на протяжении уже многих лет и широко представлены в литературе [215, 227, 228, 229, 236, 237].*

Использования, выполненные с помощью экспериментальных установок, позволили сделать определенные выводы относительно чувствительности показателя RMS. Так, например, значения RMS 10-15-ти минутных интервалов хорошо коррелируют (до 98-99%) с невязками, полученными между измеренными и

*истинными смещениями антенны – чем больше невязка, тем больше значение RMS.* В этой связи параметр RMS для интервала может являться адекватным критерием точности при выявлении смещений за короткие временные интервалы.

Исследования показывают, что равномерное возрастание до больших значений, а затем равномерное убывание невязок при малых значениях RMS свидетельствует о наличии эффекта многолучевости в эти временные моменты. Поэтому участки ряда значений с большими смещениями и маленькими значениями RMS требуют внимания с точки зрения наличия многолучевости. Для ее исключения, когда не удастся разместить антенны в максимально свободных от препятствий для прохождения спутниковых мест, используют различные способы: применение специальных антенн, анализ соотношения сигнал/шум, анализ зависимых измерений при наблюдениях на трех и более станциях [238].

Исследование точности смещений с помощью экспериментальных установок также показали, что значения RMS обработанных интервалов, которые не укладываются в тройную паспортную точность спутникового приемника, являются грубыми ошибками и подлежат исключению. Частые изменения количества спутников во время сеанса непрерывных наблюдений увеличивают процент таких грубых ошибок. Поэтому, в качестве допустимых значений RMS для интервалов целесообразно использовать его предельное значение, равное тройной точности используемого спутникового приемника [228].

Обработка в статическом режиме интервалов продолжительностью менее 10 минут требует либо применения дополнительных методик, повышающих точность определения смещений, либо применения научного программного обеспечения (например, пакет WayPoint GrafNav) или специальных модулей для отслеживания движущихся объектов в рамках коммерческого программного обеспечения для обработки спутниковых измерений. Например, метод наложения интервалов, разработанный автором работы [228], позволяет, увеличивая количество интервалов в процессе обработки, повысить точность обработки каждого из них, уменьшить влияние многолучевости и на более детальном уровне описать

смещение объекта, что подтверждается исследованиями с помощью созданной автором экспериментальной установки.

В данной работе для выявления вариационной короткопериодной составляющей геодинимических движений использовался модуль Motion Tracker программного комплекса Trimble Total Control, который предназначен для обработки данных GPS измерений для деформационного мониторинга различных объектов (высоких башен и зданий, мониторинга плотин, наземного мониторинга за оползнями и т.д.). Данное программное обеспечение вычисляет положение точки потенциально подвижного объекта для каждой сессии. Самая короткая длина сессии, которую может обработать данный модуль, составляет одну минуту. Каждая сессия сравнивается с первоначальным положением объекта, и определяется возможное движение. Motion Tracker обрабатывает каждую сессию отдельно. Поэтому при коротких сеансах, когда возникают сложности с разрешением неоднозначности, в данной программе используется метод наложения интервалов.

Исследования точностных возможностей данного модуля с помощью экспериментальной установки приведены в работе [239]. В результате экспериментов установлено, что за сессии продолжительностью 5 минут и менее выявляются смещения с точностью в среднем 2-9 мм для базовых линий длиной не более нескольких километров на открытой территории. Улучшение точностных показателей достигается за счет уменьшения интервала записи спутниковых сигналов (частоты дискретизации). Поэтому на застроенной территории возможно достичь точности 6,3 мм и 7,5 мм за сессии продолжительностью 5 минут и 1 минута соответственно только при частоте дискретизации 5 Гц.

Исследования показали, что полученные с помощью экспериментальной установки показатели истинной точности выявляемых смещений соответствуют значениям RMS, которые определяет программный модуль Motion Tracker для каждой сессии (интервала).

Смещения, получаемые за 10-15-ти минутные сессии имеют более высокую точность и меньший процент грубых ошибок. В работе для определения геодинимических смещений использовались именно такие временные интервалы.

Значения RMS для таких интервалов для открытых территорий и на базовых линиях до 6 километров, по нашим исследованиям, находятся в пределах 3 мм.

Таким образом, результатом обработки непрерывного ряда спутниковых измерений каждой базовой линии наблюдательной станции (рисунок 3.2) являются графики смещения компонент вектора в направлении север-юг, запад-восток и 2D - компоненты через 10-15-ти минутные интервалы (рисунок 3.4).

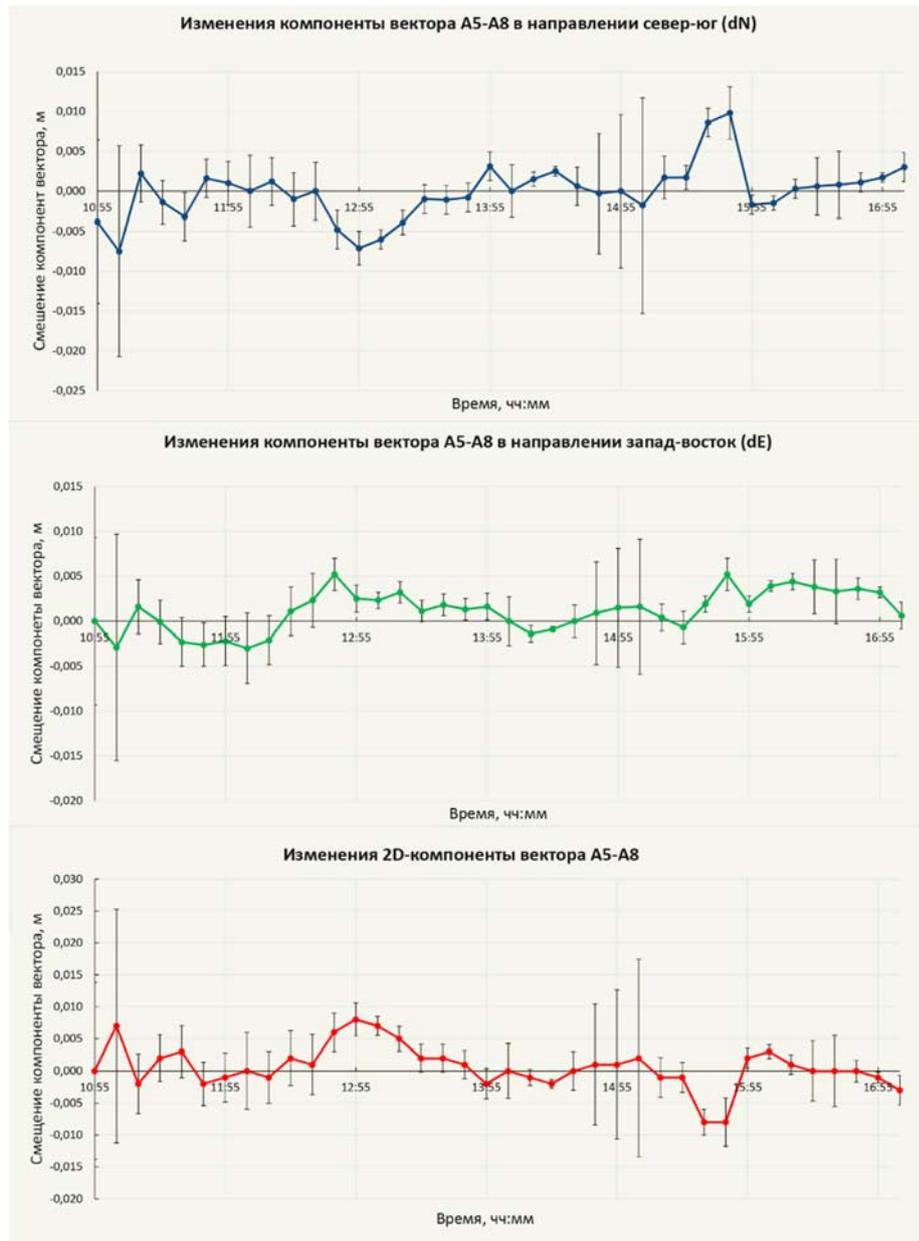


Рисунок 3.4 – Изменение компонент вектора, полученное с помощью спутниковых систем Sokkia GRX1 для базовой линии длиной 825 м с интервалом 10 минут. Предел погрешностей значений на интервалах соответствует уровню  $3 \cdot \text{RMS}$  ( $3\sigma$ )

Сразу отбраковываются интервалы, на которых не разрешена неоднозначность и получены плавающие (float) решения, а также интервалы, на которых результат получен со значениями RMS, превышающими тройную паспортную точность спутникового приемника. Затем полученный ряд значений оценивается на предмет присутствия ошибок, связанных с эффектом многолучевости. Вычлняются участки ряда, на которых наблюдаются повышенные значения смещений при небольших значениях RMS, и проводится исключение многолучевости методом анализа зависимых измерений при наблюдениях на трех и более станциях [237]. В случае подтверждения явления многолучевости интервалы с такими смещениями также отбраковываются. Значения смещений, превышающие двойное значение RMS, определяемое программой для данного временного интервала (сессии), для открытых территорий и тройное значение RMS для территорий с наличием небольших препятствий, можно считать значимыми и использовать для оценки изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, под их воздействием.

Таким образом, основные условия применения методики определения вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений в низкочастотном диапазоне, гарантирующие максимальную достоверность и точность результатов, заключаются в следующем:

- использование метода относительного позиционирования в режиме статики, нейтрализующего значительную часть погрешностей спутниковых измерений;
- использование двухчастотного, двухсистемного (GPS, ГЛОНАСС) спутникового оборудования;
- базовые линии длиной до 6 км;
- обеспечение благоприятных условий измерений: размещение антенн приемников на открытых территориях, максимально свободных от препятствий для прохождения спутниковых сигналов, выбор наилучших временных интервалов

приема спутниковых сигналов в течение суток ( $PDOP \leq 2.3$ , количество спутников – не менее 8);

- использование специальных спутниковых антенн, позволяющих уменьшать влияние многолучевости;

- вычисление смещений через 10-15-ти минутные временные интервалы с частотой дискретизации сигнала не менее 0,5 Гц;

- при определении смещений через интервалы, длина которых меньше 10 минут, необходимо использование частоты дискретизации сигнала не менее 1-5 Гц и научного программного обеспечения для более качественной обработки спутниковых сигналов, более надежных алгоритмов определения фазовых неоднозначностей.

В итоге за сеанс непрерывных спутниковых измерений по полученным через 10-15-ти минутные интервалы смещениям базовых линий наблюдательной станции в направлениях север-юг, запад-восток и 2D –компоненты (рисунок 3.2) можно оценить степень интенсивности движений, максимальные значения смещения за весь период, деформации, вызванные ими, а также периодичность процесса.

### **3.3.4 Метод оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений**

Как отмечалось в 1 главе работы и в разделе. 3.1.1, деформации массива горных пород, обусловленные современными геодинамическими движениями, являются основным параметром, определяющим безопасность размещения объектов недропользования. Учитывая факт того, что короткопериодные деформации могут в своем максимуме достигать, а иногда и превышать деформации, рассчитанные за многолетний период наблюдений, и оказывать негативное влияние на объекты, встает вопрос об их определении и учете по результатам непрерывного суточного мониторинга. Исходя из результатов наблюдений, очевидно, что вариационная составляющая формирует в массиве

постоянно меняющееся деформационное поле с той дискретностью, с какой определяются смещения. С точки зрения безопасности объектов важным представляется определить максимальные значения деформаций, зафиксировать потенциально наихудший фрагмент деформационного поля за многочасовой период наблюдений. Таким образом, необходимо получить тензорное представление деформационного поля, формируемого короткопериодной составляющей геодинамических движений, не просто в конкретный заданный момент времени, а за весь период непрерывных наблюдений, учитывая все значения смещений вплоть до максимальных. Автором работы предложен именно такой метод определения деформаций, суть которого излагается в данном разделе.

Для получения тензорного представления деформационного поля необходимо определить главные компоненты тензора деформаций для каждого треугольного элемента наблюдательной сети, в вершинах которого находятся реперы, для которых определяются смещения через определенные интервалы времени в ходе непрерывного мониторинга относительно условно неподвижной точки. В роли такой точки может выступать один из реперов сети или репер на удалении до 6 километров в заведомо благоприятном с геодинамической точки зрения месте. Разбиение на треугольные элементы может осуществляться как триангуляцией Делоне (рисунок 3.2), так и пересекающимися треугольниками. Исследования, представленные на эту тему в литературных источниках, допускают оба варианта. Для центра тяжести каждого треугольного элемента рассчитываются главные величины тензора деформаций  $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$  и угол  $\varphi$ , определяющий направление  $\varepsilon_{\max}$  относительно оси  $X$  (отсчитывается против часовой стрелки) (рисунок 3.5).

Главные компоненты тензора деформаций определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\max} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_{xy}^2}; \\ \varepsilon_{\min} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_{xy}^2};\end{aligned}\tag{3.1}$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}.$$

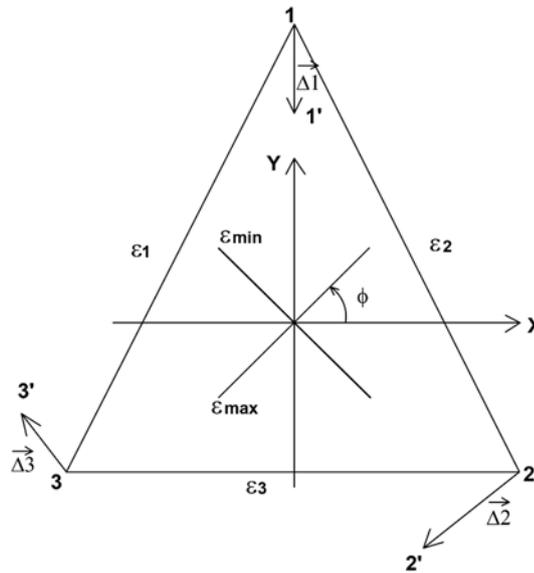


Рисунок 3.5 – Схема к определению главных компонент тензора деформаций для треугольного элемента наблюдательной сети

Величины относительных удлинений  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  и сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{xy}$  в формулах (3.1) для треугольного элемента в двумерном варианте находятся из решения системы уравнений (3.2) [208]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_x L_1^2 + \varepsilon_y M_1^2 + \varepsilon_{xy} L_1 M_1 \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_x L_2^2 + \varepsilon_y M_2^2 + \varepsilon_{xy} L_2 M_2 \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_x L_3^2 + \varepsilon_y M_3^2 + \varepsilon_{xy} L_3 M_3 \end{cases}, \quad (3.2)$$

где  $L_1, L_2, L_3, M_1, M_2, M_3$  – косинусы углов между сторонами треугольника и осями  $X$  и  $Y$ ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – относительные линейные деформации сторон треугольника.

Четверть расположения угла  $\varphi$  в формулах (3.1) определяется исходя из знаков  $2\varepsilon_{xy}$  и  $\varepsilon_x - \varepsilon_y$ , соответствующих знакам  $\sin 2\varphi$  и  $\cos 2\varphi$ .

Относительные линейные деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  определяются из выражений:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_{12}}{L_{12}}; \varepsilon_2 = \frac{\Delta L_{23}}{L_{23}}; \varepsilon_3 = \frac{\Delta L_{31}}{L_{31}}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta L_{12}$ ,  $\Delta L_{23}$ ,  $\Delta L_{31}$  – максимальные горизонтальные смещения сторон треугольника за сеанс непрерывных наблюдений;

$L_{12}$ ,  $L_{23}$ ,  $L_{31}$  – длины сторон треугольника.

Для вычисления максимальных горизонтальных смещений сторон треугольника необходимо определить вектор смещения каждой вершины треугольника  $\overline{\Delta 1}$ ,  $\overline{\Delta 2}$ ,  $\overline{\Delta 3}$  за сеанс непрерывных наблюдений из положения 1, 2, 3 в положение 1', 2', 3' (рисунок 3.5). Возникает вопрос, как его оптимально и корректно определить. Вектор смещения за сеанс наблюдений меняет свое направление и абсолютную величину с частотой, равной частоте опроса. Определение вектора за интервал времени с момента начала непрерывного сеанса измерений до его конца не имеет никакого смысла. Можно определять вектор от положения с минимальным смещением до положения с максимальным смещением за сеанс. Такой способ корректен с позиций учета всего размаха значений смещений по абсолютной величине, но не корректен с точки зрения направления вектора. В связи с этим предлагается следующий вариант решения этого вопроса, который базируется на многочисленных экспериментальных исследованиях.

Проведенные исследования короткопериодных геодинамических движений в ходе непрерывного мониторинга с различной частотой опроса, от 10 минут в течение многочасовых измерений до 14 дней в течение трех лет, в отношении распределения направленности векторов смещений показали, что в течение всего мониторингового периода наблюдений имеют место часто встречающиеся направления смещения реперов, превышающие точность их определения. Чаще всего они согласуются с направлением простираения тектонических нарушений [240]. Выявление такого преобладающего направления смещения репера в вершине треугольного элемента сети из всего набора полученных его смещений через 10-15 минутные интервалы относительно одного условно неподвижного репера сводится к вычислению частоты попадания измерения в десятиградусный сектор, который

сканирует окружность с центром, соответствующим среднему значению положения репера за весь сеанс наблюдений, с шагом в один градус (рисунок 3.6) [241].

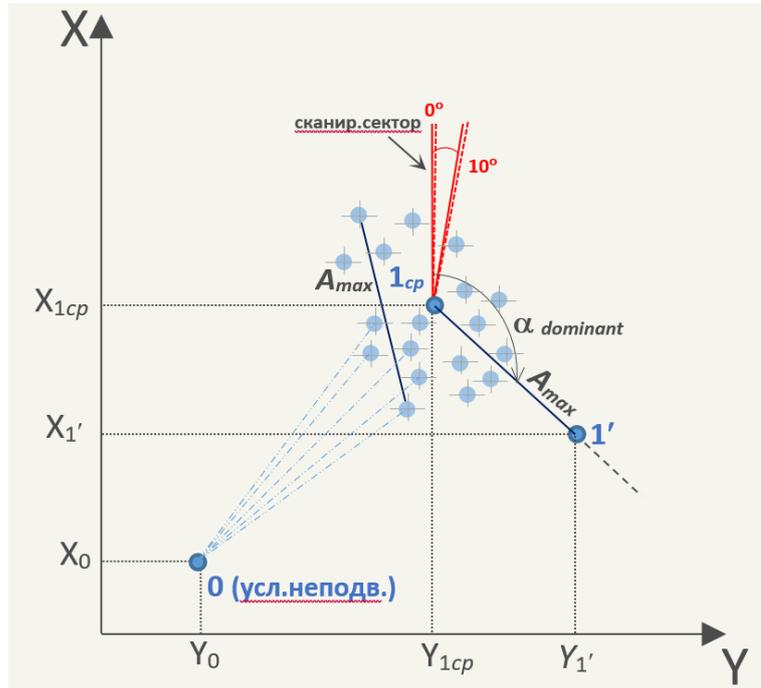


Рисунок 3.6 - Схема определения вектора смещений репера в вершине треугольного элемента наблюдательной сети

В результате такого сканирования получают диаграммы, примеры которых представлены на рисунках 3.7 и 3.8. На их основании и определяется преобладающее направление смещения –  $\alpha_{\text{dominant}}$ .

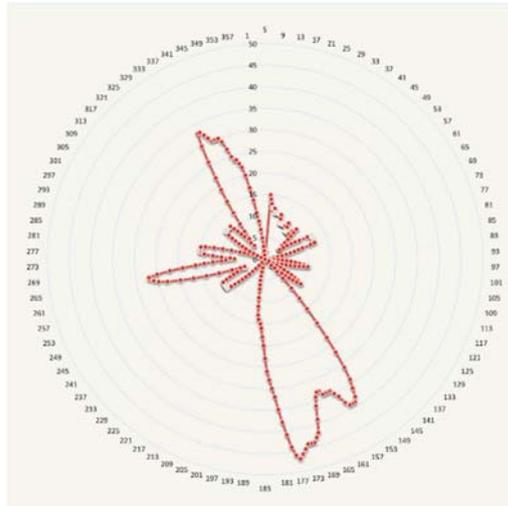


Рисунок 3.7 – Роза-диаграмма распределения дирекционных углов вектора смещений

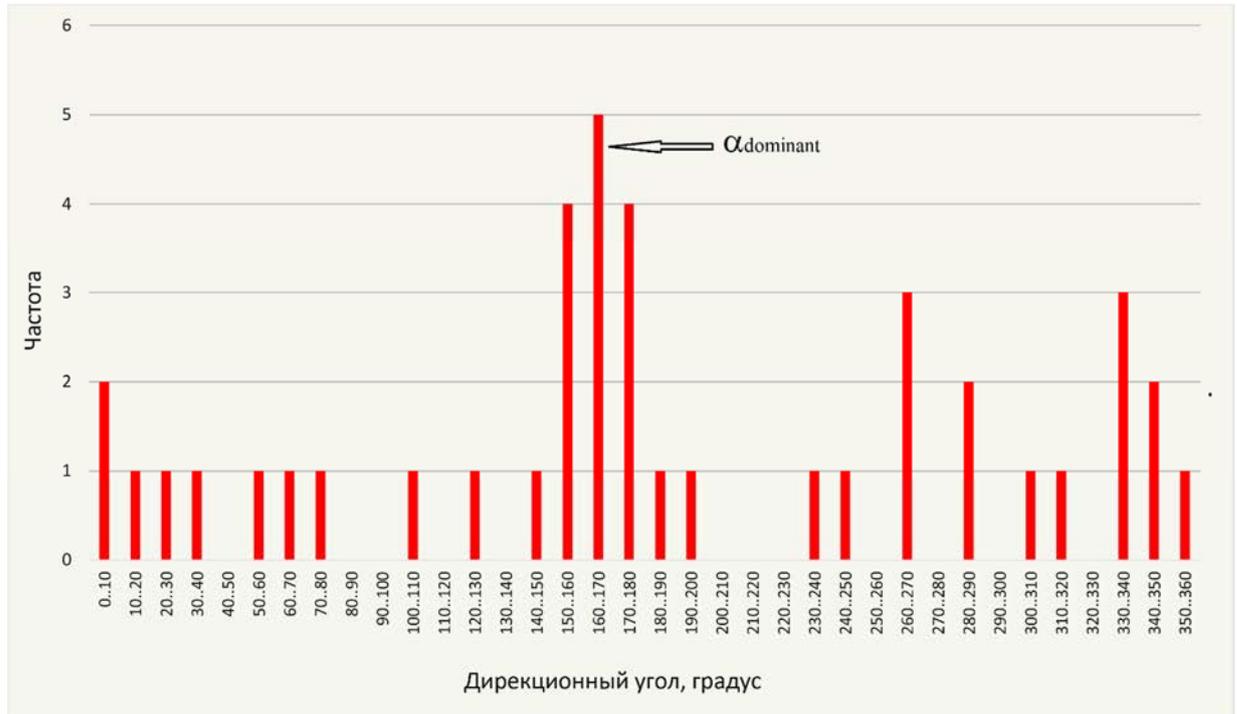


Рисунок 3.8 – Диаграмма распределения дирекционных углов вектора смещений

Для того, чтобы учесть все максимально возможные деформации за сеанс непрерывных наблюдений как наиболее опасные с точки зрения безопасного функционирования объекта недропользования, при определении абсолютной величины вектора смещений представляется целесообразным использовать значение максимального размаха смещений по осям координат как разность между минимальными и максимальными их величинами –  $\Delta 2D_{\max}$ , которое можно считать максимальной амплитудой  $A_{\max}$  (рисунок 3.9).

Таким образом, вектор преобладающего смещения  $\overrightarrow{\Delta 1}$  репера 1, находящегося в вершине треугольного элемента наблюдательной сети, из положения 1 в положение 1' относительно условно неподвижного репера (0 на схеме 3.6) определится путем откладывания от среднего положения репера  $1_{\text{ср}}$ , полученного за весь сеанс наблюдений, вектора в преобладающем направлении  $\alpha_{\text{dominant}}$  с абсолютной величиной, соответствующей максимальной амплитуде (размаху)  $A_{\max}$ . То есть конечные координаты вектора смещения  $\overrightarrow{\Delta 1}$  репера выражаются следующим образом:

$$X_{1'} = X_{1cp} + A_{\max} \cos \alpha_{\text{dominant}}$$

$$Y_{1'} = Y_{1cp} + A_{\max} \sin \alpha_{\text{dominant}}, \quad (3.4)$$

где  $X_{1'}$ ,  $Y_{1'}$  – конечные координаты преобладающего вектора смещения  $\vec{\Delta 1}$  репера из положения 1 в положение 1';

$X_{1cp}$ ,  $Y_{1cp}$  – координаты среднего положения репера 1 за весь сеанс наблюдений;

$A_{\max}$  – максимальная амплитуда (размах) 2D-смещений;

$\alpha_{\text{dominant}}$  – преобладающее направление смещения.



Рисунок 3.9 – Пример определения максимального значения амплитуды (размаха) смещений на графике

Определяемый таким способом вектор смещения репера, меняющего свое положение через определенные временные интервалы в ходе сеанса непрерывных наблюдений, отражает в полной мере весь спектр его изменений по направлению и учитывает вероятность появления самых максимальных смещений, способных привести к нежелательным деформациям в основаниях объектов недропользования.

Определив векторы смещений для всех вершин треугольных элементов наблюдательной сети, по формулам (3.3, 3.2, 3.1) для их центров тяжести вычисляются главные компоненты тензоров деформаций.

### **3.4 Характеристика экспериментальной базы исследований**

Одним из критериев выбора экспериментальных участков для анализа деформаций земной поверхности, обусловленных трендовой и вариационной составляющей геодинамических движений, было их соответствие трем масштабным уровням, на которых необходимо исследовать территории под размещение особо ответственных объектов согласно нормативным документам [112, 113]. Для исследования трендовых движений в масштабах района размещения объектов необходимо наличие пунктов Государственной геодезической сети, покрывающих участки с достаточной плотностью. Для сравнительного анализа уровня деформаций участки выбирались как в асейсмичных, так и сейсмичных регионах.

Отделом геомеханики ИГД УрО РАН на протяжении многих лет проводились наблюдения за деформационными процессами массива горных пород и земной поверхности на многих месторождениях России и Казахстана с помощью спутниковых методов на различных пространственно-временных масштабах в соответствии с методиками, описанными в предыдущих разделах. В ходе решения различных геомеханических задач имели место наблюдения за трендовыми движениями пунктов ГГС в радиусе до 30 км от месторождения (рисунки 3.10, 3.11) [242, 243]. Наблюдения в зоне от 5 км до 30 км от месторождения, в которой отсутствует явное техногенное воздействие, явились экспериментальным материалом для анализа трендовых движений за период 30-45 лет на базах от 100 м до 25 км в данной работе (таблица 3.1). Кроме того, интерес в таких

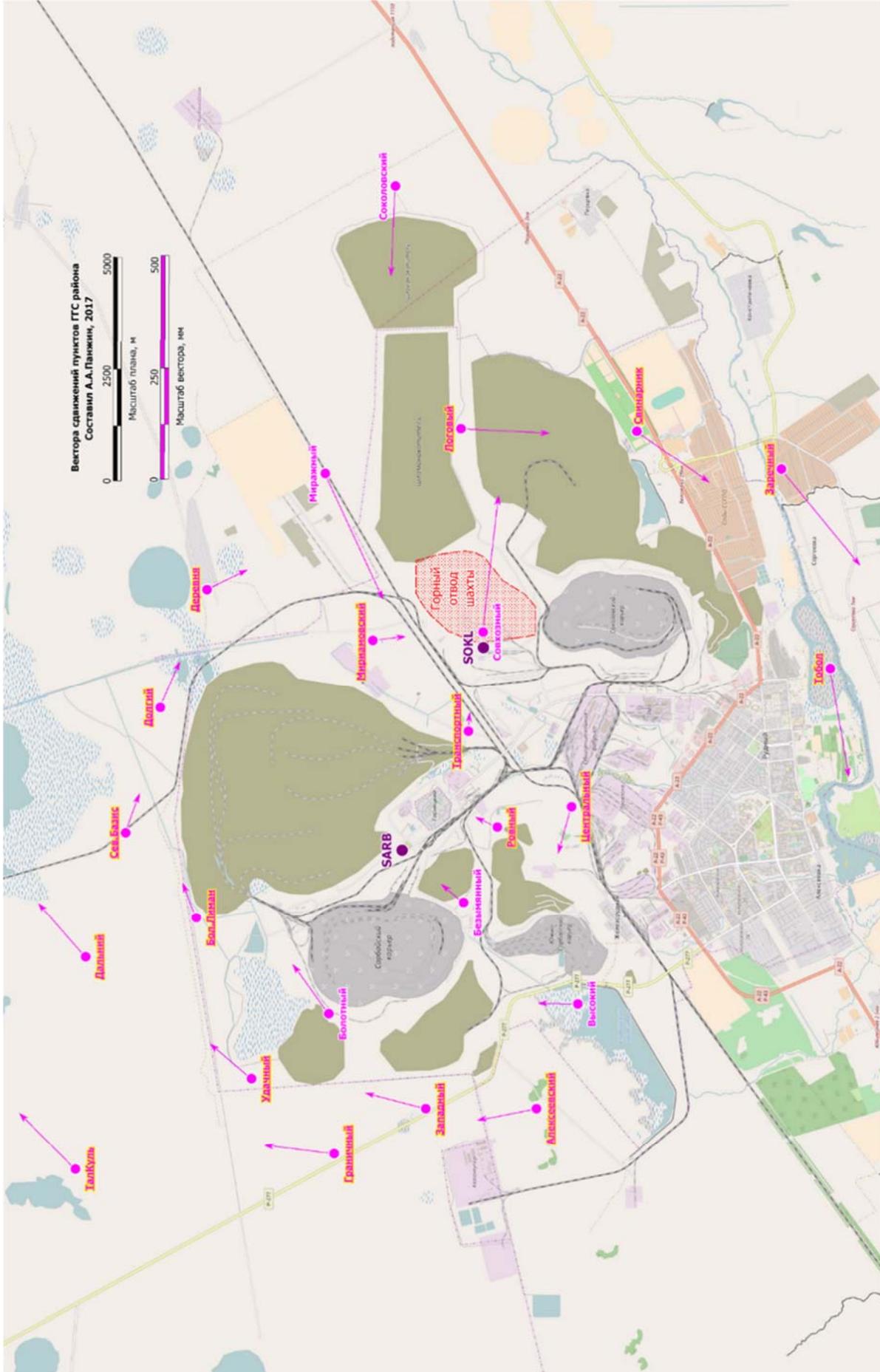


Рисунок 3.10 – Определение параметров трендовых геодинамических движений пунктов ГГС в окрестностях Соколовского и Сарбайского месторождений за 45 лет (по материалам А.А. Панжина, ИГД УрО РАН)

исследованиях представляла возможность обнаружения аномалий в параметрах геодинимических движений пунктов, расположенных на большом расстоянии от месторождений, которые могли быть индуцированы горными работами.

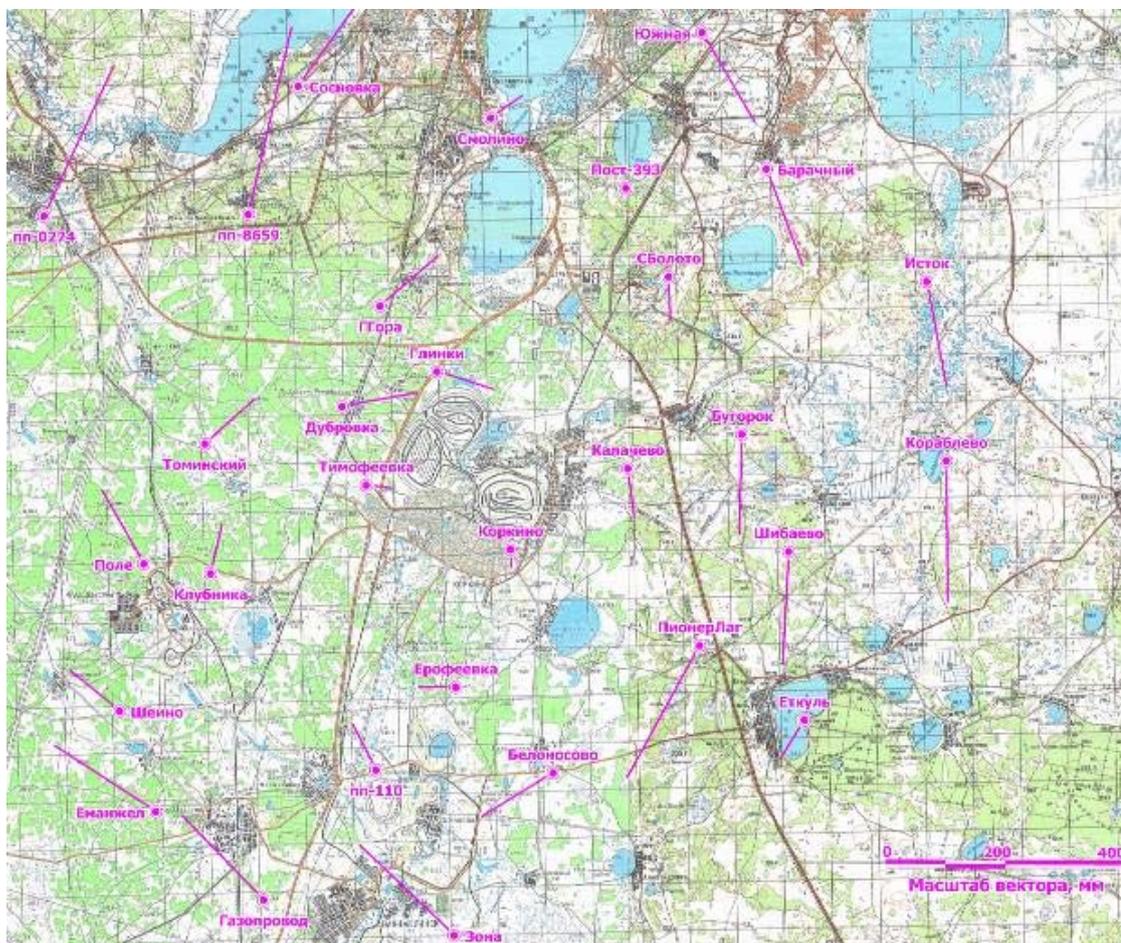


Рисунок 3.11 – Определение параметров трендовых геодинимических движений пунктов ГГС за 40 лет, Челябинская область, г. Коркино (по материалам А.А. Панжина, ИГД УрО РАН)

Таблица 3.1 – Объекты для исследований параметров трендовых движений

Объект	Количество реперных интервалов	Максимальная длина интервала, км	Период наблюдений, год
Асейсмичный регион			
Соколовское и Сарбайское железорудные месторождения, г. Рудный, Казахстан	152	22	45
Качарское железорудное месторождение г. Костанай, Казахстан	210	16	40

## Продолжение таблицы 3.1

Южно-Кемпирсайское месторождение хрома, г. Хромтау, Казахстан	780	8	31
Качарское месторождение, г. Костанай, Казахстан	35	12	39
Сейсмический регион			
Район г. Лос-Анджелес (США)	1225	88	3

Для анализа трендовых движений в сейсмоактивном районе были использованы данные суточных спутниковых наблюдений на постоянно действующих станциях в районе г. Лос-Анджелес, вблизи разлома Сан-Андреас, которые были обработаны с помощью онлайн-сервиса AUSPOS (Geoscience Australia Online GPS Processing Service), основанного на относительном методе определения координат. Были получены деформации всех возможных интервалов от 109 м до 90 км между 59 станциями за период 3 года (2014-2016 гг.) (рисунок 3.12, таблица 3.1).

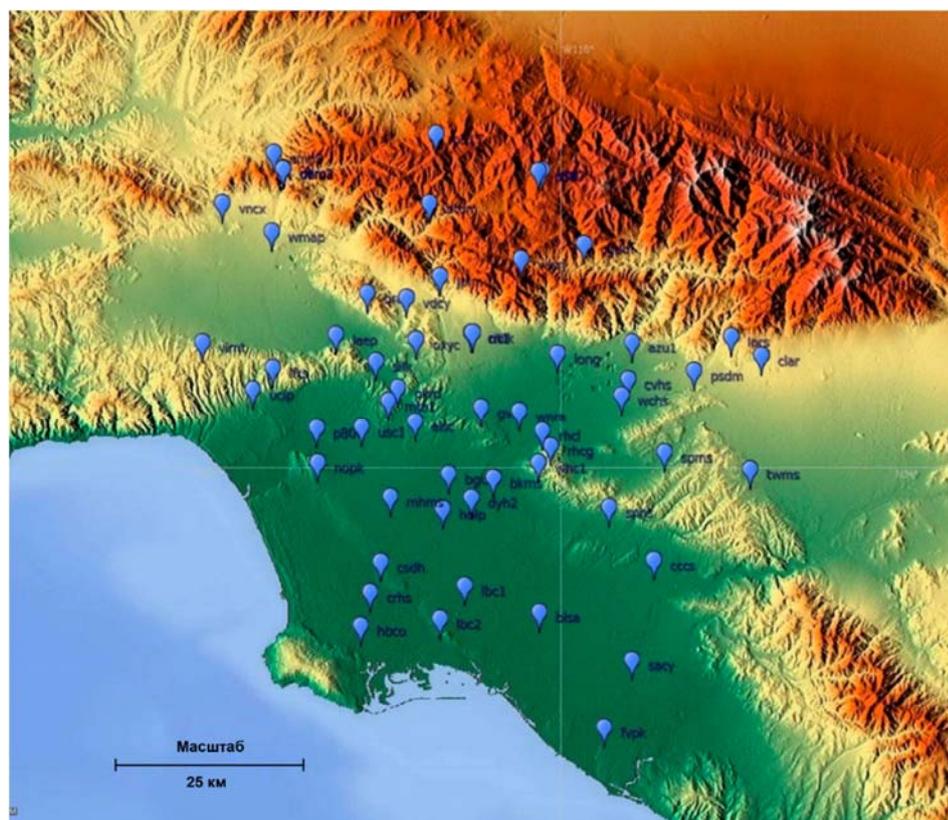


Рисунок 3.12 – Сеть постоянно действующих ГНСС-станций в районе разлома Сан-Андреас (г. Лос-Анджелес, США)

Вариационная короткопериодная составляющая движений исследовалась на локальных наблюдательных станциях размерами в пределах 5-6 км, которые проектировались на основании геологических и геофизических данных в соответствии с выявленными тектоническими нарушениями с целью определения их активности. Такие наблюдения проводились на территориях горных предприятий (рисунки 3.2, 3.14), на территории Белоярской АЭС в ходе инженерных изысканий при строительстве 4 энергоблока, в городской среде [13]. Как правило, необходимость таких наблюдений возникала на проблемных участках земной поверхности, где имели место аварийные ситуации или аномальные процессы, носящие систематический характер, явные причины которых были не ясны [244, 245]. Все экспериментальные участки находились вне какого-либо влияния, способного на момент проведения непрерывных сеансов наблюдений исказить результаты измерений (горные работы, различные вибрационные воздействия и т.д.). Также наблюдения проводились на незастроенной территории с целью научных экспериментов [246] (рисунок 3.13).

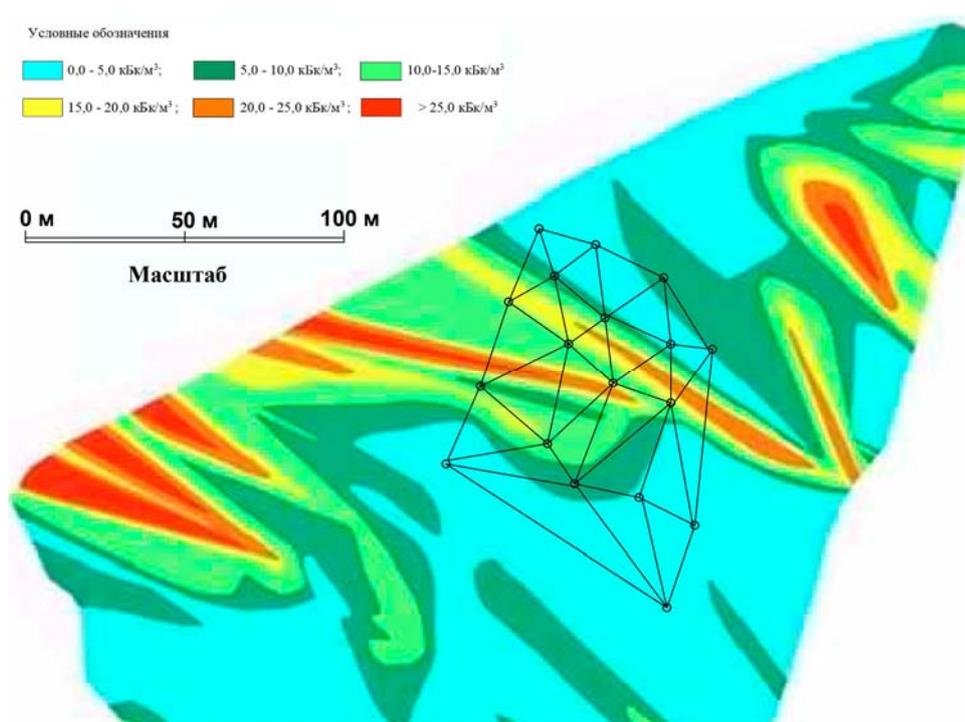


Рисунок 3.13 – Наблюдательная станция для определения параметров вариационной составляющей геодинимических движений, спроектированная на основании результатов радиометрии, г. Екатеринбург, Ботанический сад

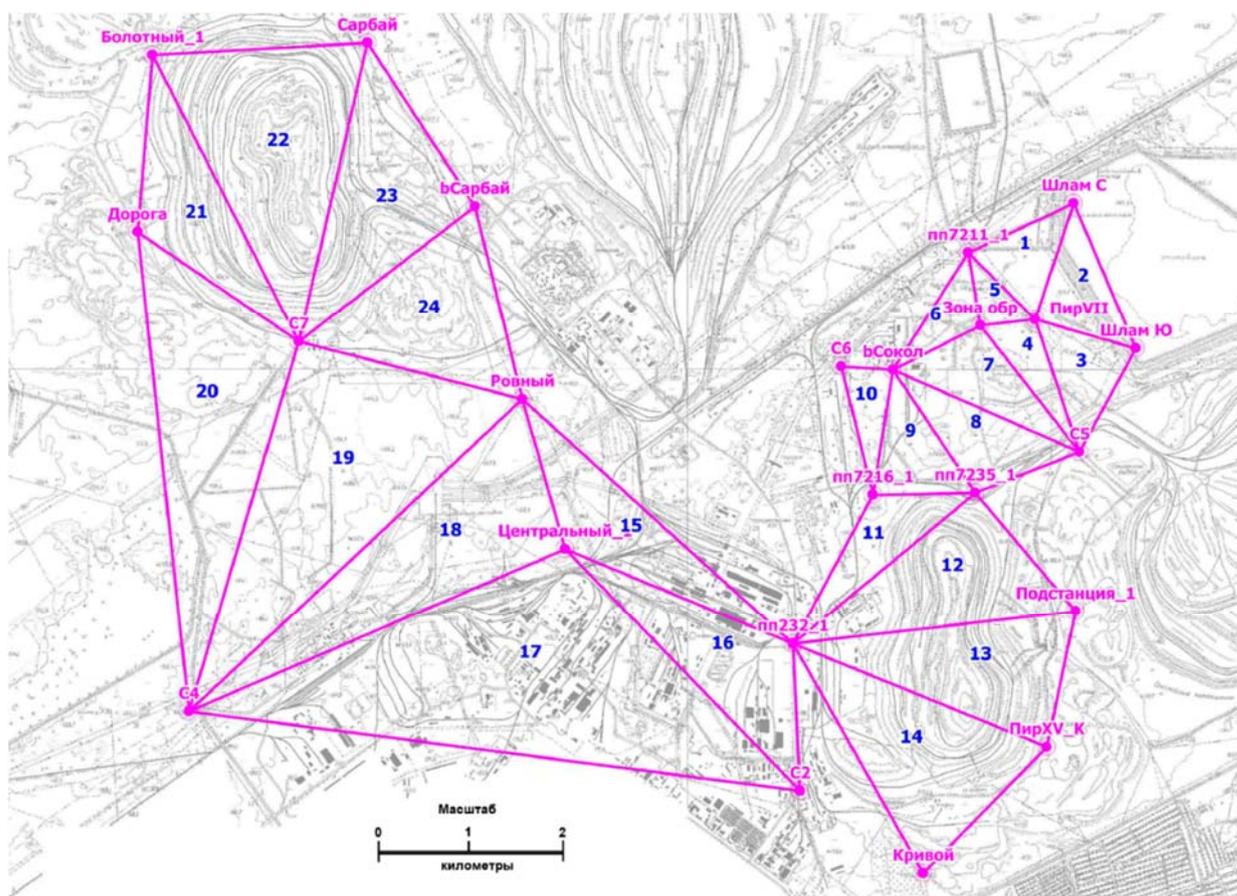


Рисунок 3.14 – Наблюдательные станции для определения параметров вариационной составляющей геодинамических движений на Соколовском, Сарбайском месторождениях и г. Рудный

На базе результатов, полученных на этих объектах (таблица 3.2), производился анализ пространственного-временного распределения параметров вариационной составляющей движений.

Таблица 3.2 – Объекты для исследований параметров вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений

Объект	Количество реперных интервалов	Диапазон длин реперных интервалов, км	Частота опроса, мин	Общее число измерений
Белоярская АЭС, г. Екатеринбург	44	0,04 – 0,32	15	379
г. Рудный, Казахстан	8	1,71 – 6,68	10	231
Соколовское железорудное месторождение, г. Рудный	27	0,57 – 3,10	10	799
Сарбайское железорудное месторождение, г. Рудный	11	1,94 – 4,78	10	299

## Продолжение таблицы 3.2

Качарское железорудное месторождение, г. Костанай, Казахстан	12	0,45 – 2,28	10	392
Куржункульское месторождение, Костанайская обл., Казахстан	15	0,43 – 2,14	10	430
Южно-Кемпирсайское месторождение хрома, г. Хромтау, Казахстан	12	0,45 – 1,03	10	582
Киембаевское месторождение хризотил-асбеста, г. Ясный	31	0,20 – 1,48	10	1328
Шубаркольское угольное месторождение, Жезказганская обл., Казахстан	20	0,61 – 3,27	10	631
Олимпиадинское золоторудное месторождение, Красноярский край	21	0,76 – 4,35	10	836
Лебединское месторождение, Белгородская обл.	28	1,80 – 5,96	10	1216

### 3.5 Распределение горизонтальных деформаций земной поверхности на различных пространственно-временных базах

Задача данного исследования сводится к определению критерия, согласно которому при выделении границ самоорганизовавшегося консолидированного блока можно оценить уровень деформаций, обусловленных современными геодинамическими движениями. Параметром, который отражает пространственно-временные особенности движений, является скорость относительной горизонтальной деформации, определяемая по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\Delta L/L}{t}, \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon$  – относительная горизонтальная деформация реперного интервала длиной  $L$ ,

$t$  – интервал времени между наблюдениями.

Для поставленной задачи важно абсолютное значение этого параметра, т.е. модуль скорости горизонтальной деформации реперного интервала –  $|\dot{\varepsilon}|$ . Максимальные значения модуля скорости деформации для различных длин реперных интервалов могут являться критерием оценки уровня деформаций.

На основании определения трендовых движений пунктов ГГС за периоды 30-45 лет по методике, изложенной в разделе 3.3.2, и постоянно действующих ГНСС–станций на пространственных базах до 90 км вычислены деформации всех возможных длин реперных интервалов наблюдательных сетей на объектах, представленных в таблице 3.1. Распределение модулей скоростей деформаций реперных интервалов в зависимости от их длины представлено на рисунке 3.15.

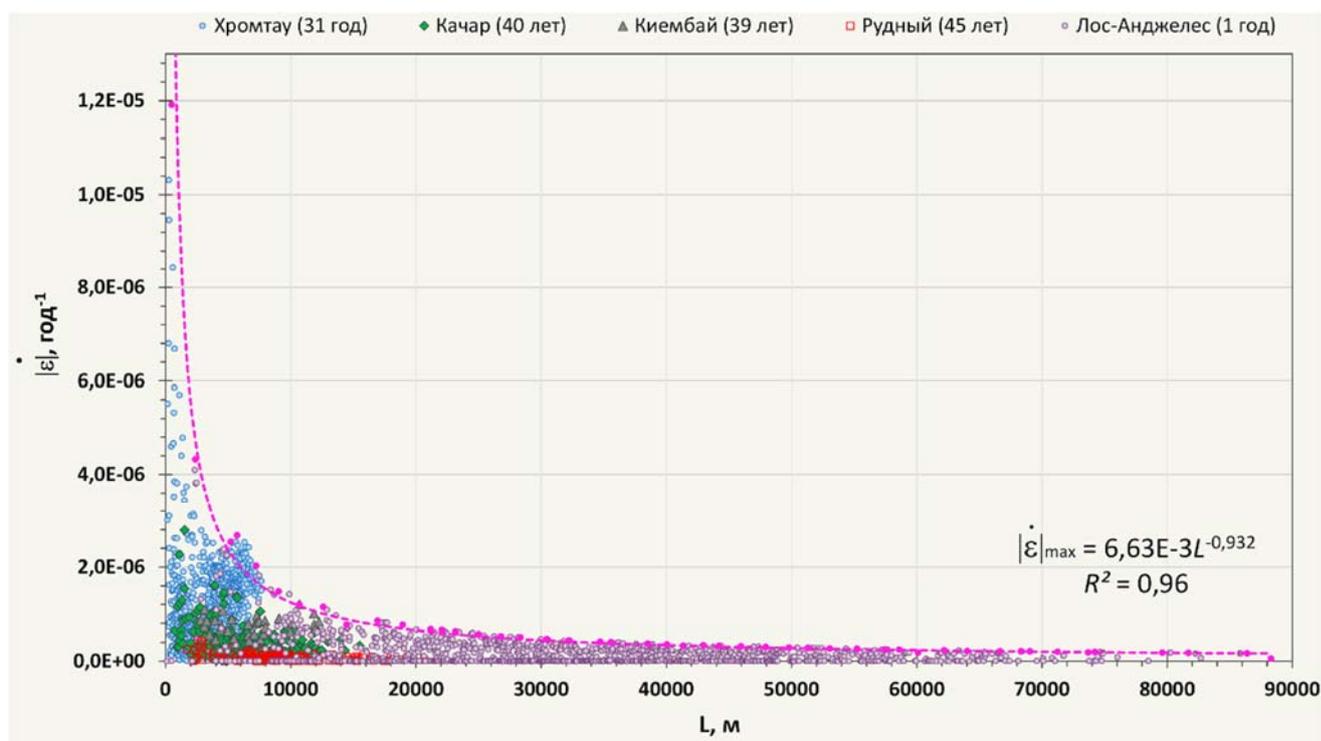


Рисунок 3.15 – Распределение модуля скоростей горизонтальных деформаций в зависимости от длины реперных интервалов (по данным измерений трендовых движений на 2402 интервалах )

Всего задействовано 2402 интервала. *Следует отметить, что среди них не присутствуют интервалы, подверженные техногенному влиянию, а также явному влиянию оползневых, овражно-балочных процессов и заболачивания.*

По графику распределения скоростей (рисунок 3.15) видно, что уровень деформаций для одних и тех же пространственных баз на разных территориях может быть разным. Скорость деформаций интервалов в асейсмичных областях на некоторых объектах сопоставима, а на некоторых превышает значения для сейсмичного района. Но, следует отметить, что в сейсмичном районе данные получены только на основании спутниковых измерений, в то время как в асейсмичных областях деформации рассчитаны путем сравнения координат, которые определялись наземными (в исходной серии 30-45 лет назад) и спутниковыми методами (в настоящее время). Поэтому сравнение разных по точности результатов, несмотря на усовершенствованные методики их получения не исключают, вероятно, всех возможных погрешностей, которые могут проявляться на некоторых интервалах.

Из анализа результатов следует, что для одной и той же длины реперного интервала значения модуля скорости деформаций могут отличаться на несколько порядков. Поэтому определяющим фактором для оценки уровня скоростей деформаций в зависимости от длины пространственной базы являются их максимальные значения –  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$

Для определения ряда максимальных значений модуля скорости деформаций в зависимости от длины реперного интервала весь набор данных разбивался на 50 интервалов длиной 1,8 км для каждого из которых определялось максимальное значение скорости. Для полученного ряда значений найдена функциональная зависимость модуля скорости горизонтальной трендовой деформации  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$  выбранного реперного интервала  $L$  земной поверхности от его размера, которая описывается степенной функцией с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,96$ :

$$|\dot{\epsilon}|_{\max} = 6,63 \cdot 10^{-3} L^{-0,932} , \quad (3.6)$$

где  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$  – максимальное значение модуля скорости горизонтальной трендовой деформации, год<sup>-1</sup>;

$L$  – длина реперного интервала, м;

$0,1 \text{ км} < L < 90 \text{ км}$ .

Качество уравнения регрессии оценено по средней относительной погрешности аппроксимации  $\delta$ :

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{|\dot{\epsilon}_i|_{\max} - |\dot{\epsilon}_i|_{\max p}}{|\dot{\epsilon}_i|_{\max}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где  $|\dot{\epsilon}_i|_{\max}$  – измеренное значение максимального модуля скорости деформаций;

$|\dot{\epsilon}_i|_{\max p}$  – расчетное значение максимального модуля скорости деформаций;

$n$  – количество значений ряда.

В среднем расчетные значения модуля скорости деформаций реперных интервалов для степенной модели (3.6) отличаются от фактических значений на 12% ( $\delta=12\%$ ).

Функция (3.6) в точке  $L=1\text{м}$  принимает значение  $6,63 \cdot 10^{-3}$  и изменяется в направлении аргумента  $L$  при относительном его изменении на  $\Delta L/L$  в  $K$  раз:

$$K = (\Delta L/L + 1)^{-0,932} \quad (3.8)$$

При относительном увеличении аргумента  $L$  на 0,5, согласно выражению (3.8), значение максимального модуля скорости деформации  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$  уменьшится в 0,68 раз.

Таким образом, максимальное значение модуля скорости горизонтальной деформации земной поверхности изменяется в зависимости от выбранного реперного интервала выпукло по степенной функции с относительной

погрешностью 12% так, что при длине интервала один метр равно  $6,63 \cdot 10^{-3}$ , а при относительном увеличении интервала на 0,5 уменьшается в 0,68 раза, приближаясь к нулевому значению.

Для оценки максимальных значений модуля скорости деформаций земной поверхности под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений исследовано 229 реперных интервалов длиной до 6 км на объектах, представленных в таблице 3.2. Для каждого реперного интервала получены его горизонтальные деформации  $\varepsilon_i$  через каждые 10 минут в течение многочасового сеанса непрерывных спутниковых наблюдений:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta 2D_i}{L}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta 2D_i$  – изменение  $2D_i$ -компоненты вектора спутниковых измерений за  $i$ -тый десятиминутный интервал относительно первоначального положения (рисунок 3.4),

$L$  – длина реперного интервала.

Пример изменения горизонтальных деформаций реперных интервалов за сеанс наблюдений представлен на рисунке 3.16.

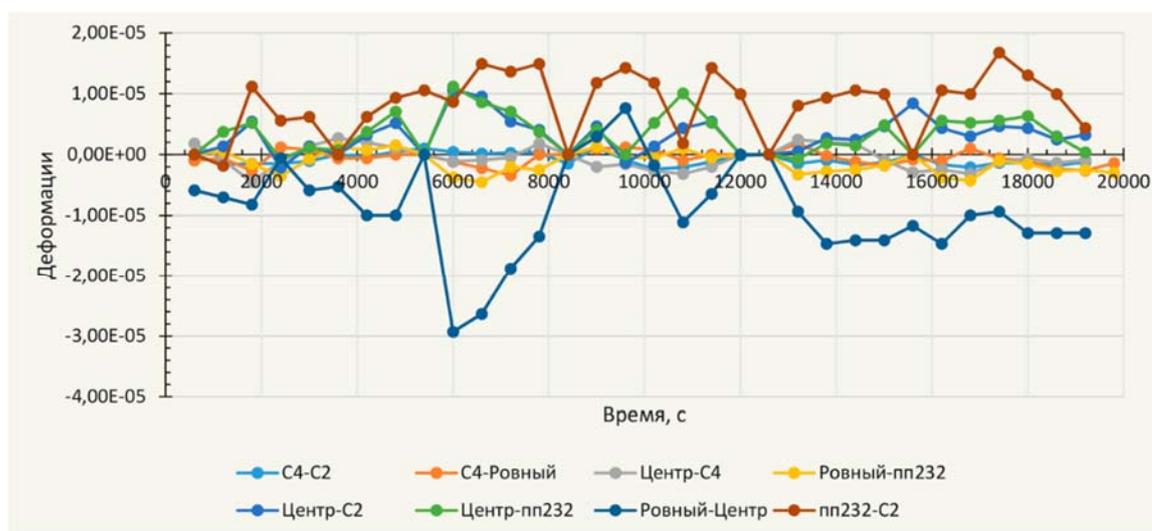


Рисунок 3.16 – Изменение горизонтальных деформаций реперных интервалов в течение сеанса непрерывных спутниковых наблюдений, г. Рудный (рисунок 3.14)

Модуль скорости горизонтальных деформаций реперного интервала  $|\dot{\varepsilon}_i|$  за все временные интервалы, кратные 10 минутам за сеанс непрерывных измерений, определяется по формуле:

$$|\dot{\varepsilon}_i| = \frac{|\varepsilon_i|}{T_0 - T_i}, \quad (3.10)$$

где  $|\varepsilon_i|$  – модуль деформации  $i$ -того десятиминутного интервала;

$T_0 - T_i$  – период между начальным и  $i$ -тым десятиминутным интервалом.

Таким образом получено распределение значений модулей скоростей деформаций в зависимости от соответствующих им длин реперных интервалов и временных периодов.

Для каждого временного интервала, кратного 10 минутам, выбрано максимальное значение модуля скорости горизонтальной деформаций  $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$  из значений  $|\dot{\varepsilon}_i|$  через каждые 200 м. Полученное распределение представлено на рисунке 3.17 в логарифмическом масштабе.

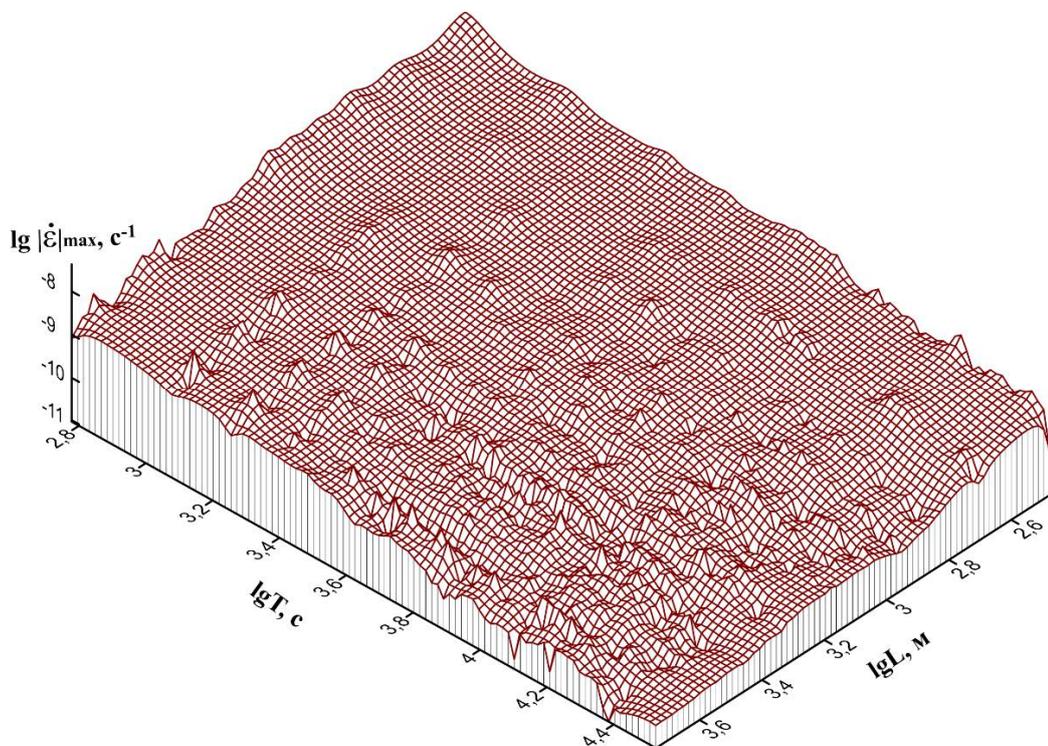


Рисунок 3.17 – Пространственно-временное распределение максимального модуля скоростей горизонтальных деформаций реперных интервалов по данным измерений вариационной составляющей геодинамических движений

По графику видна убывающая зависимость максимального модуля скорости деформаций от пространственной и временной базы измерений.

Зависимость максимального модуля скорости горизонтальной деформации земной поверхности  $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$ , обусловленной вариационной составляющей геодинамических движений, выбранного реперного интервала, от его размера  $L$  и времени регистрации  $T$  описана с помощью метода МППВ (метод приближения параболической вершины) следующим произведением степенных функций при коэффициенте детерминации  $R^2=0,94$ :

$$|\dot{\varepsilon}|_{\max} = 7,7 \cdot 10^{-4} L^{-0,80} T^{-0,84} \quad (3.11)$$

где  $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$  – максимальный модуль скорости горизонтальной деформации земной поверхности,  $\text{с}^{-1}$ ;

$L$  – размер реперного интервала, м;

$T$  – время регистрации, с;

$0,04 \text{ км} < L < 6 \text{ км}$ .

Относительная погрешность аппроксимации  $\delta$ , рассчитанная по формуле (3.7), составляет 0,15.

Коэффициенты и показатели степени, входящие в регрессионную модель (рисунок 3.18), формула (3.11), определяются по критерию максимума коэффициента ее детерминации  $R^2$  совместным применением метода наименьших квадратов (МНК) и специально разработанного в Институте горного дела УрО РАН В.А. Антоновым нового численного метода оптимизации – метода приближений параболической вершины (МППВ) [247]. Доказано, что совместное применение МППВ и МНК обеспечивает устойчивый расчет показателей степени сложных степенных полиномов, а также параметров других сложных многомерных функций. Это позволяет задавать в общем виде функции уравнений регрессии и рассматривать их как математическое выражение факторов влияния на регрессию

природных или иных процессов. Такие уравнения называются функционально-факторными с самоопределяющимися параметрами (ФСП).

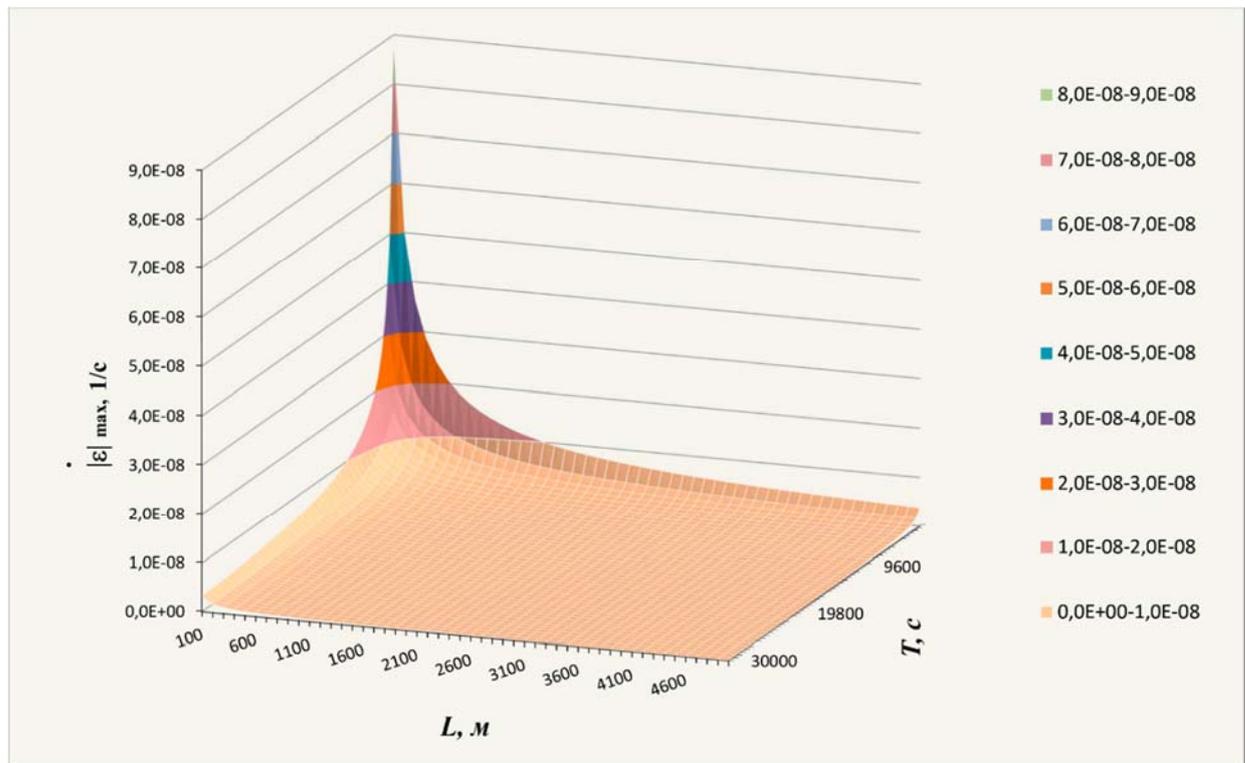


Рисунок 3.18 Поверхность регрессии максимального модуля скорости горизонтальных деформаций на основе измерений вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.

Практическое построение уравнений ФСП, оптимизированных МППВ, реализовано в программном обеспечении «Уравнения нелинейной регрессии, тренды двумерные функционально-факторные с самоопределяющимися параметрами и повышенной достоверностью (Тренды ФСП)», разработанной в ИГД УрО РАН [248]. В связи с тем, что показатели степени самоопределяются, исходя из особенностей распределения исходных данных, то установленные с их применением тренды распространяются в широких интервалах интерполяции и экстраполяции со значительно большей достоверностью по сравнению с традиционными трендами.

Функция (3.11) изменяется в направлении аргумента  $L$  при относительном его изменении  $\Delta L/L$  в  $K_1$  раз:

$$K_1 = (\Delta L/L + 1)^{-0,80}, \quad (3.12)$$

а в направлении аргумента  $T$  при таком же его относительном изменении в  $K_2$  раза:

$$K_2 = (\Delta T/T + 1)^{-0,84}. \quad (3.13)$$

При относительном увеличении каждого аргумента на 0,5 значение максимального модуля скорости деформации  $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$  уменьшается из-за увеличения реперного интервала в 0,72 раза, из-за увеличения времени регистрации – в 0,71 раза, а при совместном таком же их увеличении – в 0,54 раза.

Таким образом, максимальное значение модуля скорости горизонтальной деформации земной поверхности, обусловленной вариационной составляющей геодинамических движений, уменьшается в связи с изменением аргументов – ростом выбранного реперного интервала и времени регистрации в пределах относительной погрешности 0,15 по произведению соответствующих степенных функций так выпукло, что при единичных значениях интервала 1 м и времени регистрации 1 с равно  $7,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , а при относительном увеличении каждого аргумента на 0,5 уменьшается в направлении длины реперного интервала в 0,71 раза, в направлении времени регистрации – в 0,72 раза, приближаясь при совместном увеличении аргументов к нулевому значению.

Зависимости (3.6) и (3.11), отражающие уменьшение максимальных значений скоростей горизонтальных движений с увеличением расстояний и проявляющиеся не только для трендовой, но и для вариационной составляющей, согласуются с представлениями о иерархически блочном строении земной коры. Таким образом, на любом пространственно-временном уровне по мере увеличения длины реперного интервала механизм деформирования массива горных пород характеризуется переходом от условий, отображаемых моделью дискретной среды к условиям сплошной квазиупругой среды, когда количество блоков увеличивается и взаимные разнонаправленные подвижки структурных блоков компенсируются.

Полученные зависимости в распределении максимальных значений модуля скорости горизонтальных деформаций под воздействием трендовой и

вариационной составляющих геодинамических могут использоваться в качестве критериев для оценки уровня деформаций на различных пространственно-временных масштабах при выборе консолидированных блоковых структур для безопасного размещения объектов.

### **3.6 Исследование взаимосвязи деформационных параметров трендовой и вариационной составляющих**

Исследования взаимосвязи между деформационными параметрами трендовой и вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений основаны на сравнении главных компонент тензора деформаций, определяемых по результатам выявленных смещений. Измерения выполнены на пространственных базах до 6 километров на двух участках – в зоне техногенного влияния и вне ее. Выбор техногенного участка в данном случае обусловлен наличием интенсификации геодинамических движений, что сокращает временной интервал для трендовых измерений при отсутствии достаточного количества пунктов ГГС в пределах 6 км. Пространственные базы находятся в пределах ограничений метода определения деформаций для вариационной составляющей, изложенного в разделе 3.3.4, и соответствуют размерам площадок размещения ответственных объектов.

Первая экспериментальная площадка расположена на территории Олимпиадинского месторождения. Наблюдательная сеть состоит из семи реперов (рисунок 3.19), длины между которыми находятся в диапазоне 600-4000 метров.

Определены трендовые смещения пунктов за период 6 лет (2010-2016 гг.), координаты которых в обеих сериях получены спутниковыми методами. Смещения реперов определены относительно базовой точки АВК, которая привязана к пунктам Международной геодезической сети IGS и пунктам ФАГС в глобальной системе координат ITRF2014 и показала стабильность своего положения.

На пунктах сети также проведен непрерывный многочасовой мониторинг с использованием спутниковых систем, в результате которого получены параметры

вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений. В непрерывных сеансах наблюдений использовались двухсистемные (GPS - ГЛОНАСС) двухчастотные приемники геодезического класса Sokkia GRX-1. В многочасовой серии наблюдений задействовано 7 одновременно работающих приемников. Камеральная обработка временных рядов осуществлялась в модуле Motion Tracker программного комплекса Trimble Total Control через временные интервалы, равные 10 минутам, по методике, изложенной в разделе 3.3.3.

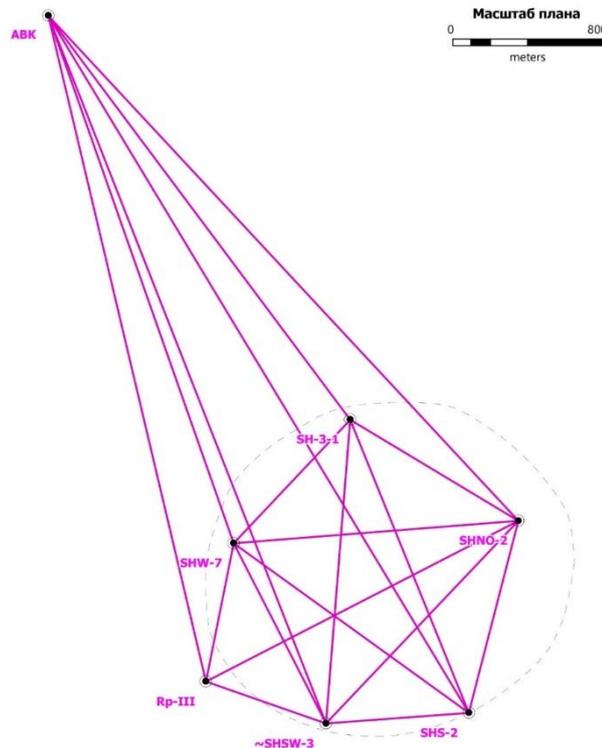


Рисунок 3.19 – Схема экспериментальной наблюдательной сети на Олимпиадинском месторождении

В результате обработки получены изменения горизонтальных компонент всех пространственных векторов сети через 10-ти – минутные интервалы, максимальные размахи которых за весь сеанс наблюдения представлены в таблице 3.3.

Определение максимально возможных изменений параметров напряженно-деформированного состояния массива под воздействием вариационной составляющей проведена согласно разработанному методу (раздел 3.3.4)

относительно условно неподвижного пункта АБК по аналогии с трендовыми движениями. Для получения максимальных векторов смещений пунктов использованы максимальные размахи (максимальные амплитуды  $A_{\max}$ , равные  $\Delta 2D_{\max}$ ) их смещений за сеанс непрерывных измерений из таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Максимальные изменения компонент пространственных векторов

Интервал	Длина, м	Дискретность измер., мин	Кол-во измерений	Максим.размах смещений по осям координат		
				$\Delta dN(\text{CIO}) \text{ max, м}$	$\Delta dE(\text{ЗВ}) \text{ max, м}$	$\Delta 2D \text{ max, м}$
ABK- RpIII	3667,0	10	42	0,014	0,010	0,014
ABK - SHW-7	2994,8	10	40	0,013	0,008	0,015
ABK - SH-3-1	2695,7	10	41	0,020	0,010	0,016
ABK - SHNO-2	3685,1	10	41	0,019	0,010	0,018
ABK - ~SHSW-3	4071,5	10	40	0,020	0,010	0,022
ABK- SHS-2	4354,7	10	40	0,017	0,012	0,020
RpIII - SHW-7	756,6	10	39	0,009	0,005	0,011
RpIII - SH-3-1	1600,9	10	40	0,010	0,006	0,011
RpIII - SHNO-2	1874,0	10	40	0,010	0,011	0,015
RpIII - ~SHSW-3	676,9	10	40	0,011	0,008	0,013
RpIII - SHS-2	1408,0	10	40	0,007	0,010	0,012
SHW-7 - SH-3-1	907,5	10	40	0,007	0,007	0,010
SHW-7 - SHNO-2	1520,1	10	40	0,014	0,009	0,017
SHW-7 - ~SHSW-3	1083,8	10	38	0,014	0,007	0,016
SHW-7 - SHS-2	1545,6	10	38	0,011	0,010	0,015
SH-3-1 - SHNO-2	1046,0	10	41	0,010	0,011	0,014
SH-3-1 - ~SHSW-3	1634,1	10	39	0,009	0,007	0,012
SH-3-1 - SHS-2	1693,0	10	39	0,009	0,011	0,014
SHNO-2 - ~SHSW-3	1494,3	10	39	0,007	0,008	0,011
SHNO-2 - SHS-2	1063,8	10	39	0,011	0,007	0,013
~SHSW-3 - SHS-2	761,6	10	40	0,010	0,006	0,012

Оценка преобладающего направления смещений реперов от их среднего за весь сеанс положения –  $\alpha_{\text{dominant}}$  проводилась методом сканирующего сектора (раздел 3.3.4). Получены роза-диаграммы распределения по частоте проявления дирекционных углов вектора смещения репера относительно его среднего положения за сеанс непрерывных (рисунок 3.20). Итоговые смещения реперов сети по осям координат, вычисленные по формулам (3.4) на основании определенных максимальных амплитуд  $A_{\max}$ , равных  $\Delta 2D_{\max}$ , и преобладающих направлений  $\alpha_{\text{dominant}}$ , приведены в таблице 3.4. Там же даны трендовые смещения этих пунктов за 6 лет.

На основании полученных векторов смещения трендовой и вариационной составляющих определены деформации для 20 треугольных элементов сети в соответствии с формулами (3.1–3.3). Главные компоненты тензора деформаций

( $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$ ) и угол  $\varphi$ , определяющий направление положения компоненты  $\varepsilon_{\max}$ , приведены в таблице 3.5, а графическое изображение этих параметров на рисунках 3.21 – 3.23.

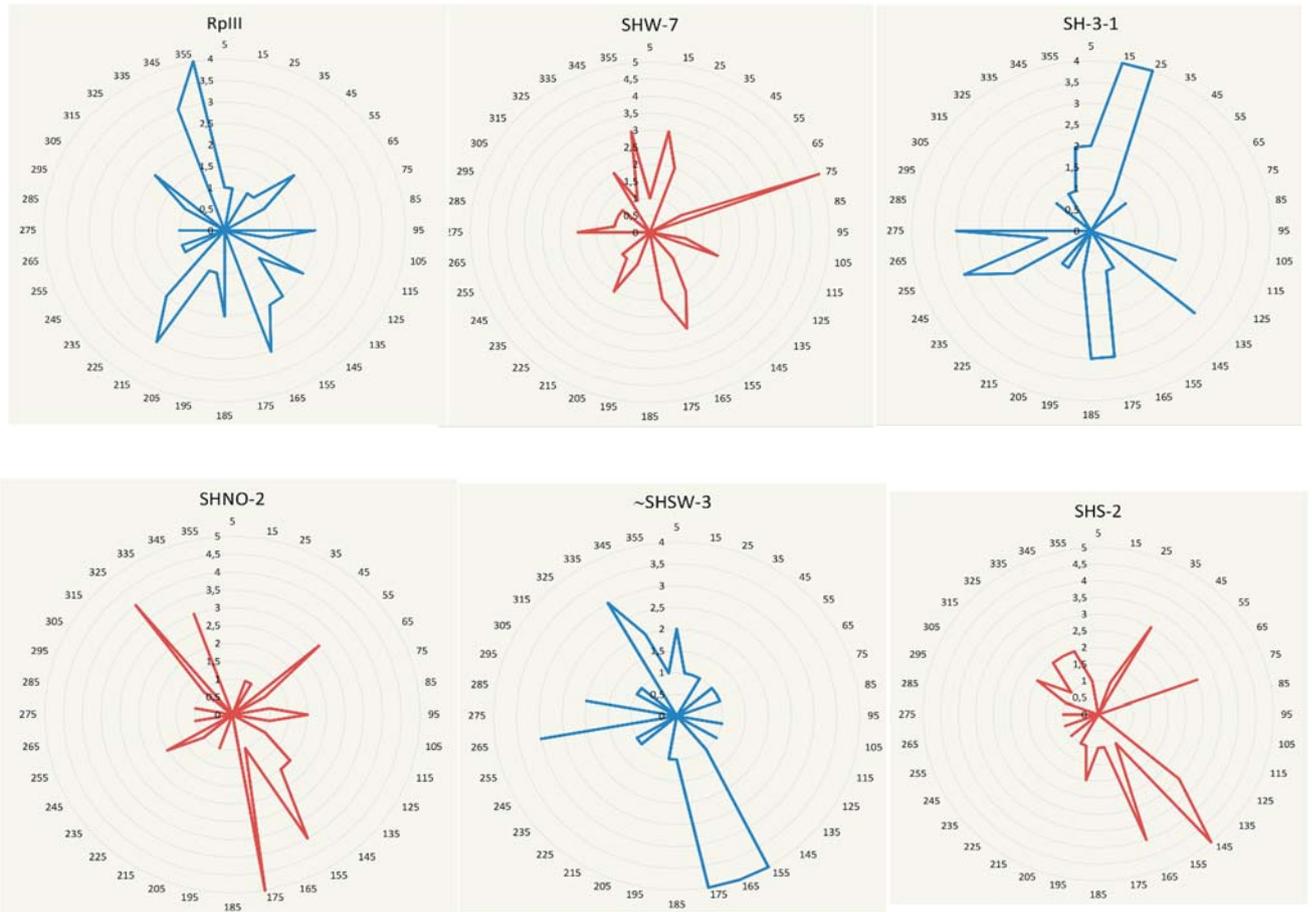


Рисунок 3.20 – Роза-диаграммы распределения дирекционных углов векторов смещений реперов относительно их среднего положения за сеанс измерений

Таблица 3.4 – Максимальные изменения компонент пространственных векторов

репер	Смещения по осям координат					
	трендовые		вариационные			
	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta 2D_{\max}$ ( $A_{\max}$ ), м	$\alpha$ dominant, °	$\Delta X_{\max}$ , м	$\Delta Y_{\max}$ , м
<b>RpIII</b>	0,007	0,029	0,014	355	0,014	-0,001
<b>SHW-7</b>	0,040	0,092	0,015	73	0,004	0,014
<b>SH-3-1</b>	-0,020	0,006	0,016	19	0,015	0,005
<b>SHNO-2</b>	-0,024	-0,084	0,018	175	-0,018	0,002
<b>~SHSW-3</b>	0,024	0,013	0,022	165	-0,021	0,006
<b>SHS-2</b>	0,028	-0,016	0,020	145	-0,016	0,011

Таблица 3.5 – Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		$\epsilon$ max	$\epsilon$ min	$\varphi, ^\circ$	$\epsilon$ max	$\epsilon$ min	$\varphi, ^\circ$
1	~SHSW-3 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,811E-04	-5,156E-05	137	4,064E-05	-8,019E-05	319
2	~SHSW-3 - SHW-7 - SH-3-1	-1,318E-05	-3,984E-04	209	2,626E-05	-1,309E-05	178
3	~SHSW-3 - SH-3-1 - SHNO-2	-1,327E-05	-8,290E-05	151	1,204E-04	-4,970E-06	39
4	~SHSW-3 - SHNO-2 - SHS-2	-1,780E-05	-6,955E-05	39	9,761E-06	-6,650E-06	19
5	SHS-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	-3,396E-05	-8,561E-05	331	3,983E-05	-6,032E-05	318
6	SHS-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	1,096E-04	-5,422E-05	144	1,254E-05	-1,607E-05	343
7	SHS-2 - SHW-7 - SH-3-1	1,427E-03	-1,851E-04	41	7,835E-05	6,359E-06	137
8	SHS-2 - SH-3-1 - SHW-7	1,199E-05	-5,765E-04	220	5,174E-05	-2,697E-04	222
9	SHNO-2 - ~SHSW-3 - SH-1(RpIII)	2,789E-03	-1,506E-04	139	5,865E-04	-2,218E-05	139
10	SHNO-2 - SH-1(RpIII) - SHW-7	5,657E-05	-1,287E-04	196	-7,978E-06	-1,672E-05	321
11	SHNO-2 - SHW-7 - SH-3-1	-7,078E-05	-5,373E-04	328	1,677E-05	-1,149E-04	322
12	SH-3-1 - SHW-7 - SH-1(RpIII)	6,178E-05	-2,154E-04	175	7,627E-06	-8,223E-05	222
13	SH-3-1 - SH-1(RpIII) - ~SHSW-3	-2,309E-05	-5,906E-05	217	8,559E-05	2,952E-06	40
14	SH-3-1 - ~SHSW-3 - SHS-2	-1,834E-05	-4,255E-05	142	2,706E-05	8,475E-06	162
15	SHW-7 - ~SHSW-3 - SHS-2	4,834E-05	-5,391E-05	144	3,571E-05	5,378E-06	147
16	SHW-7 - SHS-2 - SHS-2	-4,084E-05	-1,841E-04	221	7,346E-06	-3,882E-05	316
17	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHNO-2	5,326E-04	-9,218E-05	138	6,067E-05	-6,730E-04	225
18	SH-1(RpIII) - SHNO-2 - SHS-2	2,134E-05	-8,131E-05	42	4,529E-05	-1,782E-05	42
19	SH-1(RpIII) - SH-3-1 - SHS-2	-1,722E-05	-8,232E-05	317	1,464E-04	-2,838E-05	140
20	SHW-7 - SHNO-2 - ~SHSW-3	5,156E-05	-1,221E-04	158	5,946E-05	-1,600E-05	149

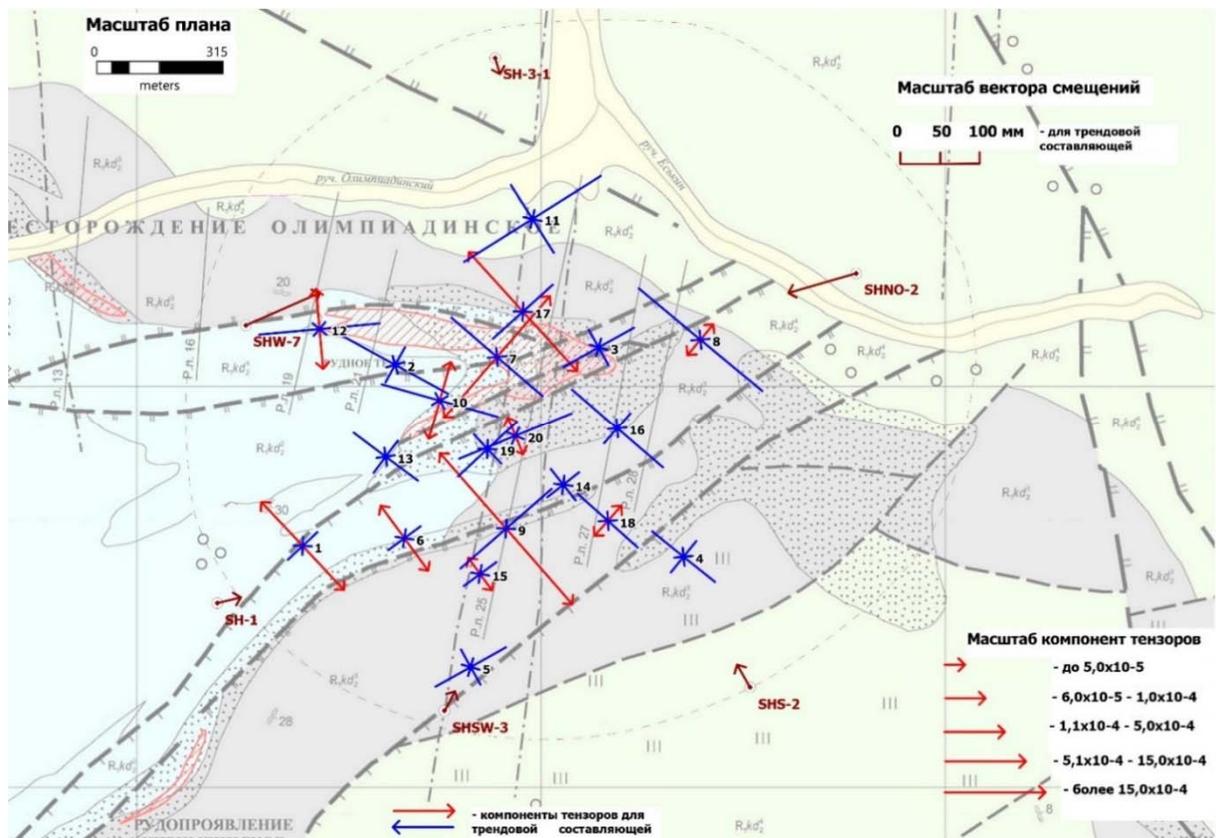


Рисунок 3.21 – Главные компоненты тензоров деформаций трендовых движений

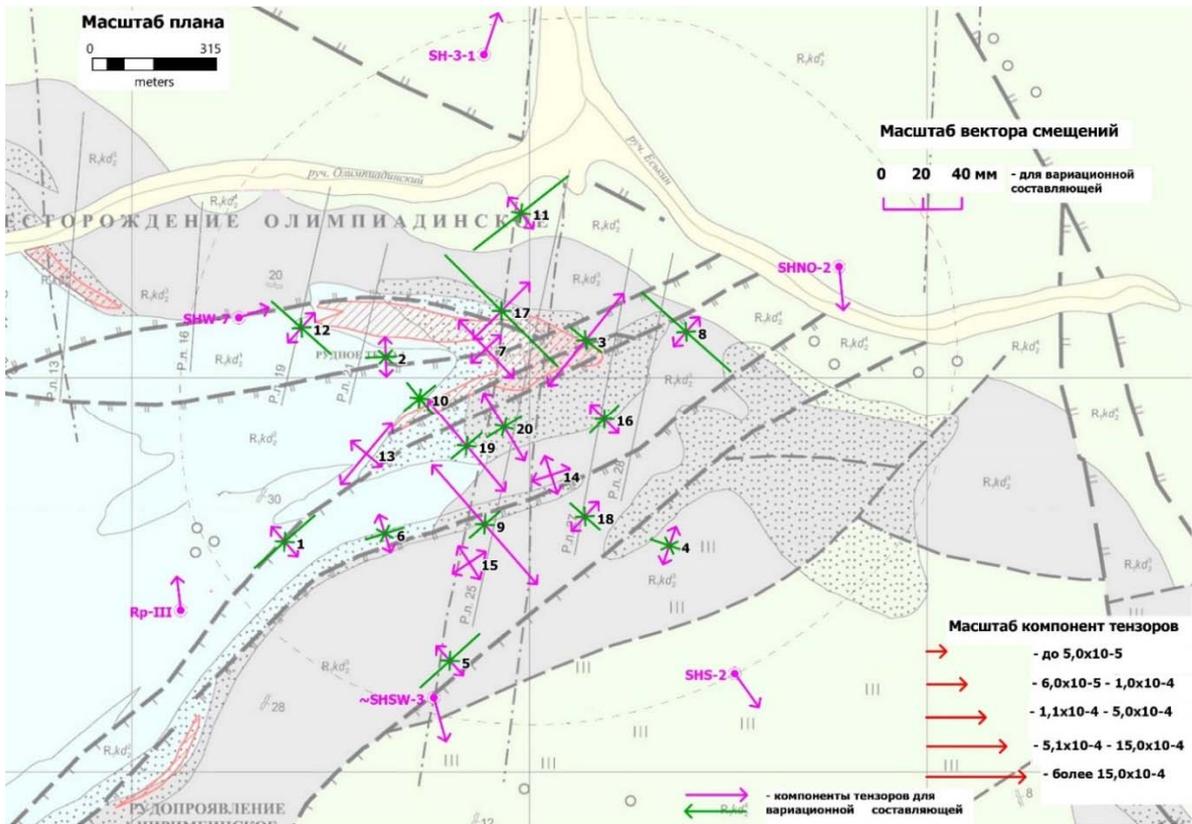


Рисунок 3.22 – Главные компоненты тензоров деформаций вариационной составляющей геодинамических движений

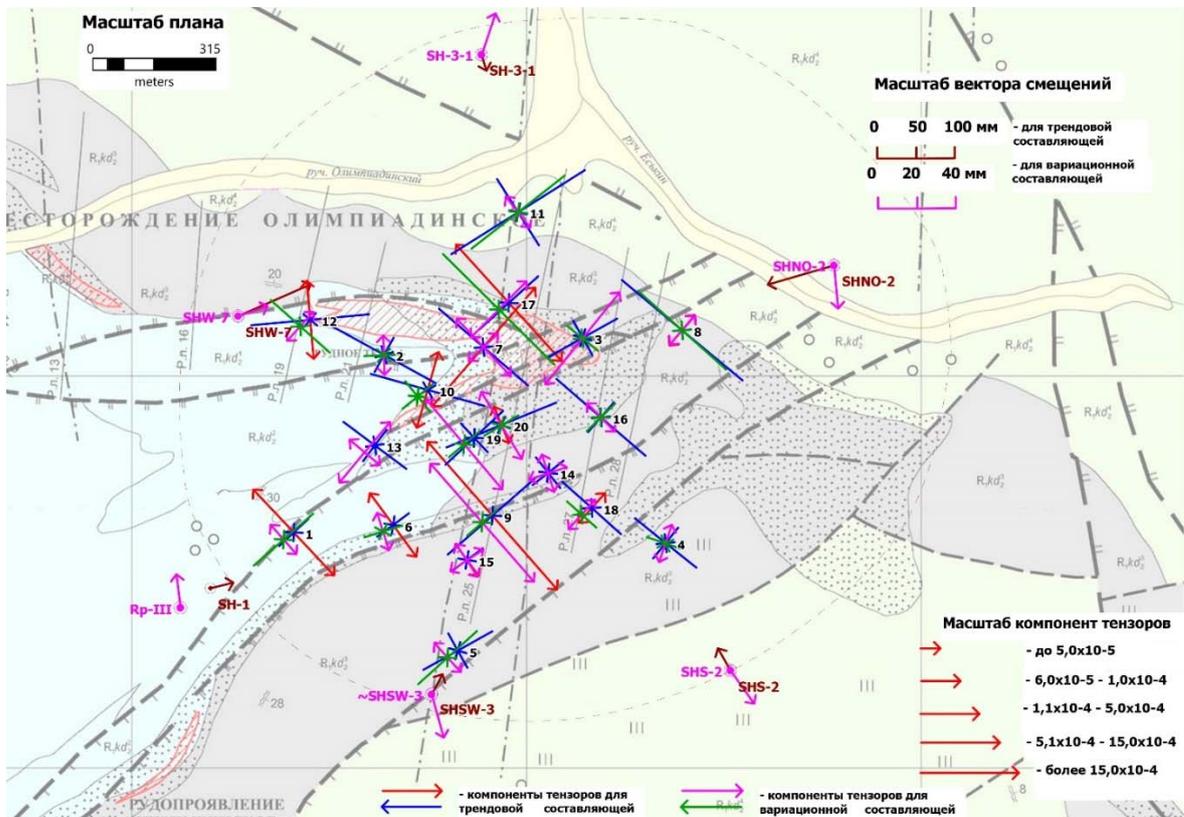


Рисунок 3.23 – Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений

Полученные результаты подтверждают, что максимальные значения горизонтальных деформаций, вызванных вариационной составляющей, могут быть сопоставимы с трендовыми деформациями за 6-летний период. Для трендовых деформаций максимальные компоненты  $\varepsilon_{\max}$  в равной степени носят как растягивающий, так и сжимающий характер, а минимальные компоненты  $\varepsilon_{\min}$  – только сжимающий. Максимальные компоненты  $\varepsilon_{\max}$  вариационных деформаций преимущественно все растягивающие, а минимальные  $\varepsilon_{\min}$  – сжимающие.

Из тензорного представления деформационных полей видно, что направления главных компонент тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих взаимосвязаны. В семнадцати треугольных элементах из двадцати совпадают направления главных компонент тензоров: в 12 треугольниках – в пределах 10 градусов, в 5 треугольниках – в пределах 20 градусов. Из семнадцати совпадающих тензоров тринадцать имеют совпадения в направлении положения компонент  $\varepsilon_{\max}$ , а в четырех тензорах – направление компоненты  $\varepsilon_{\max}$  для трендовых деформаций совпадает с  $\varepsilon_{\min}$  для вариационных и наоборот (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

тренд.	317	209	61	39	331	324	131	220	139	196	328	175	37	142	144	311	228	42	137	158
вариаци.	319	178	39	19	318	343	137	222	139	321	322	222	40	162	147	316	225	42	140	149
разность	-2	31	22	20	13	-19	-6	-2	0	-125	6	-47	-3	-20	-3	-5	3	0	-3	9

 - не совпадают

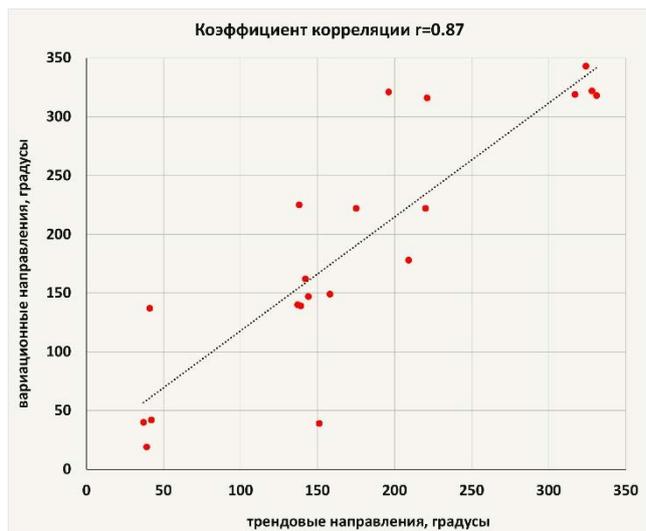
 - совпадают при  $\pm 180^\circ$

 - совпадают при  $\pm 90^\circ$

Коэффициент корреляции направлений главных компонент тензоров деформаций для двух составляющих движений равен  $r=0,87$  для случая совпадения только направлений компонент  $\varepsilon_{\max}$  (рисунок 3.24 а) и  $r=0,95$ , когда в дополнение учитываются совпадения трендовой  $\varepsilon_{\max}$  с вариационной  $\varepsilon_{\min}$  и наоборот (рисунок 3.24 б).

Взаимосвязь направлений главных компонент тензоров деформаций для двух составляющих движений была выявлена и на других экспериментальных площадках. Одна из таких площадок находится в северной части территории г. Рудный.

а)



б)

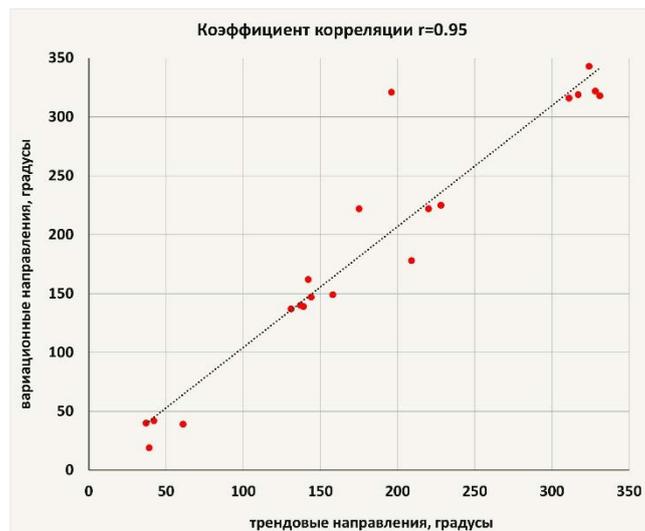


Рисунок 3.24 – Корреляционные поля направлений главных компонент тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих: а – учет совпадений только  $\varepsilon_{\max}$ , б – учет совпадений  $\varepsilon_{\max}$ , а также  $\varepsilon_{\max}$  с  $\varepsilon_{\min}$ .

В 2012-2017 гг. в ходе выполнения геомеханических исследований на этих месторождениях Институтом горного дела УрО РАН были получены трендовые движения пунктов ГГС в их окрестностях за период 45 лет с 1972 по 2017 гг. (рисунок 3.10), а также выполнены серии суточных и многочасовых непрерывных спутниковых измерений на этих пунктах (рисунок 3.14), которые были обработаны в соответствии с изложенными в данной главе методами для определения параметров вариационной составляющей геодинимических движений. Для проведения сравнения направлений главных компонент тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих был выбран указанный выше участок, состоящий из пяти пунктов ГГС. Основным критерием выбора участка являлось отсутствие масштабной техногенной нагрузки на него за прошедший 45-летний период и на современном этапе.

Полученные графические результаты сравнений приведены на рисунках 3.25 и 3.26, а числовые параметры тензоров деформаций в таблице 3.7.

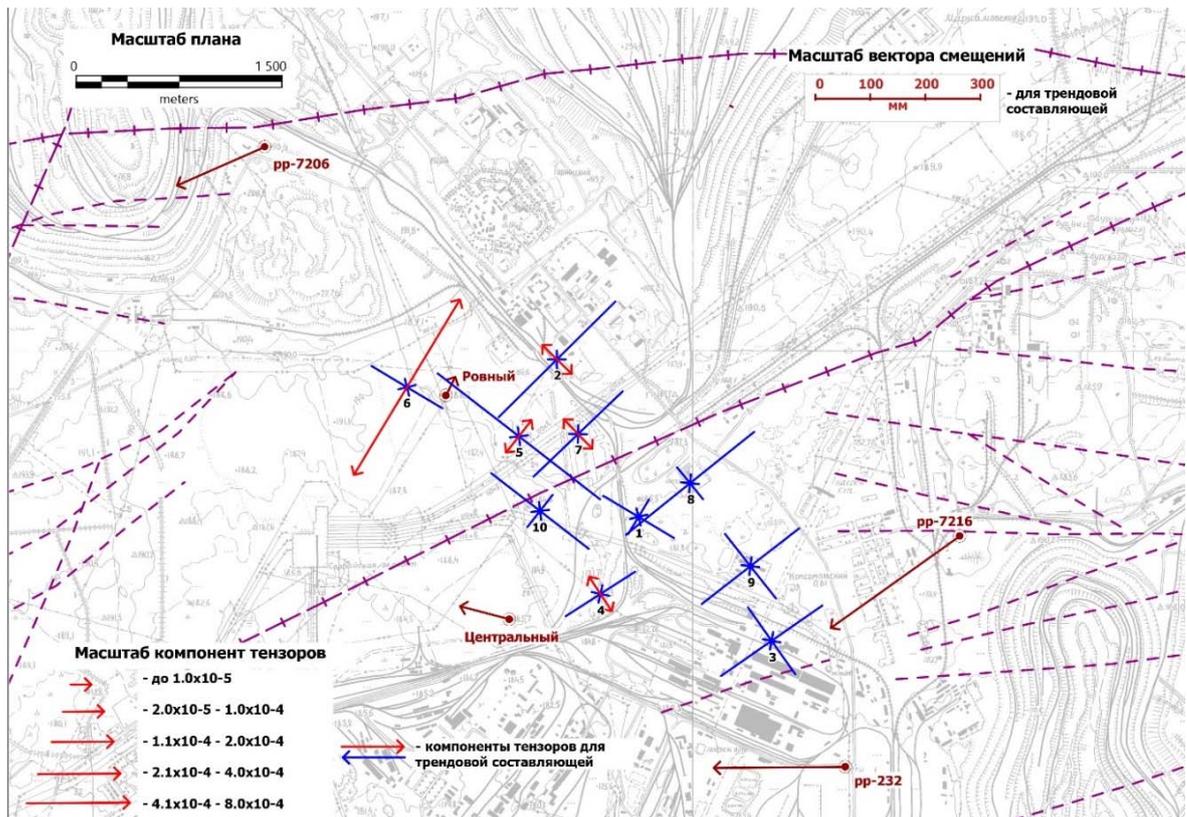


Рисунок 3.25 – Главные компоненты тензоров деформаций трендовых движений, г. Рудный, Казахстан

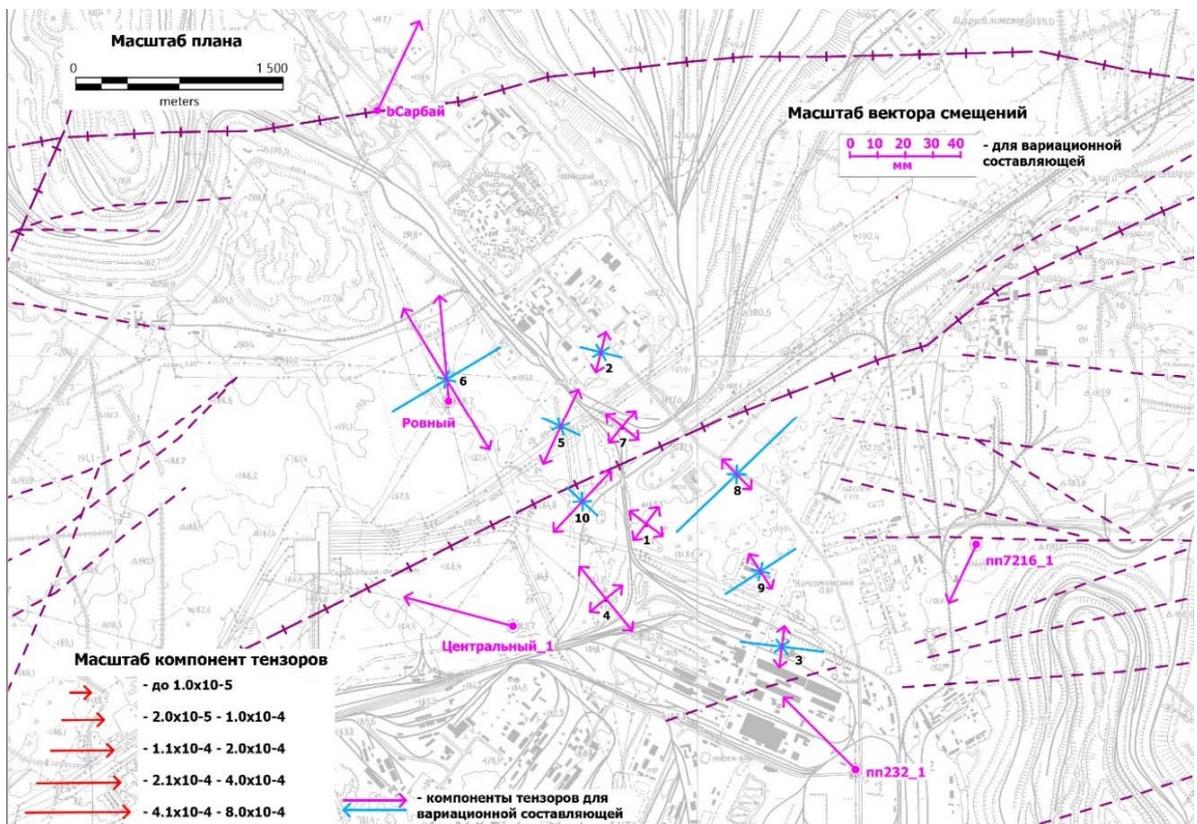


Рисунок 3.26 – Главные компоненты тензоров деформаций вариационной составляющей геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

Таблица 3.7 – Главные компоненты тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный, Казахстан

номер треуг-ка	Реперы	Деформации (трендовые)			Деформации (вариационные)		
		$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\min}$	$\varphi, ^\circ$	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\min}$	$\varphi, ^\circ$
1	pp7216 - Центральный - Ровный	-1,060E-05	-7,003E-05	211	1,451E-05	1,089E-06	217
2	pp7216 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,544E-05	-2,538E-04	315	1,086E-05	-7,301E-06	14
3	pp232 - pp7216 - Центральный	-4,717E-05	-1,307E-04	325	8,628E-06	-2,414E-05	7
4	pp232 - Центральный - Ровный	1,393E-05	-4,731E-05	147	2,942E-05	1,368E-06	141
5	pp232 - Ровный - pp7206(бСарбай)	1,193E-05	-7,739E-04	218	2,578E-05	-7,138E-06	25
6	pp7206(бСарбай) - Ровный - Центральный	4,298E-04	-1,690E-05	31	3,820E-04	-1,999E-04	329
7	pp7206(бСарбай) - Центральный - pp7216	9,614E-06	-2,025E-04	316	1,234E-05	7,252E-07	39
8	pp7206(бСарбай) - pp7216 - pp232	-9,231E-07	-3,142E-04	321	5,322E-06	-2,192E-04	316
9	Ровный - pp7216 - pp232	-3,522E-05	-1,929E-04	322	9,633E-06	-6,359E-05	327
10	Центральный - pp7206(бСарбай) - pp232	-1,287E-05	-1,204E-04	218	2,456E-05	-3,410E-06	43

Направления главных осей тензоров деформаций для двух составляющих геодинамических движений совпадают в пределах  $10^\circ$  в семи треугольных элементах из десяти: шесть совпадений по  $\varepsilon_{\max}$  и одно совпадение  $\varepsilon_{\min}$  для трендовой составляющей с  $\varepsilon_{\max}$  для вариационной составляющей движений. В трех треугольниках совпадения компоненты  $\varepsilon_{\min}$  трендовых движений с компонентой  $\varepsilon_{\max}$  для вариационных движений находятся в диапазоне  $28-48^\circ$  (таблица 3.8). Описанные взаимосвязи направлений главных компонентов тензоров деформаций для двух составляющих движений описываются коэффициентом корреляции  $r=0,99$  (рисунок 3.27).

Таблица 3.8 – Сравнение направлений главных компонент тензоров деформаций

тренд.	211	45	55	147	38	301	46	321	322	38
вариан.	217	14	7	141	25	329	39	316	327	43
разность	-6	31	48	6	13	-28	7	5	-5	-5

 - совпадают при  $\pm 180^\circ$

 - совпадают при  $\pm 90^\circ$

Таким образом, сравнение параметров двух составляющих геодинамических движений на одинаковых пространственных базах до шести километров, показало, что вариационная составляющая в своем максимуме может быть сопоставима с параметрами трендовых движений, а, следовательно, деформационные поля,

формируемые ею, при оценке геодинамической безопасности территорий должны приниматься в рассмотрение.



Рисунок 3.27 – Корреляционное поле направлений главных компонент тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений, г. Рудный

Установлена взаимосвязь с коэффициентом корреляции  $r$ , равным  $0,87-0,99$ , ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительный промежуток времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов. Данная взаимосвязь объясняется тем, что вариационные короткопериодные смещения происходят вдоль тренда, и, как показали исследования, частота отклонения репера за сеанс непрерывных измерений зачастую повышена в направлении тренда. Именно по частоте отклонения определяется преобладающий вектор смещения под воздействием вариационных движений.

Выявленная зависимость в ориентации тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющей движений дает возможность экспресс-оценки

изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород, что особенно эффективно при геодинамической диагностике территорий, на которых отсутствует возможность определения трендовых движений за длительный промежуток времени. Знание направлений главных величин тензора деформаций является важным моментом с точки зрения безопасного размещения объектов недропользования, поскольку сооружение, оси которого расположены вдоль главных линейных компонент тензора, не будет испытывать сдвиговых деформаций. Таким образом, учет временной изменчивости деформационных полей помогает избежать ошибок при выборе безопасных площадок для размещения объектов в условиях иерархической блочности и постоянной подвижности массива горных пород.

### **3.7 Выводы**

На основании современных научных представлений о природе геодинамических движений земной коры в иерархически блочном массиве горных пород их изучение при выборе площадок под размещение ответственных объектов недропользования необходимо проводить на различных пространственно-временных масштабах. Исследованиями охватываются территории от 100-150 км до 3-5 км. Различная частота опроса в измерениях позволяет определять трендовые (направленные) и вариационные (знакопеременные) движения.

Расширение временного диапазона в исследовании трендовых движений земной коры до 30-60 лет путем переопределения координат пунктов ГГС за этот период, в отличие от 3-5 лет, рекомендуемых нормативными документами, и исследование вариационной короткопериодной составляющей движений позволяет сократить время на выбор консолидированных блоков как мест безопасного размещения объектов при одновременном повышении эффективности.

Спутниковые методы являются универсальными методами, позволяющими определять горизонтальные деформации земной поверхности под воздействием

геодинамических движений не только в широком пространственном, но и временном диапазоне.

Критерием оценки горизонтальных деформаций земной поверхности для размещения ответственных объектов недропользования являются максимальные значения модуля их скорости. На основе спутниковых измерений получены зависимости модуля скорости горизонтальных деформаций трендовой, формула (3.6), и вариационной, формула (3.11), составляющих геодинамических движений для различных пространственных баз, позволяющие определять границы консолидированного структурного блока в иерархически блочной самоорганизующейся среде массива горных пород.

На основе разработанного метода оценки изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений выявлено, что в своем максимуме деформационные параметры сопоставимы с параметрами трендовых движений за многолетний период для одинаковых пространственных баз до шести километров.

Выявлена зависимость с коэффициентом корреляции более 0,8 в ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой составляющей геодинамических движений за длительных промежутков времени и вариационной короткопериодной составляющей, рассчитанных по данным измерений на основе спутниковых методов на пространственных базах 0,1-6,0 км. Это позволяет осуществлять экспресс-оценку изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по результатам вариационных короткопериодных смещений и определять направления главных осей тензоров деформаций, вдоль которых, как известно, отсутствуют сдвиговые деформации, что является важным аспектом с точки зрения безопасного размещения объектов недропользования.

## **4 МЕТОДИКА ВЫБОРА БЕЗОПАСНЫХ ПЛОЩАДОК ПОД РАЗМЕЩЕНИЕ ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ПО ГЕОДИНАМИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ**

### **4.1 Необходимые требования к учету геодинамического фактора при выборе площадок**

Методология инженерных изысканий для размещения, проектирования, строительства и эксплуатации объектов повышенного уровня ответственности, к которым относятся особо опасные, технически сложные и уникальные сооружения, должна базироваться в силу их специфики на системном научно-обоснованном подходе к их планированию и проведению. Комплексность осуществления всех видов инженерных изысканий по единой согласованной программе, их непрерывность на всех этапах жизненного цикла объекта (от изысканий для обоснования места его размещения до изысканий в период строительства и эксплуатации объекта), наличие нормативно-методического обеспечения, применение современных методов и оборудования для проведения изыскательских работ, научно-техническое сопровождение и различные виды поэтапных экспертиз проектной документации – являются основными принципами методологии [249].

Решение вопросов, связанных с выбором оптимальных мест размещения особо ответственных объектов, осуществляется на предпроектной стадии изысканий. Для разных типов объектов количество предпроектных этапов изысканий может быть различным. Предпроектные изыскания основываются на комплексном изучении района по основным группам факторов. При выборе АЭС решающую роль играют социально-экономические и экологические факторы: наличие источников электроэнергии и водоснабжения и необходимой инфраструктуры, соответствующие категории землепользования, отсутствие крупных городов в радиусе 30 км, а также природоохранных зон. Важную роль играют техногенные факторы, исключающие или ограничивающие возможность размещения АЭС: наличие подработанных территорий, опасных промышленных и

военных объектов, являющихся потенциальным источником возможных опасных аварий и явлений. Среди природных факторов первостепенную важность представляет сейсмичность, параметры современных движений земной коры, наличие опасных природных процессов (оползни, сели, лавины, цунами, карст) и гидрометеорологические условия (вероятность ураганов, тайфунов, смерчей, паводков).

Инженерно-геологические факторы, касающиеся геологического строения основания, свойств грунтов, гидрогеологических условий на стадии предпроектных изысканий играют менее решающую роль при выборе пункта размещения АЭС [249].

Таким образом, обеспечение геодинамической безопасности особо ответственных объектов определяется сейсмичностью территории и состоянием изученности современных геодинамических движений земной коры. Эти факторы занимают одну из главных позиций среди опасных природных явлений, которые необходимо учитывать при выборе мест размещения объектов повышенного уровня ответственности на предпроектной стадии инженерных изысканий. При обосновании сейсмичности площадок и выявлении потенциальных зон возможных очагов землетрясений рекомендуется обязательно учитывать параметры современных движений земной коры [114], потому что они наряду с сейсмичностью являются составляющими (медленной и быстрой) единого процесса – движения.

Как показано в 1 главе, в нормативных документах требования по учету современных движений земной коры при выборе площадок размещения ответственных объектов сводятся к оценке активности тектонических структур и определению геодинамически активных зон. Однако приведенные в них критерии оценки в полной мере не рассматривают фактор пространственно-временной изменчивости параметров геодинамических движений, которая обусловлена иерархически блочной структурой геологической среды. Критерии для ранжирования площадок по геодинамической опасности рассчитаны для различных пространственных баз [114], но не учитывают все доступные на

сегодняшний день для измерений временные масштабы наблюдательных систем и ограничиваются интервалами в несколько лет. Например, в действующих нормативных документах не рассматриваются параметры вариационной короткопериодной составляющей современных геодинамических движений.

Кроме того, для оценки степени пригодности территории представляется важным не просто оценить активность тектонических структур, но и выявить структурный блок в массиве горных пород, в пределах которого может быть размещен объект. Выявить такой блок возможно, как показано во второй главе, базируясь на модельных представлениях о иерархически блочной геологической среде как нелинейной динамической системе, в которой под действием геодинамических движений происходит явление консолидации или самоорганизация относительно стабильных структур, которые и являются оптимальными площадками размещения с геодинамической точки зрения.

Методика выявления консолидированного самоорганизовавшегося блока основывается на геодезических методах, которым предшествует анализ информации геоморфологического, геологического, структурно-тектонического, сейсмологического характера о массиве горных пород в районе размещения объекта. С помощью геодезических методов определяется напряженно-деформированное состояние геологической среды, формируемое широким пространственно-временным спектром геодинамических движений. Совместное рассмотрение деформационных полей, обусловленных воздействием трендовой и вариационной составляющими геодинамических движений на различных пространственных базах, позволяет обнаружить структурные консолидированные блоки различных размеров. Критерии для оценки деформационных параметров горизонтальных движений при определении границ блоков должны также базироваться на пространственно-временных зависимостях в их распределении. Такие зависимости получены в третьей главе работы.

Соответствующую пространственно-временную детальность в исследованиях обеспечивает комбинация спутниковых и наземных наблюдательных систем – наблюдения на основе ГНСС-измерений, высокоточное

нивелирование. Измерения могут носить не только мониторинговый характер, как рекомендовано в большинстве нормативных документах, но и проводиться экспресс-методами. Один из таких методов предложен в третьей главе работы.

#### **4.2 Этапы реализации методики и содержание работ**

В данном разделе представлены основные этапы реализации усовершенствованной методики выбора площадок под размещение объектов атомной энергетики (АЭС, подземные хранилища радиоактивных отходов), гидротехнического строительства (каскада ГЭС) по фактору современных геодинамических движений земной коры. Этапность и содержание работ регламентируются нормативными документами в этих областях. Предлагаемые усовершенствования заключаются в расширении временных масштабов геодезических измерений при изучении горизонтальных движений земной коры от внутрисуточного диапазона до периода, составляющего несколько десятилетий, что позволяет рассматривать формируемые движениями деформационные поля в широком пространственно-временном диапазоне и путем их сопоставления выбирать консолидированные структурные блоки под размещение объектов. Кроме того, использование данных временных масштабов позволяет провести оценку деформационных параметров геодинамических движений в экспресс-режиме в течение 1-2 серий наблюдений.

В рамках общей методики выбора площадок под ответственные объекты нормативами предусмотрена поэтапная многоуровневая оценка территорий. Так, например, при строительстве ГЭС – это исследования для обоснования схемы использования реки и для выбора места расположения створа плотины, водохранилища и других сооружений [249]. Для атомных объектов – это выбор приоритетного пункта в изучаемом районе и площадок в пределах этого пункта. Выбор площадки подразумевает три этапа изучения предполагаемой территории размещения, два из которых выполняются на стадии предпроектной подготовки и заканчиваются выбором оптимальной площадки ( $\sim 3 \times 3$  км), а третий этап

относится к стадии проектирования объекта, когда проводится детальное исследование площадки для обоснования оптимальных компоновочных решений по природным условиям, проекта каждого здания и сооружения. Ниже представлены основные виды исследований современных движений земной коры на каждом из трех этапов в соответствии с рекомендациями нормативных документов и предлагаемых усовершенствований.

*I этап: исследование района (~100 × 150 км) и выбор конкурентных пунктов (~10 × 15 км).*

На данном этапе проводится изучение геологического, структурно-тектонического строения района, выявление геоморфологических особенностей, анализ сейсмологических данных. Изучаются и анализируются топографо-геодезические материалы, фондовые материалы по вертикальным и горизонтальным движениям земной коры, данные спутниковых определений на постоянно действующих региональных ГНСС-станциях. Согласно нормативным документам, исследование района для выбора конкурентных пунктов ограничивается анализом данной информации. В плане усовершенствования методики выбора на данном масштабном уровне предлагается, опираясь на полученную информацию, исследовать трендовые движения за период, прошедший с момента заложения этих пунктов (30–60 лет). Для этого выбираются пункты ГГС (пункты триангуляции I–IV классов), равномерно покрывающие изучаемый район. Среднее расстояние между пунктами составляет 20–30 км.

По результатам переопределения координат выбранных пунктов ГГС спутниковыми методами вычисляются: векторы их горизонтальных смещений; скорости смещений; главные компоненты плоского тензора деформаций для системы базовых треугольных элементов с пунктами ГГС в их вершинах в соответствии с классическими решениями теории упругости; скорости горизонтальных деформаций.

Полученные параметры анализируются в соответствии с критериями выделения самоорганизовавшихся структур – однонаправленности векторов смещения, повышенных значений скоростей трендовых смещений и деформаций

на границах блоков. Оценка скоростей трендовых деформаций осуществляется на основании критерия (3.6). В результате определяются возможные границы консолидированных структур, на основании чего определяются 2-3 конкурентных пункта размещения ( $\sim 10 \times 15$  км), потенциально безопасных по геодинамическому фактору. Если с точки зрения социально-экономических, экологических, техногенных факторов на данном этапе не выбирается приоритетный пункт, то на следующем этапе конкурентные пункты в геодинамическом аспекте изучаются более детально.

*II этап: исследование конкурентных пунктов размещения ( $\sim 10 \times 15$  км), выбор приоритетного пункта и площадки ( $\sim 3 \times 3$  км) в пределах пункта.*

На II этапе исследований в геодинамическом аспекте проводится более детальное пространственно-временное изучение геодинамических движений в пределах конкурентных пунктов с целью определения безопасных площадок размещения ( $\sim 3 \times 3$  км). На данном этапе нормативными документами [112, 113] предусмотрены мониторинговые наблюдения за геодинамическими движениями на пункте (пунктах). Для этих целей в соответствии с нормативными методическими рекомендациями проектируется геодинамический полигон, на котором проводятся высокоточные спутниковые, нивелирные, гравиметрические, наклономерные измерения. Продолжительность мониторинговых наблюдений, согласно нормативным документам, должна составлять не менее трех лет, в течение которых должно быть выполнено не менее 5-6 циклов измерений [112]. Таким образом, пространственно-временной уровень таких исследований в среднем составляет 1-4 км по длине реперных интервалов и 3-6 месяцев – по периодичности.

Полигон проектируется на базе существующих пунктов ГГС на пункте и в его окрестностях и вновь закладываемых реперах в соответствии с выделенными при помощи геоморфологических, геологических и геофизических методов структурами. Среди геофизических методов применяется исследование интенсивности радон-тороновых эманаций, электрометрические исследования в различных вариантах, георадарные исследования и т.д. Нивелирная сеть

проектируется в виде замкнутого хода, расположенного вдоль границы пункта и линиями, пересекающими полигон вкрест потенциально активным тектоническим нарушениям.

В ходе мониторинговых наблюдений на данном пространственно-временном уровне определяются по данным спутниковых измерений параметры горизонтальных геодинамических движений, перечисленные в предыдущем разделе, а также параметры вертикальных движений: амплитуды вертикальных смещений, скорости, градиенты скоростей движений. Оценка полученных параметров производится согласно соответствующим данному пространственно-временному уровню критериям (3.6).

На данном пространственном уровне становится возможным определение вариационных короткопериодных движений согласно методике, представленной в разделе 3.3.3. Определение параметров этих движений также позволяет оценить активность тектонических нарушений и выявить границы консолидированных структурных блоков в других временных границах. Необходимость определения параметров вариационных движений обусловлена их способностью влиять на сооружения через усталостные эффекты и на массив горных пород, переводя его в тиксотропное состояние. Таким образом, результатами исследования этих движений являются: максимальные амплитуды смещений за сеанс непрерывных измерений, максимальные деформации, а также изменение поля деформаций под воздействием максимальных смещений, определяемое в соответствии с разработанным методом (раздел 3.3.4). Оценка таких деформаций осуществляется согласно критерию (3.11).

Результатом такого комплекса исследований является выбор приоритетной площадки для размещения в пределах пункта (пунктов) по геодинамическому фактору.

*III этап: исследование площадки (~3 × 3 км).*

Изыскания, которые проводятся на данном этапе, направлены на детальное изучение выбранной площадки в геологическом, гидрогеологическом, сейсмологическом и геодинамическом аспектах с целью получения материалов,

необходимых для обоснования компоновки зданий и сооружений, принятия конструктивных и объемно-планировочных решений, проектирования сооружений инженерной защиты, проведения расчетов оснований, фундаментов и конструкций и т.д. Изыскания базируются на обширном комплексе геофизических исследований, буровых работ и лабораторных испытаний.

В плане изучения современных движений земной коры нормативными документами регламентируется сгущение плановой и высотной сети наблюдений: создание полигонов II класса нивелирования и локальных плановых построений различных конфигураций в зависимости от поставленных задач в отношении изучения активности выявленных тектонических нарушений. Также предусмотрено увеличение периодичности до 6-8 циклов за 2-2,5 года наблюдений [112].

Исследования короткопериодной составляющей геодинамических движений (раздел 3.3.3) в пределах выбранной площадки позволяют определить численные значения смещений и деформаций в массиве горных пород в основании объектов в данном временном масштабе. Это необходимо для прогноза их воздействия на устойчивость и безопасность сооружений, который производится путем сопоставления выявленных деформаций с допустимыми значениями, регламентируемыми нормативными документами [98, п.10.67]. Возможность определения в экспресс-режиме направлений главных линейных деформаций (раздел 3.6) на базе разработанного метода оценки напряженно-деформированного состояния под воздействием короткопериодных движений (раздел 3.3.4) позволяет проектировать расположение зданий и сооружений в местах площадки с минимальным воздействием на них деформаций сдвигового характера. А в отсутствии такой возможности фундаменты и конструктивные элементы объекта должны быть рассчитаны на безопасное восприятие дополнительных нагрузок и деформаций, вызываемых современными геодинамическими движениями.

### 4.3 Некоторые особенности реализации и условия применения методики

Методические аспекты определения параметров геодинимических движений как спутниковыми, так и наземными методами зависят от требуемой точности измерений и регламентируются соответствующими геодезическими инструкциями и указаниями. Параметры трендовой и вариационной короткопериодной составляющих движений, необходимость определения которых важна при выборе мест размещения ответственных объектов, определяются в соответствии с методиками, изложенными в разделах 3.3.2 и 3.3.3. Поэтому в данном разделе акцентируется внимание на некоторых особенностях применения методик, которые не были достаточно освещены в указанных разделах и касаются настроек спутникового оборудования, выбора программного обеспечения и конфигурации наблюдательных сетей.

На сегодняшний день спутниковые методы измерений являются универсальным инструментом для выявления геодинимических движений в широком пространственно-временном диапазоне, в том числе для определения трендовых и вариационных короткопериодных смещений. Возможность получать смещения на максимально достоверном и точном уровне зависит, в первую очередь, от используемого спутникового оборудования и программного обеспечения для обработки измерений. обеспечения.

Современные спутниковые приемники – это многочастотные многоканальные устройства, принимающие сигналы минимум от двух спутниковых группировок (GPS, ГЛОНАСС) с частотой дискретизации, достигающей 50 Гц. Поэтому основным трудноустраняемым источником ошибок при спутниковых измерениях является эффект многолучевости, которому должно уделяться повышенное внимание, особенно при выявлении короткопериодных смещений внутрисуточного масштаба. Ослабление и выявление переотраженных сигналов достигается с помощью специальных, антенн (групп антенн), установок, симуляторов, корреляторов и методик наблюдения и обработки. При выявлении и отбраковке спутников, несущих некачественный сигнал, уменьшается общее их

число, что влияет на геометрию созвездия и, как следствие, на общую точность измерений. В связи с этим лучше использовать спутники двух группировок, если это качественным образом позволяет используемое программное обеспечение.

От особенностей программного обеспечения зависит выбор частоты дискретизации сигнала в приемнике. Если для определения трендовых движений значение этого параметра не очень значимо, то для вариационных короткопериодных движений оно имеет большое значение. Для выявления короткопериодных смещений методом относительного позиционирования в ходе непрерывного мониторинга этот параметр должен составлять не менее 0,5 Гц при интервале обработки временного ряда, равном 10 минутам. При уменьшении интервала обработки ряда частота дискретизации должна быть увеличена до 1-5 Гц и выше. Однако многочасовые файлы с частотой дискретизации выше 1 Гц имеют большой объем памяти и не доступны для обработки некоторым видам устаревшего программного обеспечения, в том числе специализированного.

Для определения параметров трендовых движений допустимо использование любого современного коммерческого программного обеспечения (ПО). Также коммерческое ПО может быть использовано для выявления вариационных короткопериодных движений при длине обработки временного ряда, превышающей 10 минут. При длине обработки, равной 10 минутам и меньше, для достоверного результата необходимо использовать либо особые методы обработки, либо применять научное программное обеспечение (например, пакет WayPoint GrafNav) или специальные программы для отслеживания движущихся объектов (например, модуль Motion Tracker пакета Trimble Total Control, 4D Control Trimble). В качестве особого метода обработки, повышающего достоверность выявления смещений, можно использовать метод наложения интервалов, предложенный в работе [228] и опробованный на практике.

Опыт, касающийся выбора пунктов ГГС для исследования параметров трендовых движений на территории района строительства площадью  $100 \times 150$  км, позволяет отметить некоторые особенности процесса. Как правило, на освоенной территории такой площадью имеют место геодезические пункты всех классов

Государственной геодезической сети от первого до четвертого классов, а также многочисленные пункты полигонометрии. При высокой обеспеченности района геодезической основой в исследовательский процесс современных движений земной коры достаточно включения пунктов I-III классов. Их достаточно для относительно равномерного покрытия всей территории района, и данные классы триангуляции наиболее надежны с точки зрения определенных начальных координат геодезических пунктов. В среднем на территории  $100 \times 150$  км находится около 250 пунктов I-III классов, т.е. при их равномерном распределении на каждый из них приходится в среднем около  $50 \text{ км}^2$  (рисунок 4.1). Для задачи обобщенной оценки района изыскания по фактору современных движений земной коры в исследованиях может быть использовано не более 20 % от имеющихся пунктов.

Как отмечено в разделе 3.3.3, определение параметров вариационных короткопериодных движений производится в режиме непрерывных наблюдений, производимых одновременно несколькими приемниками спутниковой геодезии. Все условия применения методики определения таких движений приведены в указанном разделе. За рамками обсуждения остался вопрос количества используемых в одном сеансе наблюдений приемников. Обычно для наблюдений выбирается наилучший временной интервал приема спутниковых сигналов в течение суток, который составляет 6-9 часов. Количество пунктов наблюдения определяется двумя факторами. Во-первых, необходимым числом измеряемых базовых линий (отрезок, ограниченный двумя пунктами наблюдений), имеющих разную направленность, что позволяет определить направления движений. Достаточно надежно оценить параметры подвижности возможно по 3-4 базовым линиям одной направленности. Полную оценку движений производят по трем направлениям – по двум взаимно перпендикулярным направлениям и по третьему промежуточному. Следовательно, минимально необходимое количество наблюдаемых базовых линий должно находиться в пределах 9-12. Вторым фактором является общее количество имеющихся в наличии приемников. Необходимым условием является использование приемников равноценного класса.

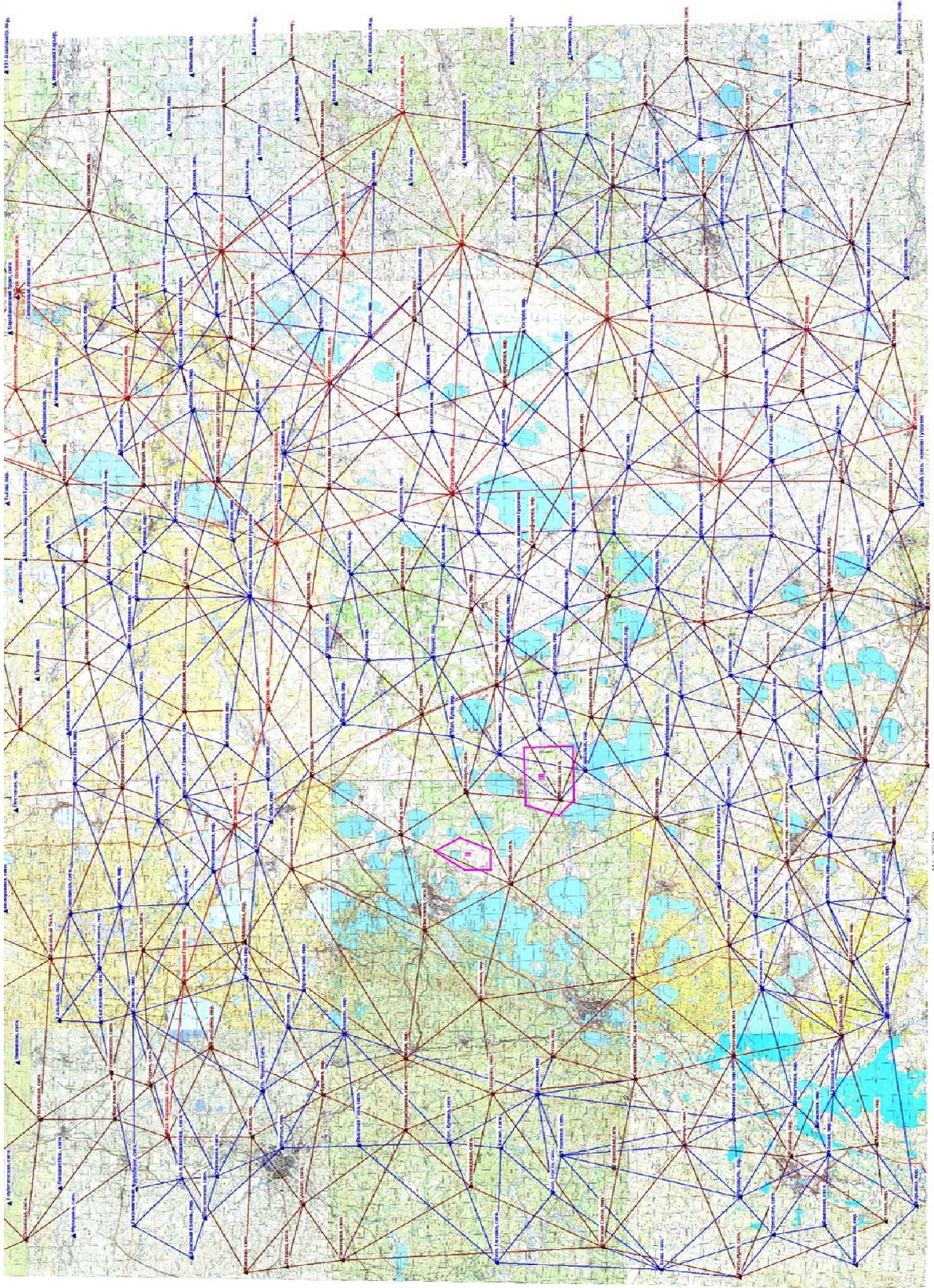


Рисунок 4.1 – Государственная геодезическая сеть триангуляции района строительства АЭС

Число базовых линий «С» с количеством пунктов «n» взаимосвязано формулой, определяющей число сочетаний из «n» элементов по «m»:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (4.1)$$

где  $C_n^m$  - число сочетаний (число базовых линий) из n элементов (пунктов) по m (по два);

n – число пунктов;

m – число пунктов в сочетании.

В соответствии с формулой (4.1) уже при пяти приемниках (пунктах наблюдения) может быть получено необходимое количество базовых линий – 10. При шести приемниках – 15, а при семи – 21. Таким образом, использование 5-7 приемников является оптимальным вариантом.

Наиболее рациональной конфигурацией сети при 5-7 приемниках является четырехугольник или правильный шестиугольник, вписанный в окружность диаметром около 3 км с центральным пунктом (рисунок 4.2). При таком расположении наблюдениями будут охвачены все направления.

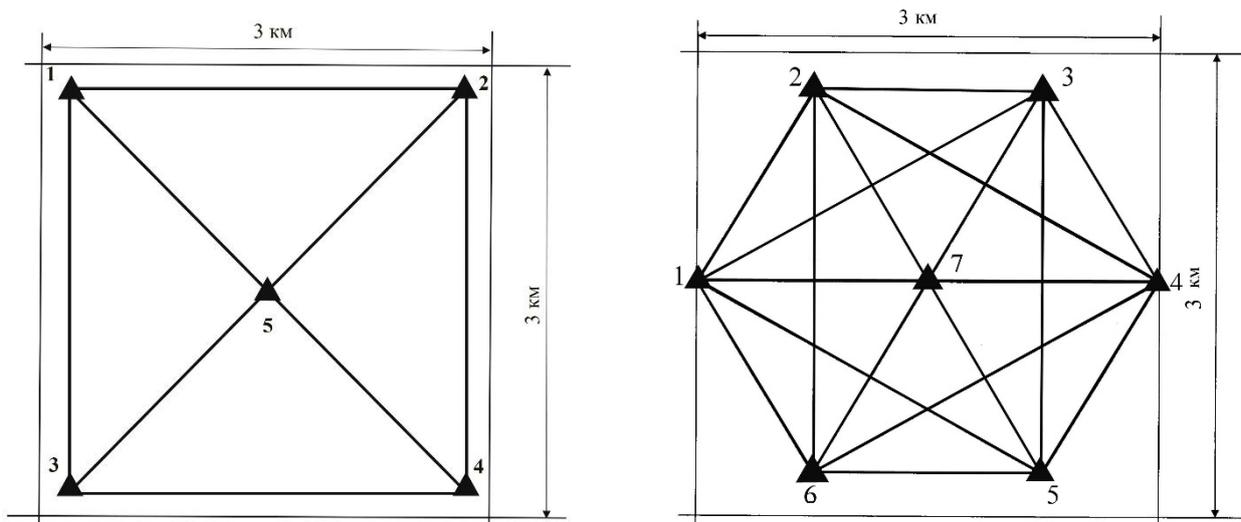


Рисунок 4.2 – Схемы расположения пунктов для исследования вариационных короткопериодных движений земной коры при использовании 5 и 7 приемников

Такие наблюдательные станции на исследуемых площадках должны быть увязаны с расположением тектонического нарушения, чтобы часть пунктов располагалась по одну его сторону, а другая часть – по другую. Для геодинамического исследования протяженного разлома или нарушения вдоль него может располагаться цепочка таких построений.

Для оценки стабильности определяемых параметров вариационной короткопериодной составляющей движений необходимо проводить две серии наблюдений.

Параметры вариационной составляющей рекомендуется оценивать только для горизонтальных компонент получаемого базового вектора. Определение вертикальной компоненты на хорошем уровне точности требует дополнительных исследований.

Также с осторожностью необходимо относиться к высотам пунктов ГГС, полученных в ходе определения их трендовых движений спутниковыми методами, что отмечалось и обсуждалось в разделе 3.3.2.

#### **4.4 Опыт применения методики при выборе площадки под размещение Южно-Уральской АЭС**

Предпроектные изыскания по выбору благоприятной площадки сооружения Южно-Уральской АЭС проводились под руководством ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», создавшего творческое сотрудничество из более пятнадцати научных и производственных коллективов, разносторонняя специализация которых обеспечила успешное решение поставленной задачи. Исследования ИГД УрО РАН были посвящены выбору благоприятной площадки строительства ЮУАЭС по фактору современных движений земной коры.

В соответствии с результатами проведенных исследований природных и техногенных условий конкурентных районов размещения ЮУАЭС приоритетным был выбран район размером 110 км в меридиональном направлении и 130 км в широтном (рисунок 4.3). Исследования геодинамических движений проведены геодезическими и геофизическими методами в рамках двух этапов методики

выбора площадок, обозначенных в разделе 4.2. В результате были выбраны две площадки для дальнейшего детального изучения.

Анализ фондовых материалов показал, что изучение современных геодинамических движений на Урале осуществлялось с 1915 по 1980 гг. путем проведения высокоточного повторного нивелирования с периодичностью от 11 лет до 51 года. Вариации годовых скоростей определялись в пределах от минус 3 мм/год до плюс 7 мм/год. Непосредственно в районе размещения ЮУАЭС годовые скорости вертикальных движений оценивались в пределах  $\pm 1$  мм/год. На Среднеуральском полигоне в период 1983 – 1986 гг. скорости вертикальных движений оценивались от 30 до 50 мм/год.



Рисунок 4.3 – Район строительства ЮУАЭС (110 × 130 км)

Ввиду высокого уровня обеспеченности района пунктами ГГС I-IV классов (рисунок 4.1) проведено исследование трендовых движений за период около 40 лет. Из 250 пунктов ГГС для наблюдений выбрано 48 пунктов I-III классов. По результатам рекогносцировочных работ переопределение координат произведено на тридцати одном триангуляционном пункте ГГС: на десяти пунктах I класса, на семнадцати пунктах II класса и на четырех пунктах III класса.

По результатам расчетов направление горизонтальных смещений пунктов за 40 лет преимущественно восточное и северо-восточное (рисунок 4.4). На западном

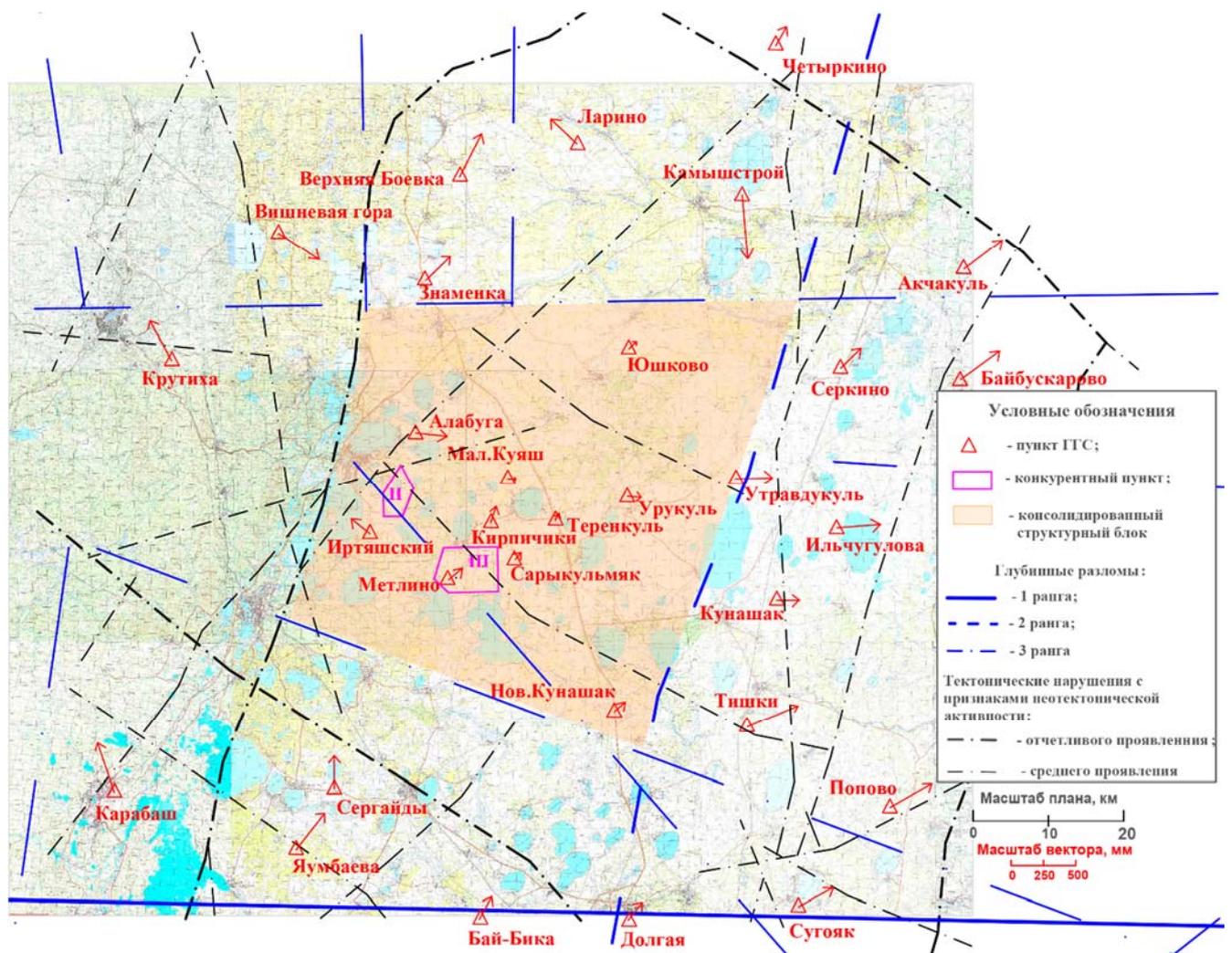


Рисунок 4.4 – Векторы горизонтальных трендовых движений пунктов ГГС в районе размещения ЮУАЭС

фланге смещения имеют северо-западное направление. В целом, распределение векторов смещений по всей территории свидетельствует о проявлении достаточно

крупных блоков, сохраняющих относительно согласованные движения. Вместе с тем, среди них встречаются блоки меньших размеров, имеющие свои подвижки (пункты Ларино и Камышстрой), не согласующиеся с окружающими блоками. В центральной части района выделяется консолидированная блоковая структура, ограниченная глубинными разломами 2 и 3 ранга [250] и тектоническим нарушением с признаками новейшей активности [251]. Пункты, находящиеся в центре этого блока, имеют минимальные по району горизонтальные смещения в диапазоне 20-113 мм, направление которых согласовано. Средние годовые скорости смещений на этом участке от 0,5 до 3,0 мм/год. Пункты, расположенные ближе к границе блока, имеют скорости 6,0-10,0 мм/год.

Распределение главных линейных компонент плоского тензора деформаций, полученных для системы из 47 треугольных элементов с пунктами ГГС в их вершинах и длинами сторон 20-30 километров, показывает, что наибольшие их значения зафиксированы на северном и северо-восточном участке района, где максимальные растягивающие значения компоненты  $\varepsilon_{\max}$  достигают  $19,6 \cdot 10^{-5}$  (рисунок 4.5), а сжимающие значения компоненты  $\varepsilon_{\min}$  – минус  $4,5 \cdot 10^{-5}$ . В центральной части района деформации находятся в пределах  $1 \cdot 10^{-5}$  за 40 лет, то есть максимальная скорость деформаций составляет  $2 \cdot 10^{-7}$  в год. Это не превышает максимальных значений модуля скоростей деформаций для интервалов 20-30 км в соответствии с зависимостью (3.6). Вертикальные движения имеют скорости 1–1,25 мм/год. Относительно неоднозначностей в сравнении высот пунктов, определяемых традиционными и спутниковыми методами, было упомянуто ранее в разделе 3.3.2, и, в связи с этим, часть пунктов при рассмотрении конечных результатов была отбракована.

Таким образом, центральная часть района, находящаяся в пределах консолидированного блока размерами около  $55 \times 60$  км, была рекомендована в качестве благоприятной для выбора конкурентных пунктов. Два пункта с размерами  $7 \times 4$  км (пункт II) и  $6 \times 8$  км (пункт III) были выбраны в качестве таковых по фактору технического водообеспечения и другим природным и социальным факторам. Пункт III рассматривался как наиболее благоприятный.

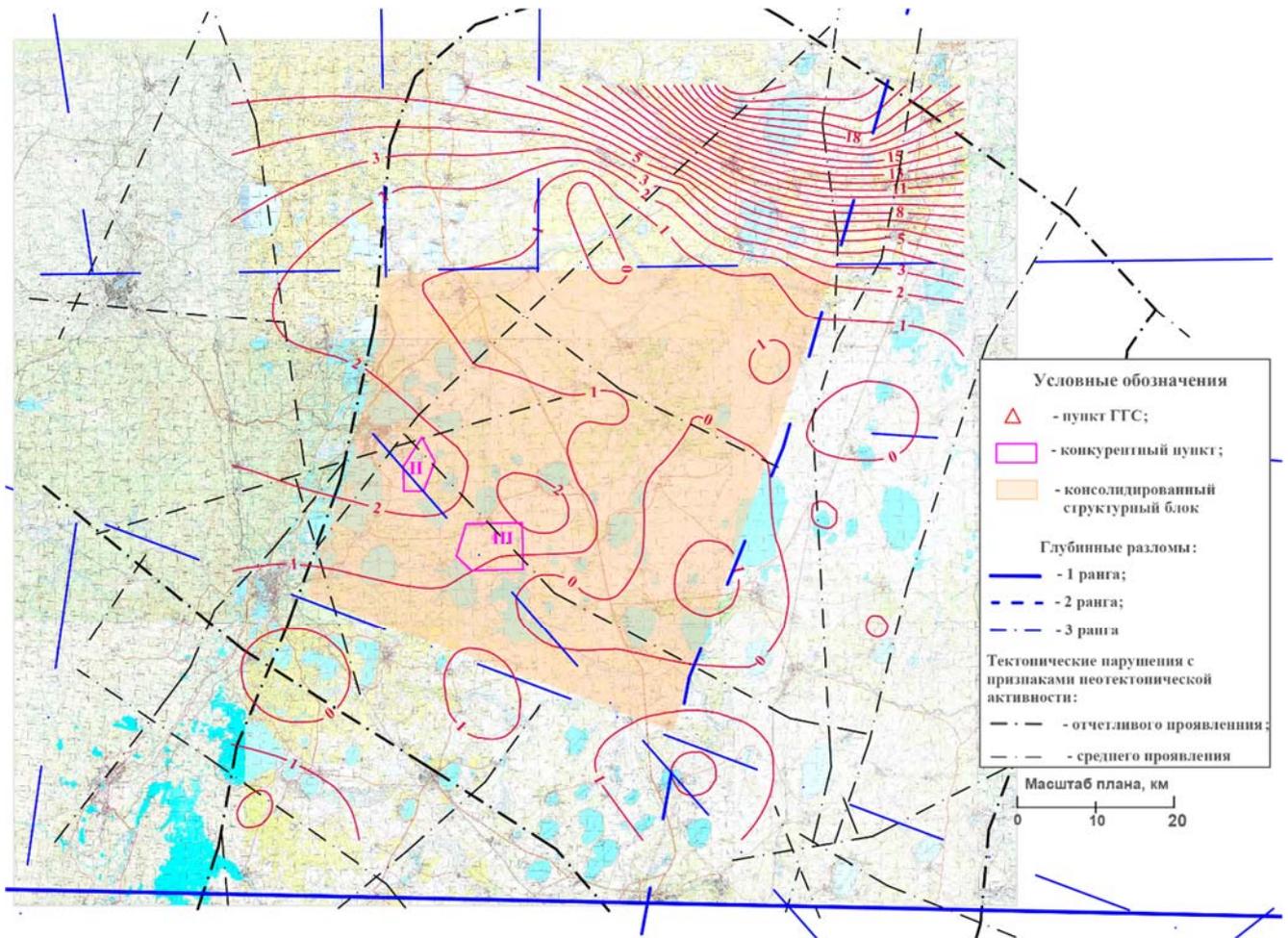


Рисунок 4.5 – Распределение главных максимальных линейных деформаций в районе размещения ЮУАЭС,  $\varepsilon_{\max}, 10^{-5}$

При исследовании пунктов для выбора приоритетной площадки на втором этапе были изучены вариационные короткопериодные движения и проведены рекогносцировочные геофизические работы по изучению структуры массива горных работ. Мониторинговые геодезические наблюдения наземными методами на альтернативных пунктах в рамках конкретно данной работы не выполнялись.

На каждом пункте проведено два повторных цикла непрерывных измерений, состоящих из одной расстановки пяти ГНСС-приемников (А1–А5) на пункте II и четырех расстановок шести-семи ГНСС-приемников (В11–В46) на пункте III (рисунки 4.6, 4.7). Территория пункта III покрыта более плотной сетью наблюдений с разнонаправленными векторами (расстояниями между приемниками) длиной от 700 до 3900 м, обеспечивающими полную картину

распределения интегральных деформаций. Расстояния между приемниками на пункте II составили 1000-2000 м.

Смещения определялись через 15-ти минутные интервалы в течение 5-6 часов. Полученные смещения на всех интервалах не были синхронными, согласованными во времени. Деформации каждого интервала носили сугубо индивидуальный характер, чего и следовало ожидать, учитывая блочное строение массива горных пород. На обоих пунктах зафиксировано преобладание меридиональных горизонтальных смещений, максимальные амплитуды которых в два раза превышают широтные смещения.

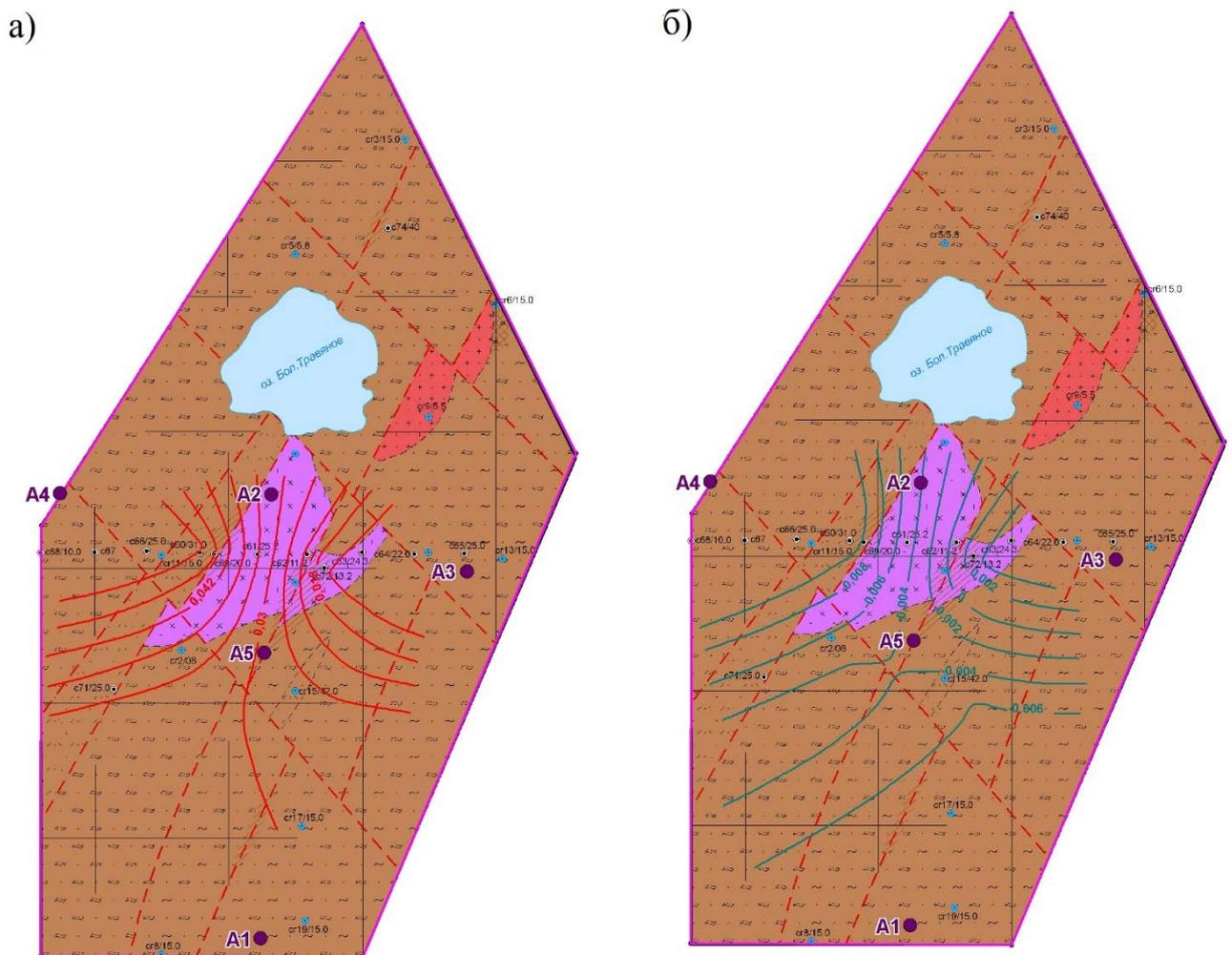


Рисунок 4.6 – Распределение главных линейных деформаций на пункте II:  
 а – максимальных –  $\varepsilon_{\max}$ ,  $10^{-3}$ ; б – минимальных –  $\varepsilon_{\min}$ ,  $10^{-3}$

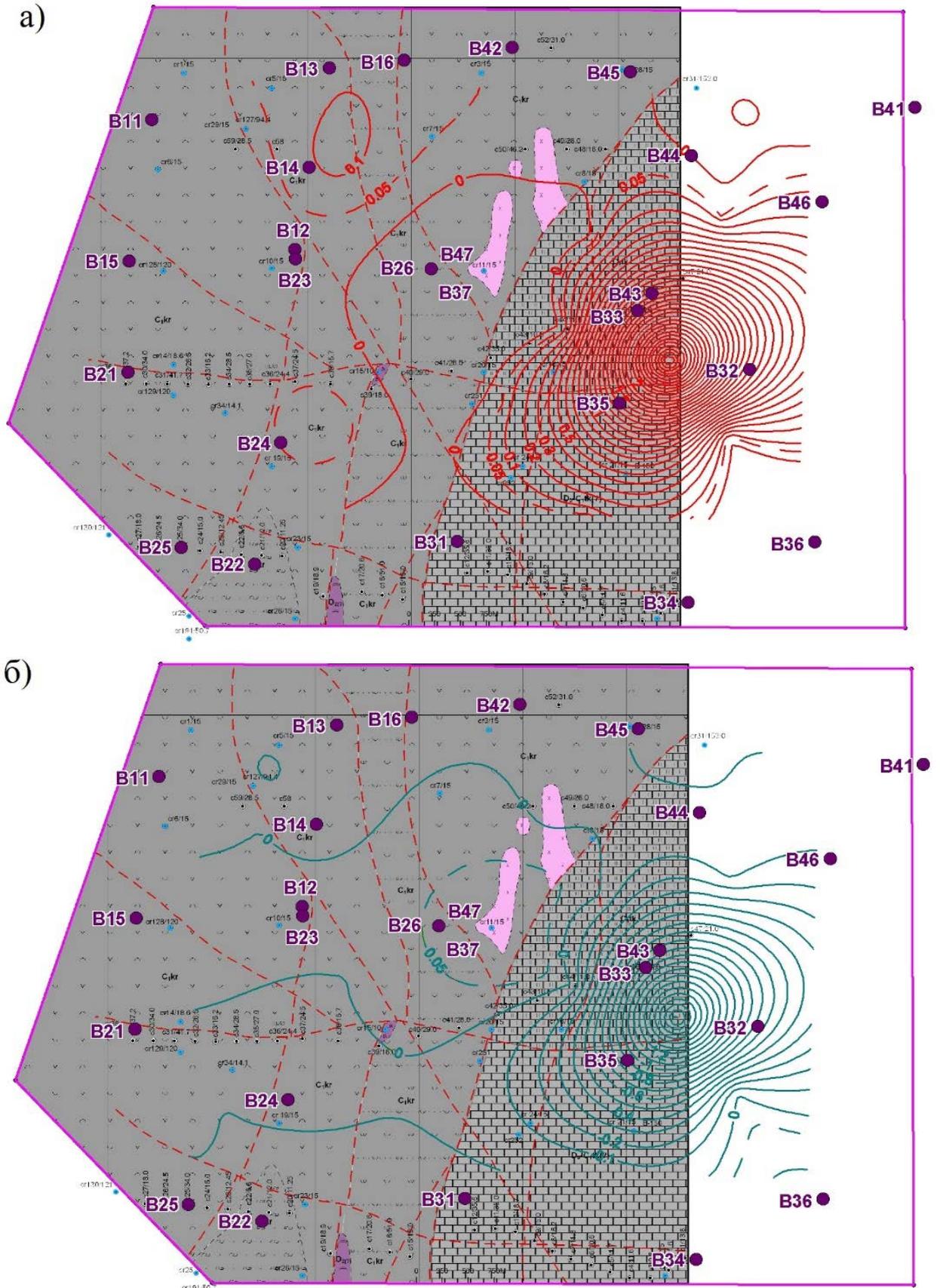


Рисунок 4.7 – Распределение главных линейных деформаций на пункте III:  
 а – максимальных –  $\varepsilon_{\max}$ ,  $10^{-3}$ ; б – минимальных –  $\varepsilon_{\min}$ ,  $10^{-3}$

Параметры тензоров деформаций массива горных пород, вызванных вариационной короткопериодной составляющей движений, определялись с помощью разработанного метода, изложенного в разделе 3.3.4. Максимальные главные деформации на обоих пунктах все растягивающие и наибольшие их значения составляют  $5,1 \cdot 10^{-5}$  на пункте II и  $3,3 \cdot 10^{-3}$  – на пункте III. Минимальные главные деформации преимущественно сжимающие, наибольшие их значения на пункте II составляют минус  $1,1 \cdot 10^{-5}$  и  $2,1 \cdot 10^{-3}$  – на пункте III (рисунки 4.6, 4.7).

Максимальные скорости деформаций на пункте II находятся на уровне значений, рассчитанных в соответствии с формулой (3.11) для соответствующих пространственных и временных интервалов, и не превышают значений  $8,9 \cdot 10^{-10}$  –  $1,0 \cdot 10^{-9}$  с<sup>-1</sup>.

На пункте III на восточном фланге существует локальная зона, расположенная на территории залегания карбонатных пород, в которой скорости горизонтальных короткопериодных деформаций значительно превышают максимальные значения, рассчитанные по формуле (3.11). За исключением этой зоны территории обоих пунктов II и III пригодны для безопасного размещения ЮУАЭС и по фактору современной геодинамической активности практически равноценны.

Результаты изучения структурных особенностей массивов горных пород геофизическими методами показали, что на пункте III в вулканической толще блочная первоначальная структура больше сохранена по сравнению с массивом пород пункта II, где он нарушен тектоническими процессами в большей мере. Это обстоятельство позволяет отдать предпочтение пункту III.

Таким образом, в западной половине пункта III возможно выделение двух равноценных площадок – северо-западной и юго-западной. Границей их может быть субширотное тектоническое нарушение, проходящее в центральной части (рисунок 4.8). Какое-либо промежуточное западное расположение, в котором бы это нарушение оказалось внутри площадки, нецелесообразно.

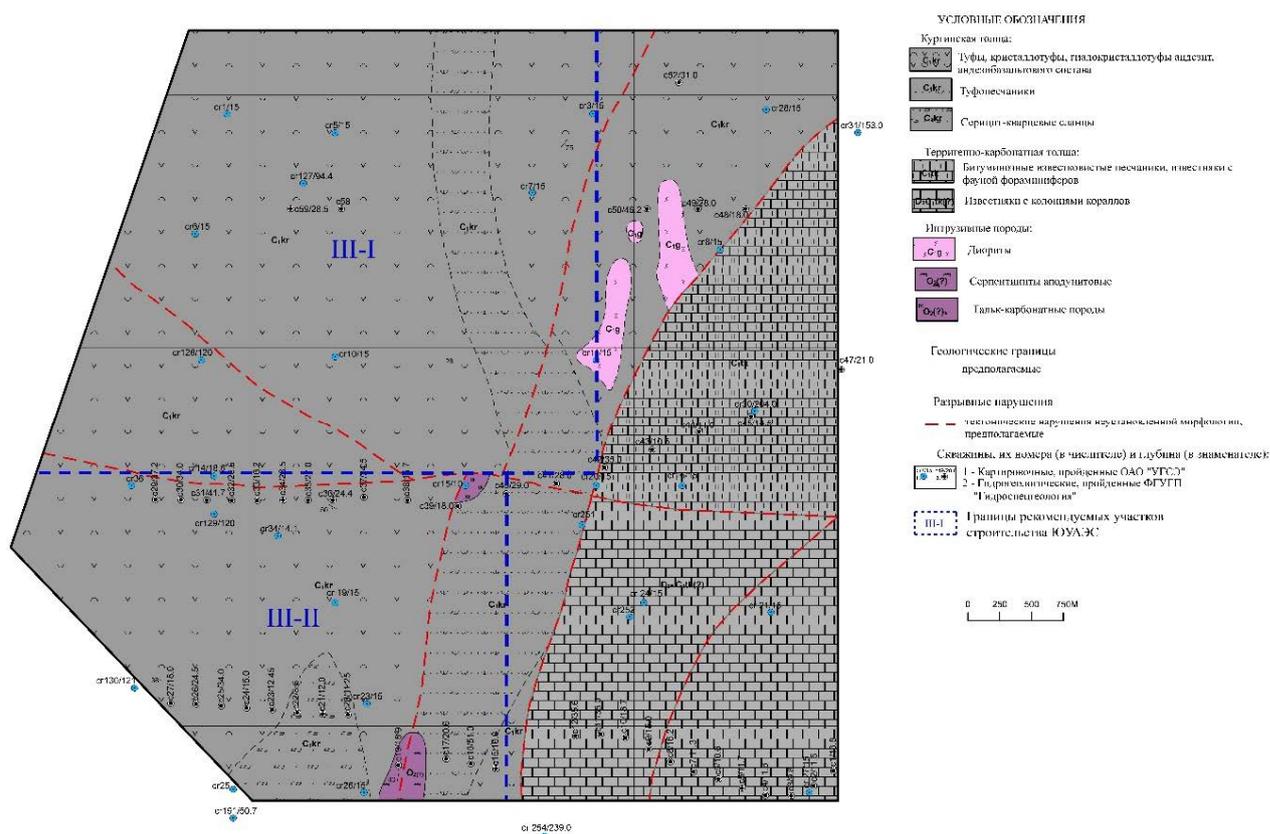


Рисунок 4.8 – Рекомендуемые площадки строительства III-I и III-II на пункте III

Таким образом, на пункте III может быть принята одна из двух площадок (III - I или III - II), равноценных по фактору геодинамической активности. Выбор может быть осуществлен с учетом других факторов.

#### 4.5 Выводы

Выбор оптимальных мест размещения особо ответственных объектов, осуществляется на предпроектной стадии инженерных изысканий и основывается на комплексном изучении района по основным группам факторов – социально-экономическим, экологическим, техногенным и природным.

Среди природных факторов значимая роль отводится оценке сейсмичности территории и изученности современных геодинамических движений земной коры.

При выборе площадок под размещение АЭС предусмотрено поэтапное исследование территории: район ( $\sim 100 \times 150$  км), пункт ( $\sim 10 \times 15$  км), площадка ( $\sim 3 \times 3$  км). На каждом этапе содержание работ по изучению современных геодинамических движений регламентируется нормативными документами и направлено на оценку активности тектонических структур и выявлению геодинамически активных зон. Однако критерии оценки в полной мере не рассматривают фактор пространственно-временной изменчивости параметров геодинамических движений.

Предлагаемые усовершенствования в методике исследования горизонтальных движений земной коры заключаются в расширении временных масштабов геодезических измерений от внутрисуточного (вариационная составляющая движений) до периода, охватывающего несколько десятилетий (трендовая составляющая движений). Это позволяет рассматривать формируемые движениями деформационные поля в широком пространственно-временном диапазоне и путем их сопоставления выбирать консолидированные структурные блоки под размещение объектов согласно критериям, полученным в третьей главе работы.

Трендовая составляющая геодинамических движений определяется на этапе исследования района ( $\sim 100 \times 150$  км), вариационная составляющая – при исследовании пунктов ( $\sim 10 \times 15$  км) и площадок ( $\sim 3 \times 3$  км). Изучение современных движений земной коры в данных пространственно-временных масштабах в сочетании с геофизическими исследованиями является по сути экспресс-диагностикой геодинамической активности территории размещения ответственного объекта, на основании результатов которой планируются детальные мониторинговые геодезические наблюдения.

Эффективность предлагаемых усовершенствований при оценке территории по фактору современных геодинамических движений проверена при выборе площадки под размещение Южно-Уральской АЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной научно-практической задачи, связанной с выбором безопасных мест размещения особо ответственных объектов недропользования по фактору воздействия современных геодинамических движений.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснован подход к выбору безопасного участка размещения объектов недропользования по фактору современных геодинамических движений с точки зрения модельных представлений о иерархически блочной геологической среде как открытой динамической системе, в которой присутствуют явления самоорганизации, способствующие образованию консолидированных относительно стабильных пространственно-временных геологических структур.

2. Предложены критерии выделения геодезическими методами консолидированных структурных блоков как безопасных мест размещения объектов недропользования, заключающиеся в совместном рассмотрении деформационных параметров двух составляющих современных движений земной коры – трендовой и вариационной короткопериодной – при поэтапном уменьшении пространственных баз от ста километров до сотен метров. Учет именно этих двух составляющих позволяет не только расширить спектр доступных для наблюдений современными методами движений и выявить обусловленные ими потенциально опасные деформации, но и определить границы консолидированного блока в короткие сроки на предпроектной стадии инженерных изысканий.

3. Получены пространственные и временные зависимости распределения модуля скорости горизонтальных деформаций трендовой и вариационной короткопериодной составляющих геодинамических движений на пространственных базах от 0,1 до 100 километров. Данные зависимости возможно использовать в качестве критерия оценки деформаций для выявления

консолидированного структурного блока в иерархически блочной самоорганизующейся среде массива горных пород.

4. Установлена взаимосвязь ориентации главных осей тензоров деформаций трендовой и короткопериодной вариационной составляющих геодинамических движений. Это дает возможность экспресс-оценки направлений, по которым отсутствуют сдвиговые деформации, что важно для безопасного размещения объекта.

5. Разработан метод оценки изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород под воздействием вариационной короткопериодной составляющей геодинамических движений.

6. Усовершенствована методика выбора безопасных участков размещения ответственных объектов недропользования по фактору современных геодинамических движений, расширяющая временные масштабы геодезических измерений при изучении горизонтальных движений земной коры, учитывающая пространственно-временные закономерности их распределения в иерархически блочной среде массива горных пород и позволяющая в короткие сроки выполнить геодинамическую диагностику территории и определить благоприятную площадку для дальнейшего ее детального исследования в режиме мониторинговых наблюдений.

7. Проведена практическая проверка методики выбора площадок под строительство объектов Южно-Уральской АЭС, показавшая, что предлагаемые подходы к геодинамической диагностике позволяют выявить неблагоприятные участки на земной поверхности и избежать размещения на них ответственных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сашурин, А. Д. Истоки и пути предотвращения природно-техногенных катастроф в сфере недропользования / А. Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле : доклады международной конференции (5-8 июля 2005 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2005. – С. 242-247.
2. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов недропользования / Ю. О. Кузьмин, В. А. Чуриков, А. С. Фарафонов // Промышленная безопасность и экология. – 2006. – № 3. – С. 39-45.
3. Сашурин, А. Д. Уровень обеспеченности геодинамической безопасности объектов атомной энергетики / А. Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12. – С. 214-218.
4. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю. О. Кузьмин. – Москва : Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
5. Kuzmin, Yu. O. Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale / Yu. O. Kuzmin // Geodynamics & Tectonophysics. – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 401-443.
6. Kuzmin, Yu.O. Recent geodynamics of dangerous faults. / Yu. O. Kuzmin // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 709-722.
7. Тагильцев, С. Н. Выделение активных тектонических структур на территории г. Екатеринбурга / С. Н. Тагильцев, А. Ю. Осипова, А. Е. Лукьянов // Геомеханика в горном деле : доклады научно-технической конференции (14-15 октября 2009 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2009. – С. 28-36.
8. Тагильцев, С. Н. Комплексование геологических и техногенных признаков для выявления ориентировки главных напряжений / С. Н. Тагильцев, А. Ю. Осипова, А. Е. Лукьянов // Геомеханика в горном деле : доклады научно-технической конференции (12-14 октября 2011 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2012. – С. 44-52.

9. Гуляев, А. Н. Проявления современной геодинамики на территории Екатеринбурга / А. Н. Гуляев / Геомеханика в горном деле : доклады научно-технической конференции (14-15 октября 2009 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2009. – С. 148-157.

10. Гуляев, А. Н. Процессы в активном слое земной коры как возможная причина аварий на линиях подземных коммуникаций / А. Н. Гуляев, А. Ю. Осипова // Геомеханика в горном деле : доклады научно-технической конференции (12-14 октября 2011 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2012. – С. 100-105.

11. Осипова, А. Ю. Исследование геодинамической активности геологической среды г. Екатеринбурга : диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.08 / Осипова Анастасия Юрьевна; [Место защиты: Ур. гос. гор. ун-т]. – Екатеринбург, 2010. – 160 с.

12. Сашурин, А. Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы / А. Д. Сашурин // Геомеханика в горном деле : доклады международной конференции (19-21 ноября 2002 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2003. – С. 180-191.

13. Панжин, А. А. Методы мониторинга короткопериодных деформаций массива горных пород / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле : доклады международной конференции (19-21 ноября 2002 г.). – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2003. – С. 59-69.

14. Селюков, Е. И. Краткие очерки практической микрогеодинамики / Е. И. Селюков, Л. Т. Стигнеева. – Санкт-Петербург : Питер. – 2010. – 175 с.

15. Рябоштан, Ю.С. Современная нестабильность литосферы и безопасность трубопроводных коммуникаций и инфраструктур / Ю.С. Рябоштан, Е.И. Селюков и др. // Нефтегазовое дело : научно-технический журнал. – 2003. – Том 1, №1.

16. Геодинамика. Основы кинематической геодезии / С. П. Войтенко, И. Л. Учитель, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин. – Одесса : Астропринт, 2007. – 254 с.

17. Учитель, И. Л. Разрушительные свойства геодеформаций / И. Л. Учитель. – Одесса : Астропринт. – 2010. – 222 с.

18. Перспективы мониторинга высокочастотных геодеформаций спутниковыми методами / И. Учитель, В. Корбан, В. Ярошенко, Б. Капочкин, Н.

Кучеренко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011.– Вип. II (22). – С. 212-217.

19. Учитель, И. Геодеформационный процесс и региональные риски / И. Учитель, В. Ярошенко, Б. Капочкин // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. I (23). – С. 108-114.

20. Учитель, И. Л. Необходимость учета разрушительных асейсмических деформаций при разработке технологий строительства / И. Л. Учитель, Б. Б. Капочкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/7 (73). – С.52-57.

21. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций /под общ. ред. В.А. Пучкова ; [В. Р. Болов, Э. Я. Богатырев, А. А. Быков [и др.]] ; МЧС России. – Москва : Центр стратегических исследований гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (государственное учреждение), 2013. – 351 с. – ISBN 978-5-9905147-1-3.

22. Сашурин, А. Д. Геодинамические истоки крупнейших природно-техногенных катастроф / А. Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 11. – С. 13-37.

23. Мойсейчик, Е. А. Уроки техногенных аварий на строительных объектах и необходимость мониторинга технических процессов на стадиях подготовки, строительства и эксплуатации объектов повышенной инженерной сложности / Е. А. Мойсейчик, Е. К. Мойсейчик, П. А. Атрушкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 4(29). – С. 135-146.

24. Шестопалов, В. М. Уроки Чернобиля: з минулого у майбутне / В. М. Шестопалов // Вісн. НАН України. – 2006. – № 6. – С. 5-15.

25. Митропольский, А. С. Современные тектонические движения в Западном Саяне / А. С. Митропольский // Геология и геофизика. – 1969. – № 2. – С. 141-144.

26. Брызгалов, В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций / В. И. Брызгалов // Красноярск : Издательский дом «Суриков». – 1999. –563 с.

27. Хаин, В. Е. История и методология геологических наук / В. Е. Хаин, А. Г. Ребушкин. – Москва : Издательский центр «Академия». – 2008. – 414 с.
28. Аглонов, С. В. Геодинамика / С. В. Аглонов. – Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского университета. – 2001. – 352 с.
29. Хаин, В. Е. Современная геодинамика: достижения и проблемы / В. Е. Хаин // Природа. – 2002. – № 1. – С. 51-59.
30. Геологический словарь : в 2 т. – Т. 1: Н-Я / [Х. А. Арсланов, М. Н. Голубчина, А. Д. Искандерова и др.] ; гл. ред. акад. К. Н. Паффенгольц (отв. ред.) [и др.]. – 2-е изд., испр. – Москва : Недра, 1978. – 456 с.
31. Серебрякова, Л. И. Геодинамические исследования / Л. И. Серебрякова. – Москва : ФГУП «ЦНИИГАиК», 2011. – 150 с.
32. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / В. И. Макаров, К. Е. Абдрахматов, С. Томпсон [и др.]. – Москва : Научный мир, 2005. – Часть III. – С.157-176.
33. Серебрякова, Л. И. Некоторые сведения о геодинамике для геодезистов / Л. И.Серебрякова, О. О. Пикалов // Геодезия и картография. – 2011. – № 7. – С. 53-60.
34. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. – 1:10000000 / Международный геодезический и геофизический союз. Международная ассоциация геодезии. Комиссия по современным движениям земной коры. Подкомиссия по карте Восточной Европы ; гл. редактор: Ю.А. Мещеряков. – Москва : Главное Управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1971.
35. Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть) / сост. и подгот. к печати ПКО "Картография" ГУГК в 1986 г. ; ред. В. М. Антонов. – 1:10000000. – Москва : ГУГК, 1986.

36. Захаров, В. С. Современные вертикальные движения земной коры / В. С. Захаров // Современные глобальные изменения природной среды : монография. Т.1, раздел 8.3. – Москва : Научный мир, 2006. – С. 626-643.
37. Колмогоров, В. Г. Кинематика земной поверхности западной Сибири по результатам инструментальных методов / В. Г. Колмогоров // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38, № 9. – С. 1538-1548.
38. Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands / H. Kooi, P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither, R. Molendijk // Tectonophysics. – 1998. – Vol. 299. – P. 297-316.
39. Schlunegger, F. Crustal uplift in the Alps: why the drainage pattern matters / F. Schlunegger, M. Hinderer // Terra Nova. – 2001. – Vol. 13. – P. 425-432.
40. Jackson, M. Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet / M. Jackson, R. Bilham // J. Geophys. Res. – 1994. – Vol. 99. – B7. – P. 13897-13912.
41. Recent deformation in the Turan and South Kazakh platforms, western central Asia, and its relation to Arabia-Asia and India-Asia collisions / Thomas J.-C., Grasso J.-R., Bossu R., Martinod J., Nurtaev B. // Tectonics. – 1999. – Vol. 18. – 12. – P. 201-214.
42. Шароглазова, Г. А. Применение геодезических методов в геодинاميке : учебное пособие / Г. А. Шароглазова. – Новополюцк : ПГУ, 2002. – 192 с.
43. Сидоров, В. А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов / В. А. Сидоров, Ю. О. Кузьмин. – Москва : Наука, 1989. – 183 с.
44. Мазуров, Б. Т. Поля деформаций Горного Алтая перед Чуйским землетрясением / Б. Т. Мазуров // Геодезия и картография. – 2007. – № 3. – С. 48-50.
45. Шестаков, Н. В. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г., и их влияние на результаты GNSS-наблюдений / Н. В. Шестаков, М. Д. Герасименко, М. Охзоно // Геодезия и картография. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
46. Кафтан, В. И. Деформации района вулкана Этны по данным GPS измерений, интерпретация, связь с режимом вулканизма / В. И. Кафтан, М. В. Родкин // Вулканология и сейсмология. – 2019. – № 1. – С. 14-24.

47. Поля и модели смещений земной поверхности Горного Алтая / В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Э. Кале, А. Д. Дучков, Е. А. Запреева, С. А. Казанцев, Ф. Русбек, К. Брюникс // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 8. – С. 923-937.

48. Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements / Y. Bock, L. Prawirodirdjo, J. F. Genrich, C.W. Stevens, R. McCaffrey, C. Subarya, S. S. O. Puntodewo, E. Calais. – DOI: 10.1029/2001JB000324 // Journal of geophysical research. –2003. – Vol. 108, B8. – 2367.

49. Sankov, V. A. Recent geodynamics of intracontinental areas: instrumental and geomorphological assessment of crustal movements and deformation in Central Asia / V. A. Sankov // Geodynamics & Tectonophysics. – 2014. – Vol. 5 (1). – P. 159-182.

50. Костюк, А. Д. Современные движения земной коры на территории Центральной Азии / А. Д. Костюк // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11, № 4. – С. 135-140.

51. Лукк, А. А. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа / А. А. Лукк, В. И. Шевченко // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 99-123.

52. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры Осетинской части Большого Кавказа по GPS-измерениям / В. А. Милюков, А. П. Миронов, Г. М. Стеблов, В. И. Шевченко, А. Г. Кусраев, А. Н. Дробышев, Х. М. Хубаев. // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 68-80.

53. Серебрякова Л. И. Предварительные результаты обработки и анализа повторных геодезических измерений, выполненных на Северо-Кавказском геодинимическом полигоне Росреестра / Л. И. Серебрякова, А. В. Басманов. // Геодезия и картография. – 2014. – № 4. – С. 44-54.

54. Monitoring the tectonic plate movements in Turkey based on the national continuous GNSS network / Turgut Uzel, Kamil Eren, Engin Gulal, Ibrahim Tiryakioglu, Ahmet Anil Dindar, Haluk Yilmaz. – DOI: 10.1007/s12517-012-0631-5 // Arab J Geosci. – 2013. – 6. – 3573-3580.

55. Савиных, В. П. Геодезические исследования геодинимики рифтовой зоны озера Байкал / В. П. Савиных, В. Р. Яценко, Х. К. Ямбаев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2006. – № 5. – С. 3-10.

56. Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements / Zanutta A., Negusini M., Vittuari L. [et al.] // *Journal of Geodynamics*. – 2017. – Vol. 110. – P. 31-42.

57. Aseismic deformation across the Hilina fault system, Hawaii, revealed by wavelet analysis of InSAR and GPS time series / M. Shirzaei, R. Bürgmann, J. Foster, T. R. Walter, B. A. Brooks // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2013. – 376. – P. 12-19.

58. Kenneth, M. Cruikshank Current State of Strain in the Central Cascadia Margin Derived from Changes in Distance between GPS Stations / Kenneth M., Curt D. Peterson // *Open Journal of Earthquake Research*. – 2015. – Vol. 4. – P. 23-36.

59. Буй Йен Тинь Разработка и исследование метода повышения точности геодезической координатной основы Социалистической Республики Вьетнам : диссертация ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Буй Йен Тинь ; Моск. гос. ун-т геодезии и картографии. – Москва, 2005. – 181 с.

60. Устинов, А. В. Суточные и полусуточные колебания в результатах локального мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / А. В. Устинов, В. И. Кафтан // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. – 2016. – Т. 282. – С. 3-13.

61. Hefty, J. Diurnal and semi-diurnal coordinate variations observed in EUREF permanent GPS network – a case study for period from 2004.0 to 2006.9 / J. Hefty, M. Igondova // *Contribution to Geophysics and Geodesy*. – 2010. – Vol. 40/3. – P. 225-247.

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

63. Современное состояние, методы и перспективы использования эндогеодинамики в инженерной геологии / В. В. Кюнтцель, Е. И. Селюков, Б. И. Корженевский, И. Ю. Симонова. – Москва : ВИЭМС, 1991. – 63 с. – (Гидрология, инженерная геология : обзорная информация / ВНИИ экономики минер. сырья и геол.-развед. работ ; Вып. 4).

64. Nikolaidis, R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System : The Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Earth Sciences / R. Nikolaidis. – University of California, San Diego, 2002. – 265 p.

65. Научный приоритет и современное состояние изученности природного явления «медленных землетрясений» / И. Л. Учитель, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин, С. П. Войтенко // Нові технології в будівництві. – 2011. – № 2(22). – С. 66-73.

66. Татаринов, В. Н. Оценка деформаций земной коры по данным спутниковых наблюдений при обосновании безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов / В. Н. Татаринов, Е. Г. Бугаев, Т. А. Татаринова // Горный журнал. – 2015. – № 10. – С. 27-32.

67. Bos, M. The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time-series / M. Bos, L. Bastos, R. Fernandes // Journal of Geodynamics. – 2010. – Vol. 49, Iss. 3-4, April. – P. 205-209.

68. Surface deformation of an intraplate area from GPS time series / G. Biessy, F. Moreau, O. Dauteuil, O. Bour // Journal of Geodynamics. – 2011. – Vol. 52, Iss. 1, July. – P. 24-33.

69. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering / He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55, Iss. 5, March. – P. 1316-1327.

70. Displacements at the GNSS stations / D. Haritonova, J. Balodis, I. Janpaule, M. Normand // Land Management and Geodesy : 4th International Conference Civil Engineering`13 Proceedings. – 2013. – Part I. – P. 305-309.

71. Спивак, А. А. Проявление лунно-солнечного прилива в спектральных характеристиках координатных данных GPS / А. А. Спивак, В. А. Харламов // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 489, № 2. – С. 179-182.

72. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources / He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu, K., Hua, X., Jiang W. // Journal of Geodynamics. – 2017. – Vol. 106, 1 May. – P. 12-29.

73. Gülal, E. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis / E. Gülal, H. Erdoğan, I. Tiryakioğlu // Digital Signal Processing: A Review Journal. – 2013. – Vol. 23, Iss. 6, December. – P. 1945–1957.

74. Millimeter-Accuracy Structural Deformation Monitoring Using Stand-Alone GPS / Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang [et al.] // Journal of Surveying Engineering. – 2017. – Vol. 144. – P. 242-251.

75. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study / C. O. Yigit, M. Z. Coskun, H. Yavasoglu [et al.] // Measurement. – 2016. – Vol. 91. – P. 398-404.

76. Vertical movements of the Earth's surface at the Crimen nuclear power plant site / A. L. Bondar, S. V. Vykalyuk, L. I. Serebryakova, S. V. Enman // Физика Земли. – 1994. – № 4. – С. 73.

77. Серебрякова, Л. И. Оценка геодинимической активности территории строительства Крымской АЭС по геодезическим данным / Л. И. Серебрякова // Геодезия и картография. – 2012. – № 6. – С. 46-52.

78. Серебрякова, Л. И. Закономерности и особенности вертикальных движений земной поверхности района Игналинской АЭС и прилегающей территории / Л. И. Серебрякова // Геодезия и картография. – 2012. – № 7. – С. 57-63.

79. Татаринев, В. Н. Опыт наблюдений методами космической геодезии на объектах использования атомной энергии / В. Н. Татаринев, И. М. Алешин, Т. А. Татаринев // Наука и технологические разработки. – 2018. – Т. 97, № 2. – С. 25-44. – DOI: 10.21455/std2018.2-2.

80. Морозов, В. Н. К проблеме геодинимической безопасности объектов ядерно-топливного цикла / В. Н. Морозов, М. В. Родкин, В. Н. Татаринев // Геоэкология. – 2001. – № 3. – С. 227-238.

81. Татаринев В. Н. Ново-Воронежская АЭС. GPS - наблюдения в районе АЭС / В. Н. Татаринев. – Москва : ГЦ РАН, 2000. – 12 с.

82. Морозов, В. Н. Геодинимическая безопасность Ростовской АЭС / В. Н. Морозов, М. В. Родкин, В. Н. Татаринев // Геодинимика и напряженное состояние

недр Земли : материалы Международной конференции. – Новосибирск, 2001. С. 271-277.

83. Tatarinova, T. A. Prediction of geodynamic hazards of Kalininskaja nuclear power plants with the GPS technology / T. A. Tatarinova, V. N. Tatarinov // III International conference on recent advance in space technologies. – 2007. – V. 1, N 1. P. 22–23.

84. Ямбаев, Х. К. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспективы / Х. К. Ямбаев, В. Р. Яценко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – Т. 3. – С. 139-155.

85. Генике, А. А. Комплексные исследования на локальных геодинамических полигонах / А. А. Генике, В. Н. Черненко // Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 11-15.

86. Генике, А. А. Исследование деформационных процессов Загорской ГАЭС спутниковыми методами / А. А. Генике, В. Н. Черненко // Геодезия и картография. – 2003. – № 2. – С. 27-33.

87. Проблемы обеспечения геодинамической безопасности Нижневартовской ГРЭС / Ю. В. Васильев, М. Л. Юрьев, В. Д. Трушин, А. Ю. Шатилин, А. В. Филатов // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 3. – С. 50-54.

88. Шароглазова, Г. А. Результаты исследования деформаций земной коры в районе каскада гидроэлектростанций на р. Западной Двине / Г. А. Шароглазова, К. И. Маркович. – DOI:10.22389/0016-7126-2018-940-10-7-15 // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 10. – С. 7-15.

89. Анализ геодинамики и сейсмичности в районах расположения главных электростанций европейской части России и ближайшего зарубежья / Ю. Г. Гатинский, Д. В. Рундквист, Г. Л. Владова, Т. В. Прохорова // Пространство и время. – 2011. – № 4(6). – С. 196-204.

90. Комлева, Е. В. Юкка Маунтин, Краснокаменск и Печенега / Е. В. Комлева // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 2. – С. 64-66.

91. Возможности геодинамического районирования при выборе мест подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов на примере

Нижнеканского массива / В. Н. Морозов, С. В. Белов, И. Ю. Колесников, В. Н. Татаринев, Т. А. Татарина // Инженерная экология. – 2008. – № 5. – С. 17-25.

92. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния Нижнеканского массива как возможного места подземной изоляции радиоактивных отходов / В. Н. Морозов, И. Ю. Колесников, В. Н. Татаринев, Т. А. Татарина // Вестник КРАУНЦ. – 2009. – № 2. – С. 90-99. – (Науки о Земле. Вып. № 14).

93. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) / Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, Е. Ф. Любцева, С. И. Шабалев, Ю. М. Рогозин, Н. Л. Алексеев // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. – 2006. – Т. XI. – С. 8-64.

94. Морозов, В. Н. Прогнозирование устойчивости геологической среды при выборе мест размещения и эксплуатации объектов ядерного топливного цикла / В. Н. Морозов, В. Н. Татаринев // Инженерная экология. – 2008. – № 5. – С. 10-16.

95. Мониторинг деформаций земной поверхности как основа геозкологической безопасности хранилищ радиоактивных отходов / А. С. Баринев, Л. Б. Прозоров, В. Н. Морозов, В. Н. Татаринев // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. – № 5. – С. 425-432.

96. Татаринев, В. Н. Учет масштабного эффекта при наблюдениях за деформациями земной поверхности спутниковыми навигационными системами / В. Н. Татаринев, Т. А. Татарина // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 5. – С. 15–19.

97. Татаринев, В. Н. Изучение современной геодинамики Нижнеканского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов / В. Н. Татаринев, В. И. Кафтаев, И. Н. Сеелев // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 3. – С. 157-160.

98. Инженерно-геодезические изыскания для строительства (СП-11-104-97) = Engineering geodesical survey for construction : принят и введен в действие с 1 января 1998 г. впервые : внесен ПНИИИСом Госстроя России : одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-

изыскательских работ Госстроя России. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001219> (дата обращения: 21.12.2022).

99. Создание геодезической разбивочной основы для строительства гидроэнергетических объектов (ВСН 34.72.060-91) : официальное издание / Минэнерго СССР Создание геодезической разбивочной основы для строительства гидроэнергетических объектов / Минэнерго СССР. – Москва, 1991. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200046687> (доступ ограничен) (дата обращения: 21.12.2022).

100. Свод правил. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования (СП 267.1325800.2016) = High rise buildings and complexes. Design rules : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1032/пр и введен в действие с 1 июля 2017 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 21.12.2022).

101. ГОСТ 32019—2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга = Technical condition monitoring of the unique buildings and constructions Rules of design and installation of permanent systems (stations) of monitoring (с Изменением N 1, с Поправкой) : внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 "Строительство" : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС) (протокол от 18 декабря 2012 г. N 41) : дата введения 2014-01-01. – – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100943> (дата обращения: 21.12.2022).

102. Учет внешних природных и техногенных воздействий на площадках размещения объектов использования атомной энергии / В. Г. Бедняков, Е. Г. Бугаев, А. С. Гусельцев, Л. Ф. Силаева, Л. М. Фихиева // Ядерная и радиационная безопасность. – 2012. – СВ. – С.28-51.

103. Site Evaluation for Nuclear Installations = Оценка площадок для ядерных установок : Safety Requirements. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. – 51 с. – (IAEA Safety Standards Series №. NS-R-3 (Rev. 1).

104. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants = Сейсмостойкое проектирование и сейсмическая аттестация для АЭС : Safety Guide. – Vienna, 2003. – (IAEA Safety Standards Series.NS-G-1.6).

105. Finding sites for nuclear power plants = Изыскание площадок для атомных электростанций. – Vienna, 1985. – (IAEA Safety Standards Series. 50-SG-S9).

106. Внешние события техногенного происхождения в оценке площадки для атомных электростанций. Руководства // IAEA Международное агентство по атомной энергетике. – IAEA, 2004. – 61 с. – (Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № NS-G-3.1).

107. European Utility Requirements for New Light Water Reactors. Volume 2 Generic Nuclear Island requirements. Chapter 2.1 Safety requirements = Требования безопасности. Chapter 2.4 Design basis = Основы проекта. – Revision E. – The organization EUR, 2016, December.

108. Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants : LWR Edition. – Regulatory Guide 1.70. Revision 3 – Office of Standard Developments US Nuclear Regulatory Commission, 1978, November.

109. Code of federal regulations (CFR). Title 10. Energy. Chapter 1. Nuclear Regulatory Commission. Part 100. Reactor Site Criteria. Appendix A. Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants. [сайт]. – URL: <s://www.ecfr.gov/current/title-10/chapter-I/part-100/appendix-Appendix%20A%20to%20Part%20100> (дата обращения: 16.01.2023).

110. Площадка атомной станции. Требования безопасности. НП-032-19 : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 287 от 19 июля 2019 года. – Москва, 2019. – (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/560915652> (дата обращения: 10.01.2023).

111. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17 : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 514 от 30 ноября 2017 года. – Москва, 2017. – (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556170189> (дата обращения: 10.01.2023).

112. Руководящий технический материал по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций. ГКИНП-10-186-84 : утв. и введен в действие с 01 апреля 1985 г. Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР от 30.11.1984 г. № 9 / составители : В. Н. Дмитриченков, Е. О. Бахманова. – Москва : ЦНИИГАиК, 1984. – 14 с. – (Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила).

113. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС = Engineering site investigations for nuclear power plants construction. СП 151.13330.2012 : дата введения 2013-07-01. Ч. 1. – Москва, 2012. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103171> (дата обращения: 10.01.2023).

114. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-18 : дата введения 2018-03-02. – Москва, 2018. – (Федеральные нормы и правила). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556827973> (дата обращения: 10.01.2023).

115. Гусева Т. В. Современные горизонтальные движения на разных масштабных уровнях / Т. В. Гусева, А. В. Мишин, Ю. П. Сковородкин // Физика Земли. – 1996. – №12. – С.86-91.

116. Gufeld, I. L. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust / I. L. Gufeld, M. I. Matveeva, O. N. Novoselov // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. – V. 2, № 4. – P. 378-415.

117. Sherman, S. I. Destruction of the lithosphere: Faultblock divisibility and its tectonophysical regularities / S. I. Sherman // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – № 3 (4). – P. 315-344.

118. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия = Earh's crust destruction and self-organization processes in highly industrial regions : [монография] / [В.Н. Опарин [и др.]]; отв. ред. Н.Н. Мельников ; Рос. акад. Наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела [и др.] – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 625 с. ISBN 978-5-7692-1223-9.

119. Садовский, М. А. Избранные труды : Геофизика и физика взрыва / М. А. Садовский ; отв. ред. А.А. Адушкин. – Москва: Наука, 2004. – 440 с.

120. Николаев, А. В. Развитие методов нелинейной геофизики / А. В. Николаев // Вестник ОГГГГ РАН : электронный научно-информационный журнал. – 2002. – №1(20). – С. 34-38.

121. Гуфельд, И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты / И. Л. Гуфельд ; Российская акад. наук, Российская акад. космонавтики им. Э. К. Циолковского, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – Москва : Ин-т физики Земли РАН, 2007. – 153 с.

122. Геншафт, Ю. С. Земля – открытая система: геологические и геофизические следствия / Ю. С. Геншафт // Физика Земли. – 200. – № 8. – С. 4-12.

123. Адушкин, В. В. Физические поля в приповерхностной геофизике = Physical fields in near-surface seorphysics / В. В. Адушкин, А. А. Спивак ; Российская акад. наук, Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Ин-т динамики геосфер РАН. – Москва : ГЕОС, 2014. – 358 с.

124. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит / Ю. Г. Гатинский, Д. В. Рундквист, Г. Л. Владова, Т. В. Прохорова, Т. В. Романюк // Вестник КРАУНЦ. – 2008. – № 1 (11). – С. 32-47. – (Серия: Науки о Земле).

125. Габсатаров, Ю. В. Результаты новых GPS-наблюдений в области Беринговой микроплиты / Ю. В. Габсатаров, Г. М. Стеблов, Д. И. Фролов. – DOI:10.7868/S0002333713020026 // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 114-118.

126. Садовский, М. А. Естественная кусковатость горной породы / М. А. Садовский // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829-831.

127. Пиотровский, В. В. Использование морфометрии для изучения рельефа и строения Земли / В. В. Пиотровский // Земля во Вселенной. – Москва : Мысль, 1964. – С. 278-297.
128. Лобацкая, Р. М. Структурная зональность разломов / Р. М. Лобацкая. – Москва : Недра, 1987. – 129 с.
129. Красный, Л. И. Глобальная система геоблоков / Л. И. Красный. – Москва : Недра, 1984. – 220 с.
130. Шерман, С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры / С. И. Шерман. – Новосибирск : Наука, 1977. – 102 с.
131. Нечаев, Ю. В. Линеаменты и тектоническая раздробленность: дистанционное изучение внутреннего строения литосферы / Ю. В. Нечаев. – Москва : ИФЗ РАН, 2010. – 215 с.
132. Горшков, А. И. Определение возможных мест сильных землетрясений и оруденения в горно-складчатых и платформенных областях на основе формализованного морфоструктурного районирования : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / А. И. Горшков. – Москва, 2011. – 52 с.
133. Невский, М. В. Рассеяние и поглощение продольных сейсмических волн в земной коре / М. В. Невский, А. В. Николаев, О. Ю. Ризниченко // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 10. – С. 20-30.
134. Савич, А. И. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами / А. И. Савич, З. Г. Яценко. – Москва : Недра, 1979. – 214 с.
135. Петрищевский, А. М. Глубинные структуры земной коры и верхней мантии Северо-Востока России по гравиметрическим данным / А. М. Петрищевский // Литосфера. – 2007. – № 1. – С. 46-64.
136. Юдахин, Ф. Н. Геодинамические процессы в земной коре и сейсмичность континентальной части Европейского Севера / Ф. Н. Юдахин // Литосфера. – 2002. – № 2. – С. 3-23.

137. Гайдай, Н. К. Плотность разломов, землетрясения и рельеф границ расслоения в земной коре (на примере центральной части Магаданской области) / Н. К. Гайдай, Л. Ю. Калинина // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 6. – С. 71-78.

138. Поплавский, В. А. Изучение иерархии трещиноватости породных массивов / В. А. Поплавский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 1. – С. 37-44.

139. Курленя, М. В. Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массивов / М. В. Курленя, В. Н. Опарин, А. А. Еременко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1993. – № 3. – С. 3-10.

140. Петров, О. В. Диссипативные структуры Земли как проявление фундаментальных волновых свойств материи / О. В. Петров // Труды. Новая серия = Proceedings. New series / Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), Всероссийский науч.-исслед. геологический ин-т А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). – Санкт-Петербург : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – 303 с.

141. Петров, О. В. Геологическое строение и минерально-сырьевые ресурсы Северной и Центральной Евразии (на основе создания атласов карт геологического содержания масштабов 1:2 500 000 и 1:5 000 000) : диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / О. В. Петров. – Санкт-Петербург. – 2013. – 51 с.

142. Гольдин, С. В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика / С. В. Гольдин // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 5. – С.5-22.

143. Кочарян, Г. Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г. Г. Кочарян, А. А. Спивак. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.

144. Адушкин, В. В. Геомеханика блочных сред / В. В. Адушкин, В. Н. Родионов // Проблемы нелинейной геомеханики : труды научного семинара ВНИМИ – ИГД РАН (Санкт-Петербург, 1996 г.). – Санкт-Петербург : ВНИМИ, 1998. – С. 3-10.

145. Родионов, В. Н. Учение о геомеханике / В. Н. Родионов // Геофизика. – 2006. – № 5. – С. 61-64.
146. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига / С. И. Шерман [и др.] ; отв. ред. Н. А. Логачев ; Институт земной коры СО АН СССР. – Новосибирск : Наука. СО, 1991. – 256 с.
147. Разломообразование в литосфере: зоны растяжения / С. И. Шерман [и др.] ; отв. ред. Н. А. Логачев ; Институт земной коры СО РАН. – Новосибирск : Наука. СО, 1992. – 222 с.
148. Разломообразование в литосфере: зоны сжатия / С. И. Шерман [и др.] ; отв. ред. Н. А. Логачев ; Институт земной коры СО РАН. – Новосибирск : Наука СО, 1994. – 257 с.
149. Геомеханика : учебное пособие / Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис, А. Б. Макаров. – Москва : Высшая школа, 2006. – 503 с.
150. Батугина И. М. Геодинамика недр / И. М. Батугина, И. М. Петухов. – Москва : Недра, 1996. – 217с.
151. Геодинамическое районирование недр : методические указания / ВНИМИ горн. геомеханики и маркшейд. дела, Кузбас. политехн. ин-т ; [составители И. М. Батугина и др.]. – Ленинград : ВНИМИ, 1990. – 127 с.
152. Основания гидротехнических сооружений = Foundation of hydraulic structures. СП 23.13330.2011 : дата введения 2011-05-20. – Москва, 2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084539> (дата обращения: 10.01.2023).
153. Садовский, М. А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс / М. А. Садовский, Л. Г. Болховитинов, В. Ф. Писаренко. – Москва : Наука, 1987. – 100 с.
154. Шемякин, Е. И. О свободном разрушении твердых тел / Е. И. Шемякин // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 300, № 5. – С.1090-1094.
155. Шемякин Е. И. О свободном разрушении твердых тел - II / Е. И. Шемякин // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 316, № 6. – С.1371-1373.
156. Курленя, М. В. О масштабном факторе зональной дезинтеграции горных пород и канонических рядах атомно-ионных радиусов / М. В. Курленя, В. Н.

Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 1996. – № 2. – С. 6-16.

157. Опарин, В. Н. О скоростном разрезе Земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении. Ч. 1: Зональная геодезинтеграция и иерархический ряд геоблоков / М. В. Курленя, В. Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1994. – № 2. – С. 14-26.

158. Любушин, А. А. Иерархическая модель сейсмического процесса / А. А. Любушин // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 11. – С. 43-52.

159. Афанасьев, С. Л. Определение геологического возраста по наноциклитам / С. Л. Афанасьев // Математические методы анализа цикличности в геологии. – Москва : Наука, 1984. – С. 6-26.

160. Макаров, П. В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости / П. В. Макаров // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 7. – С. 724-746.

161. Шерман, С. И. Нестационарная тектонофизическая модель разломов и ее применение для анализа сейсмического процесса в деструктивных зонах литосферы / С. И. Шерман // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 1, № 8. – С. 71-80.

162. Шерман, С. И. Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности / С. И. Шерман. – doi:10.5800/GT-2012-3-4-0077 // Геодинамика и тектонофизика. – 2012. – Т. 3, № 4. – С. 315-344.

163. Torabi, A. Scaling of fault attributes: A review / A. Torabi, S. S. Berg. – doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003 // Marine and Petroleum Geology. – 2011. – Vol. 28, Iss. 8. – P. 1444-1460.

164. Grasemann, B. Displacement length scaling of brittle faults in ductile shear / B. Grasemann, U. Exner, C. Tschegg. – doi:10.1016/j.jsg.2011.08.008 // Journal of Structural Geology. – 2011. – Vol. 33, Iss. 11. – P. 1650-1661.

165. Кочарян, Г. Г. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых

землетрясений? / Г. Г. Кочарян, С. Б. Кишкина, А. А. Остапчук // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 419-440.

166. Schultz, R. A. Displacement-length scaling relations for faults on the terrestrial planets / R. A. Schultz, C. H. Okubo, S. J. Wilkins // *Journal of Structural Geology*. – 2006. – Vol. 28. – P. 2182-2193.

167. Захаров, В. С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа : диссертация д-ра геолого-минералогических наук / Захаров Владимир Сергеевич. – Москва. – 2014. – 281 с.

168. A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway) / Bour O., Davy P., Darcel C., [et al.]. – doi: 10.1029/2001JB000176 // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, B 6. – P. ETG 4-1-ETG 4-12.

169. Nanjo, K. Fractal properties of spatial distributions of aftershocks and active faults / K. Nanjo, H. Nagahama // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2004. – Vol.19. – P. 387-397.

170. Scaling of fracture systems in geological media / E. Bonnet, O. Bour, N. E. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie, B. Berkowitz // *Reviews of Geophysics*. – 2001. – Vol. 39, № 3. – P.347-381.

171. Захаров, В. С. Анализ современных дискретных движений блоков земной коры геодинамически активных областей по данным GPS / В. С. Захаров, Д. А. Симонов // *Вестник Московского университета*. – 2010. – № 3. – С. 25-31. – (Сер. 4. Геология).

172. Мухамедиев, Ш. А. Выделение блоков земной коры по данным GPS-измерений / Ш. А. Мухамедиев, А. В. Зубович, С. И. Кузиков // *Доклады Академии наук*. – 2006. – Т. 408, № 4. – С. 539-542.

173. Meade, B. J. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements / B. J. Meade, B. H. Hager. – doi:10.1029/2004JB003209 // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. – № B3.

174. McCaffrey, R. Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data / R. McCaffrey. – doi:10.1029/2004JB003307 // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110. – № B7.

175. Gutenberg, B. Magnitude and energy of earthquakes / B. Gutenberg, C. F. Richter. – DOI:10.1038/176795a0 // Nature. – 1955. – 176, № 4486. – P. 795.

176. Ouillon, G. Magnitudedependent Omori law: Theory and empirical study / G. Ouillon, D. Sornette. – doi: 10.1029/2004JB003311 // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110, Iss. B4. – P. 1-28.

177. Спивак, А. А. Дифференциальные движения блочных структур при внешних воздействиях / А. А. Спивак // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1999. – № 1. – С. 62-76.

178. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах : От диссипатив. структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис ; пер. с англ. В. Ф. Пастушенко ; под ред. Ю. А. Чизмаджева. – Москва : Мир, 1979. – 512 с.

179. Бобряков, А. П. О временных структурах в процессах деформирования сыпучей среды / А. П. Бобряков, В. П. Косых, А. Ф. Ревуженко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 29-39.

180. Бобряков, А. П. О катастрофических последствиях длительных слабых воздействий на сыпучую среду / А. П. Бобряков, В. П. Косых, А. Ф. Ревуженко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1995. – № 1. – С. 19-24.

181. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев ; отв. ред. Н. Н. Яненко. – Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1985. – 229 с.

182. Адушкин, В. В. Особенности деформирования блочной среды при взрыве / В. В. Адушкин, А. А. Спивак // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 46-52.

183. Закономерности деформирования и разрушения выработок в массиве скальных пород / Г. Г. Кочарян, А. М. Алексеев, С. В. Джанашия, А. М. Кулюкин // Проблемы нелинейной геомеханики : труды научного семинара ВНИМИ - ИГГ РАН (Санкт-Петербург, 1996 г.). – Санкт-Петербург : ВНИМИ, 1998. – С. 11-25.

184. Родионов В. Н. Сейсмический режим и блочное строение земной коры / В. Н. Родионов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1994. – № 3. – С. 76-81.

185. Козырев, С. А. Особенности сейсмического действия массовых взрывов в блочных высоконапряженных массивах / С. А. Козырев, С. В. Лукичев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1995. – № 1. – С. 51-60.

186. Курленя, М. В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч.1 / М. В. Курленя, В. Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 3. – С.12-26.

187. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок : заявка № ОТ-11253 от 12 декабря 1985 г. / Шемякин Е. И., Курленя М. В., Опарин В. Н., Рева В. Н., Глушихин Ф. П. // Бюллетень изобретений. – 1992. – № 1.

188. Хачай, О. А. Явления самоорганизации в массиве горных пород при техногенном воздействии / О. А. Хачай // Физическая мезомеханика. – 2004. – № 7, Ч. 2. – С.292-295.

189. Хачай, О. А. Новая методика обнаружения зон дезинтеграции в околорудном пространстве массивов горных пород различного вещественного состава / О. А. Хачай, Е. Н. Новгородова, О. Ю. Хачай // Горный информационный аналитический бюллетень. – 2003. – №1 1. – С.26-29.

190. Лобанова, Т. В. Результаты комплексной оценки напряженно-деформированного состояния горного массива Таштагольского месторождения геофизическими и геодезическими методами / Т. В. Лобанова, С. В. Моисеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 3. – С. 31-39.

191. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: монография / А. А. Козырев, С. Н. Савченко, В. И. Панин, И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, Ю. В. Федотова, С. А. Козырев и др. – Апатиты : КНЦ РАН, 2019. – 431 с.

192. Саамский разлом (Хибины) – аномальный характер современных деформаций / А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, Д. В. Жиров, Ю. Г. Смагина // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 702-707.

193. Балек, А. Е. Управление напряженно-деформированным состоянием скального массива при подземной разработке рудных месторождений системами с обрушением : диссертация ... докт. техн. наук: 25.00.20 / Балек Александр Евгеньевич. – Екатеринбург : Ин-т гор. дела УрО РАН. – 2006. – 332 с.

194. Балек, А. Е. Явление самоорганизации деформационных полей массивов горных пород и его использование при решении задач геомеханики / А. Е. Балек. – DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.090 // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4. – С. 90-96.

195. Митлин, В. С. Нелинейная диффузия тектонических напряжений / В. С. Митлин, В. Н. Николаевский // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 315, № 5. – С. 1093-1096.

196. Быков, В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели / В. Г. Быков // Геология и геофизика. – 2005. – Т.46, №11. – С. 1176-1190.

197. Кузьмин, Ю. О. Деформационные автоволны в разломных зонах / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2012. – № 1. – С. 3-19.

198. Уломов, В. И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации / В. И. Уломов // Физика Земли. – 1998. – № 9. – С. 20-38.

199. Сашурин, А. Д. Влияние земных разломов на прочностные характеристики зданий и сооружений / А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2010. – № 1. – С. 64-67.

200. Meade, B. J. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements / B. J. Meade, B. H. Hager. –

doi:10.1029/2004JB003209 // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol.110, B03403.

201. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman / Ph. Vernant, F. Nilforoushan, D. Hatzfeld [et al.] // Geophysical Journal International. – 2004. – Vol.157. – P. 381-398.

202. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния земной коры самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям : монография / В. А. Середович, В. К. Панкрушин, Ю. И. Кузнецов, Б. Т. Мазуров, В. Ф. Ловягин ; под общ. ред. В.К. Панкрушина ; СГГА. – Новосибирск, 2004. – 356 с.

203. Мазуров, Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики : монография / Б. Т. Мазуров. – Новосибирск : Агентство «Сибпринт», 2019. – 360 с.

204. Дорогова, И. Е. Применение методов кластерного анализа для исследования блоковой структуры земной коры / И. Е. Дорогова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 180-185.

205. Мансуров, А. Н. Математическая модель и методика расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS наблюдений / А. Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. – 2012. – № 2 (23). – С. 57-63.

206. Антонов, В. А. Модельное обнаружение и прогнозирование горизонтальной деформации земной поверхности по перемещениям ее реперов / В. А. Антонов // Известия УГГУ. – 2020. – № 4 (60). – С. 146-154.

207. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / [В. Н. Опарин и др.]; отв. ред. М. Д. Новопашин; Рос. акад. Наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела [и др.] – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.

208. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – Москва : Высшая школа, 1961. – 537 с.

209. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2 / К. М. Антонович. – Москва : Картгеоцентр, 2005. – 360 с.

210. Генике, А. А. Исследование деформационных процессов Загорской ГАЭС спутниковыми методами / А. А. Генике, В. Н. Черненко // Геодезия и картография. – 2003. – № 2. – С. 27-33.

211. Скрипников, В. А. К вопросу модернизации плановой сети для определения деформаций плотин ГАЭС / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова // Геодезия и картография. – 2012. – №1. – С. 4-7.

212. Monitoring the dynamic behaviors of the Bosphorus Bridge by GPS during Eurasia Marathon / H. Erdogan, B. Akpınar, E. Gulal [et al.]. – DOI: 10.5194/npg-14-513-2007 // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2007. – Vol. 14, № 4. – P. 513-523.

213. Yi, T. H. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures / T. H. Yi, H. N. Li, M. Gu // Structural control and health monitoring. – 2013. – Vol. 20, Issue 5. – P. 649–670.

214. Assessing building displacement with GPS // A. Seco, F. Tirapu, F. Ramirez [et al.] // Building and environment. – 2007. – Vol. 42, №. 1. – P. 393-399.

215. The Stuttgart TV Tower - displacement of the top caused by the effects of sun and wind // P. Breuer, T. Chmielewski, Gorski [et al.] // Engineering Structures. – 2008. – 30. – P. 2771-2781.

216. Комплексный GNSS-мониторинг деформаций высотных сооружений башенного типа / А. В. Овчаренко, В. Т. Беликов, Д. В. Баландин [и др.] // Инженерные изыскания. – 2012. – №7. – С. 38-45.

217. Фялковский, А. Л. Деформационный мониторинг высотных сооружений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / А. Л. Фялковский // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 5. – С. 54-59.

218. Malet, J. P. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-

Haute-Provence, France) / J. P. Malet, O. Maquaire, E. Calais // *Geomorphology*. – 2002. – Vol. 43, № 1. – P. 33-54.

219. Pytharouli, S. I. Kinematics of two deep-seated landslides in Greece / S. I. Pytharouli, V. A. Kontogianni, S. C. Stiros. – DOI: 10.1680/geng.2007.160.3.179 // *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*. – 2007. – Vol. 160, № 3. – P. 179-183.

220. Bock, Y. Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network / Y. Bock, L. Prawirodirdjo, T. I. Melbourne. – DOI: 10.1029/2003GL019150 // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31, № 6. – L06604.

221. Kouba, J. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS / J. Kouba // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2003. – Vol. 47, № 4. – P. 741-755.

222. Mattia, M. The shallow plumbing system of Stromboli Island as imaged from 1Hz instantaneous GPS positions / M. Mattia, M. Rossi, F. Gudlielmino. – DOI: 10.1029/2004GL021281 // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31, Issue 24. – L24610.

223. Murray-Moraleda, J. GPS: applications in crustal deformation monitoring / J. Murray-Moraleda // *Extreme Environmental Events. Complexity in Forecasting and Early Warning*. – Springer New York, 2011. – Vol. 1. – P. 589-622.

224. Кафтан, В. И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений / В. И. Кафтан, П. А. Докукин // *Геодезия и картография*. – 2007. – №9. – С. 18-22.

225. Continuously operating GPS-based volcano deformation monitoring in Indonesia: challenges and preliminary results / C. Rizos, S. Han, C. Roberts [et al.]. – Springer-Verlag, 2000. – P. 361-366.

226. Шестаков, Н. В. Учёт сезонных вариаций координат пунктов GPS/ГЛОНАСС-наблюдений при исследовании современных движений земной коры / Н. В. Шестаков, Г. Н. Герасимов, М. Д. Герасименко // *Геодезия и картография*. – 2009. – № 9. – С. 46-51.

227. Свердлик, С. Н. О возможности мониторинга смещений высотных объектов с помощью одночастотной спутниковой аппаратуры ГЛОНАСС/GPS / С. Н. Свердлик, С. Н. Цуцков // Геопрофи. – 2007. – №1. – С. 59-61.

228. Фялковский, А. Л. Разработка и исследование технологических решений повышения качества геодезического мониторинга динамических объектов с использованием ГНСС : диссертация ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Фялковский Алексей Леонидович. – Москва : МИИГАиК. – 2015. – 152 с.

229. Nikipitoulou, A. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises / A. Nikipitoulou, K. Protopsalti, S. Stiros. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.02.001 // Engineering Structures. – 2006. – Vol. 28, Iss. 10. – P. 1471-1482.

230. Пупатенко, В. В. Моделирование динамических и статических характеристик высокочастотных рядов ГНСС-координат в сейсмологии : диссертация ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Пупатенко Виктор Викторович. – Хабаровск : Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН – 2018. – 169 с.

231. Comparisons of ground motions from colocated and closely spaced one-sample-per-second global positioning system and accelerograph recordings of the 2003 M 6.5 San Simeon, California, earthquake in the Parkfield region / G. Q. Wang, D. M. Boore, G. Tang [et al.]. – DOI: 10.1785/0120060053 // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – Vol. 97. – No.1B. – P. 76-90.

232. Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz GPS and strong-motion accelerometers / G. L. Emore, J. S. Haase, K. Choi [et al.]. – DOI: 10.1785/0120060153 // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2007. – Vol. 97. – No. 2. – P. 357-378.

233. High-rate (1 Hz to 20 Hz) GPS coseismic dynamic displacements carried out during the Emilia 2012 seismic sequence / A. Avallone, E. D'Anastasio, E. Serpelloni [et al.]. – DOI: 10.4401/ag-6162 // Annals of Geophysics. – 2012. – Vol. 55. – No. 4. – P. 773-779.

234. A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning / J. Geng, Y. Bock, D. Melgar [et al.]. – DOI: 10.1002/ggge.20144 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2013. – Vol. 14. – No. 7. – P. 2124-2142.

235. The 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-Motion Data / R. Wang, S. Parolai, M. Ge [et al.]. – DOI: 10.1785/0120110264 // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2013. – Vol. 103. – No. 2B. – P. 1336-1347.

236. Донец, А. М. Геодезический мониторинг высотных зданий и сооружений с помощью высокоточных спутниковых методов / А. М. Донец // *Геопрофи*. – 2005. – №5. – С. 17-19.

237. Accuracy of high-rate GPS for seismology // P. Elosegui, J. L. Davis, D. Oberlander [et al.]. – DOI:10.1029/2006GL026065 // *Geophysical research letters*. – 2006. – Vol. 33. – L11308.

238. Бондаренко, С. С. Определение эпох с переотражённым сигналом путём анализа зависимых измерений, выполненных с помощью ГНСС / С. С. Бондаренко // *Известия вузов "Геодезия и аэрофотосъёмка"*. – 2015. – № 2. – С. 6-10.

239. Israelsson, T. Motion Detection with GPS : master's of Science Thesis in Geodesy No. 3098 TRITA-GIT EX 07-006 / T. Israelsson, Y. Shoumar ; School of Architecture and the Built Environment. Royal Institute of Technology (KTH). – 100 44 Stockholm, Sweden, April 2007. – 44 с.

240. **Коновалова, Ю. П.** Исследование закономерностей деформационных процессов в массиве горных пород для оценки площадок размещения ответственных объектов недропользования / Ю. П. Коновалова. – DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-98-107 // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2018. – №3(51). – С.98-107.

241. **Коновалова, Ю. П.** Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород / Ю. П. Коновалова, В. И. Ручкин. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104 // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 3-1. – С. 90-104.

242. Методические основы оценки исходного напряженно-деформированного состояния для районирования территорий по риску природно-техногенных катастроф на объектах недропользования / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина [и др.]. – DOI: 10.25635/y1113-5609-2774-q // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 4. – С. 297-308.

243. Панжин, А. А. Определение напряженно-деформированного состояния массива в районе Киембаевского карьера / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина. – DOI: 10.25635/IM.2019.30.37814 // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – № 1 (99). – С. 37-40.

244. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения / С. В. Усанов, Ю. П. Коновалова, Е. Ю. Ефремов [и др.]. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118 // Горная промышленность. – 2022. – № S1. – С. 111-118.

245. Сашурин, А. Д. Механизм формирования аварийных ситуаций различного масштаба вследствие современных геодинамических движений / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 1 (1405). – С. 21-25.

246. Далатказин, Т. Ш. Экспериментальные исследования возможности использования радонометрии для геодинамического районирования / Т. Ш. Далатказин, Ю. П. Коновалова, В. И. Ручкин // Литосфера. – 2013. – № 3. – С. 146-150.

247. Антонов, В. А. Об одном методе построения полиномиальных трендов с самоопределяющимися показателями и коэффициентами / В. А. Антонов // Экономика и математические методы. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 78–88.

248. Антонов, В. А. Отображение горно-технологических закономерностей функционально-факторными уравнениями нелинейной регрессии / В.А. Антонов, М.В. Яковлев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 0В11. – С. 571-588.

249. Дудлер, И. В. Методология инженерных изысканий для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов / И. В. Дудлер, Н. М. Хайме, С. П. Лярский // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – №2. – С. 115-129.

250. Филатов, В. В. Тектоника и динамика земной коры Урала и Приуралья / В. В. Филатов, Г. Г. Кассин // Известия Уральского государственного горного университета. – 2001. – Вып. 13. – С. 28-33.

251. Неотектоника Урала (проблемы и решения) / Д. М. Бачманов, Н. Н. Говорова, С. Ф. Скобелев [и др.] // Геотектоника. – 2001. – №5. – С. 61-75.