

*На правах рукописи*

*Ю.Коновалова*

**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»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

**Панжин Андрей Алексеевич**, кандидат технических наук, ученый секретарь ФГБУН Института горного дела УрО РАН

Официальные оппоненты:

**Лобанова Татьяна Валентиновна**, доктор технических наук, главный маркшейдер, научный руководитель Научно-исследовательского центра «Геомеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ)

**Осипова Анастасия Юрьевна**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр  
Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН)

Защита состоится **6 июня 2024 года в 10 часов** на заседании диссертационного совета Д 24.1.503.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620075, Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук: <http://diss.igduran.ru>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



А.А. Панжин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 трудах многих исследователей. В литературе приводятся примеры возникновения аварийных состояний, вплоть до разрушения, конструкций зданий и сооружений – от жилых домов до ответственных объектов, связанных с современной геодинамикой.

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.

**Цель работы** – 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 деформаций 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 геодинамических движений традиционными геодезическими методами и технологиями спутниковой геодезии; математическая обработка результатов полевых измерений, а также данных постоянно действующих станций ГНСС; статистическая обработка результатов; аналитические методы исследований.

**Достоверность научных положений** подтверждается большим объемом полевых геодезических данных, полученных на геодинамических 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 геодинамической диагностики территорий, в том числе для выбора мест размещения ответственных объектов (Белоярская и Южно-Уральская АЭС).

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

**Реализация работы** осуществлена при геодинамической диагностике площадки размещения 4-го 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. Дубрецова 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» в части пунктов: п.1 – 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.8 – 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.12 – геомеханические и экологические факторы при выборе способов и средств разрушения горных пород в массиве, мест размещения опасных объектов, в том числе ядерно-топливного комплекса.

**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 9 таблиц, 48 рисунков. Список использованных источников включает в себя 251 наименование.

**Благодарности.** Автор считает своим долгом выразить благодарность и огромное уважение своему наставнику и первому научному руководителю д.т.н., проф. А.Д. Сашурину, чьи научные взгляды легли в основу данных исследований. Автор глубоко признателен за поддержку, помощь и советы научному руководителю к.т.н. А.А. Панжину. Особую благодарность автор выражает д.т.н. А.Е. Балеку за содержательные консультации и постоянное внимание к научной деятельности, д.т.н. В.А. Антонову и д.т.н., проф. С.В. Корнилку за большую помощь и ценные замечания при выполнении работы, сотрудникам отдела геомеханики за содействие в проведении экспериментальных исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, основные научные положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость исследований.

**В первой главе** приведен анализ опыта изучения геодинамических движений земной коры и их влияния на объекты недропользования, раскрыты современные научные представления о параметрах движений и особенностях их проявления, представлен анализ нормативных документов по учету геодинамических факторов при размещении особо ответственных объектов (объекты атомной энергетики), а также анализ практического опыта оценки и выбора безопасных площадок.

Роль воздействия современных геодинамических движений на объекты недропользования и необходимость их учета на стадии инженерных изысканий отмечается 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 работах приводятся теоретические и экспериментальные свидетельства взаимосвязи аварий зданий и сооружений с геодинамическими процессами, предлагаются решения для снижения их риска.

Согласно современным научным представлениям, геодинамические движения (вертикальные и горизонтальные) имеют повсеместную распространенность, включая асейсмичные области, приурочены к тектоническим нарушениям, имеют неравномерный характер распространения по ним, цикличны, фиксируются на различных пространственно-временных уровнях, формируют в иерархически блочной среде массива горных пород деформации с дискретным характером распределения, представляющие потенциальную опасность для объектов недропользования.

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. В связи с этим принято условное разделение движений 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 является значимым фактором для их безопасности и может проявляться прямым образом или опосредованно, способствуя развитию усталостных эффектов в конструкциях, а также через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием знакопеременных циклических нагрузжений.

Наиболее проработаны в геодинамическом аспекте нормативные документы по выбору площадок безопасного размещения объектов атомной энергетики. Согласно этим документам выбор мест расположения АЭС проводится по телескопическому принципу в два этапа: выбор пункта размещения ( $10 \times 15$  км) из числа альтернативных пунктов в предложенном для исследований районе ( $100 \times 150$  км) и выбор благоприятной площадки ( $3 \times 3$  км) в пределах приоритетного пункта. Исследование района размещения в реализуемых в соответствии с нормативной документацией проектах проводится, как правило, только по фондовым данным изучения вертикальных движений земной коры. А выбор

площадок осуществляется на основе периодических измерений в течение 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.

Таким образом, два фундаментальных свойства геологической среды – иерархически блочная структура и постоянная подвижность этих блоков по отношению друг к другу, вызванная современными геодинамическими движениями и проявляющаяся в широком пространственно-временном диапазоне, – формируют напряженно-деформированное состояние, имеющее анизотропию, неоднородность и изменчивость во времени, что усложняет выбор благоприятной площадки. Однако эти же свойства позволяют при выборе безопасных участков размещения объектов использовать модельные представления о геологической среде как об открытой нелинейной самоорганизующейся системе. С позиций таких представлений задача выбора площадок в определенной степени упрощается, позволяя при этом максимально учитывать возможный спектр опасных для объектов движений.

**Во второй главе** на основании анализа научных источников обоснован подход к выбору безопасных мест размещения ответственных объектов в массиве горных пород путем рассмотрения его с точки зрения эволюции открытой динамической системы с присущими ей процессами деструкции и самоорганизации.

На данном этапе научного развития представлены многочисленные свидетельства, подтверждающие иерархически блочное строение твердой оболочки Земли и ее самоподобие (фрактальность).

Деструкция среды на множество отдельных блоков различных рангов обеспечивает в целом дискретный характер распределения деформаций на всех уровнях ее самоподобной иерархической блочности. Большая часть смещений и соответствующих им деформаций массива горных пород реализуется за счет межблоковых подвижек. Но согласно принципу иерархичности внутриблочные смещения и деформации будут также формироваться за счет межблочных подвижек блоков более низкой иерархии. И в этом случае действительно было бы трудно выбрать благоприятные площадки и обеспечить безопасность и устойчивость ответственных сооружений.

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 нагрузок. То есть, согласно принципу динамического равновесия, в открытой системе для уменьшения эффекта внешнего воздействия происходят изменения, в ходе которых путем консолидации и распада структур разного ранга формируются области, в пределах которых система стремится поддерживать устойчивое равновесие. Перестройка структуры и адаптация деформационных полей к новому временно устойчивому состоянию происходит на различных масштабных уровнях. Исходя из этого сформированные в ходе процессов самоорганизации *консолидированные блоки являются относительно стабильными пространственно-временными структурами* (участками земной коры), образованными блоками более мелких масштабных иерархий, не нарушенными внутри активными подвижками этих блоков, то есть приближенными по свойствам к сплошной среде.

Представление о горных массивах как открытых самоорганизующихся системах сформировалось в работах Садовского М.А., Родионова В.Н. и др. Процессы самоорганизации в них изучаются в основном применительно к природно-техническим системам, находят отражение как в геофизических полях, так и в параметрах деформирования геологической среды, определяемых по результатам геодезических измерений.

В природных условиях вне сильного техногенного воздействия выявление процессов самоорганизации, которые инициируются энергетическим воздействием широкого спектра геодинамических движений, поддерживающих массив горных пород в постоянном движении и обеспечивающих непрерывную энергетическую подпитку, сопряжено с необходимостью проведения многолетних мониторинговых инструментальных геодезических измерений деформаций массива на больших базах. Поэтому систематических исследований в этом направлении практически не проводилось.

Такие особенности проявления геодинамических движений, как неравномерный характер их распространения по тектоническому нарушению, несоответствие параметров движений рангу нарушения, находятся в соответствии с представлениями о динамических процессах разломно-блоковой структуры геологической среды и свидетельствуют о том, что *границы самоорганизовавшегося консолидированного блока могут быть представлены разноранговыми тектоническими нарушениями*.

В научной литературе представлены примеры экспериментальных исследований, в которых фиксируются *высокие градиенты смещений и деформаций на границах самоорганизовавшихся структур различного масштаба*. Разница смещений на границе блоков и в их внутренних частях может различаться в несколько раз, а в некоторых случаях и на 1,5-2 порядка. Характер смещений и деформаций также может быть разным. Это могут быть повышенные деформации, вызванные *трендовыми подвижками*, а могут быть *движения колебательного характера* с разными амплитудами и периодами в зависимости от пространственно-временного разрешения измерительной системы.

Следовательно, в массиве горных пород, представленном такими блоками, основная часть смещений и деформаций выражается межблочными подвижками между консолидированными блоками, а меньшая часть происходит в виде внутриблочных смещений и деформаций. А значит 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 на соответствующих пространственно-временных масштабах. Для выбора площадок под особо ответственные объекты, такие как АЭС, масштабы выделяемых консолидированных структур должны соответствовать размерам альтернативных пунктов  $10 \times 15$  км и площадок размещения  $3 \times 3$  км.

*Основным критерием выявления консолидированного блока является повышенное значение на его границах смещений и деформаций*, проявляющихся, как было показано, в широком временном спектре – *от трендовых движений за многолетний период до короткопериодных вариационных за сеансы непрерывных измерений* – и являющихся значимыми для устойчивости сооружений. Путем совместного рассмотрения деформационных полей разного пространственно-временного уровня с привлечением геологической, геоморфологической, тектонической и сейсмической информации выделяются самоорганизовавшиеся консолидированные геологические структуры (блоки) различных размеров.

***Таким образом, 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 до 100 километров.***

В третьей главе приведены результаты исследований закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды, формируемого современными геодинамическими движениями, на пространственно-временных уровнях, значимых для выявления консолидированных структурных блоков.

В рамках данной главы решаются две задачи:

1) определение численных критериев оценки деформаций для трендовой и вариационной короткопериодной составляющих;

2) выявление взаимосвязи деформационных параметров трендовой и вариационной короткопериодной составляющих.

1) Исследованиями охватываются территории от 100-150 км до 3-5 км, которые регламентированы нормативными документами при выборе площадок под размещение АЭС. Различная частота опроса в измерениях позволяет определять параметры трендовой и вариационной короткопериодной составляющих движений. Для их оценки универсальными являются спутниковые методы, позволяющие охватывать не только широкий пространственный, но и временной диапазон.

Методики определения параметров двух составляющих геодинамических движений представлены в работе. Согласно им, трендовые движения определяются однократным переопределением координат пунктов Государственной геодезической сети (ГГС) за период с момента их закладки – 30-60 лет. Вариационные короткопериодные движения выявляются в ходе сеанса непрерывных многочасовых и суточных измерений через определенные временные интервалы на пространственных базах с длинами до 6 км, при которых обеспечивается необходимая точность. В силу неоднозначности трактования вертикальных смещений по данным спутниковых измерений для анализа используются только горизонтальные смещения.

Одним из основных параметров геодинамических движений, отражающим их пространственно-временные особенности, является скорость относительной горизонтальной деформации –  $\dot{\epsilon}$ . Максимальные значения модуля скорости деформации  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$  для различных пространственно-временных баз являются критерием оценки определяемых деформаций. В ходе исследований получены распределения максимальных значений модуля скорости горизонтальных деформаций трендовой и вариационной составляющих геодинамических движений на разных базах.

Скорости трендовых деформаций определены для 2402 интервалов за период 30-45 лет по наблюдениям на четырех экспериментальных участках, расположенных в асейсмичных регионах, по данным постоянно действующих

станций в сейсмическом районе (рисунок 1). Представленные интервалы не подвержены техногенному влиянию, а также явному влиянию оползневых, овражно-балочных процессов и заболачивания.

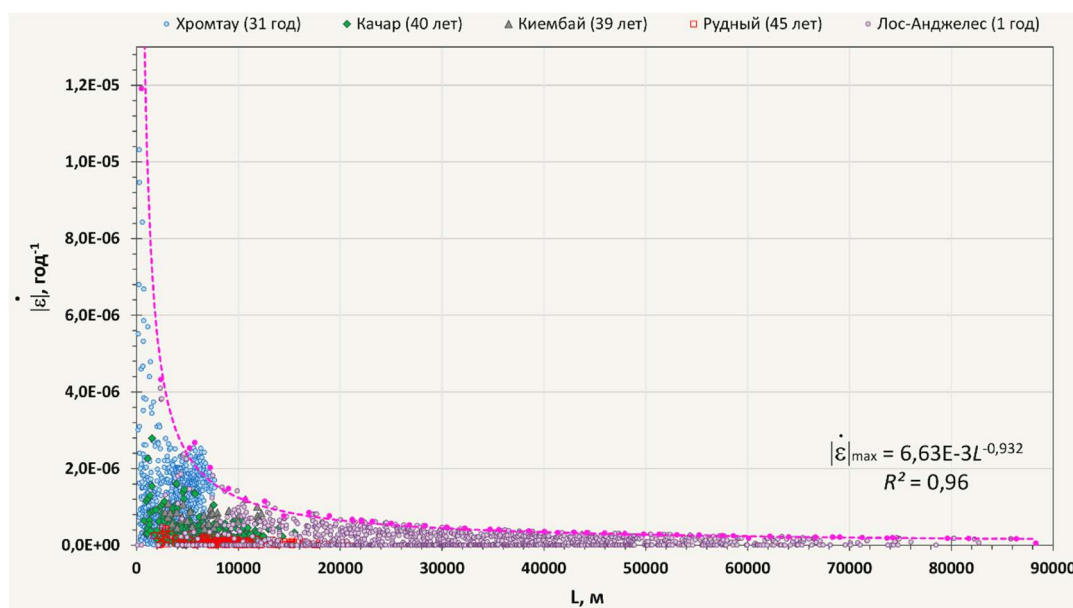


Рисунок 1 – Распределение модуля скоростей трендовых горизонтальных деформаций в зависимости от длины реперных интервалов

График показывает, что уровень деформаций для одинаковых пространственных баз на разных территориях может быть разным. Скорость деформаций интервалов в асейсмичных областях на некоторых объектах сопоставима, а иногда превышает значения для сейсмичного района.

Из полученного распределения модуля скоростей деформаций выделен ряд максимальных их значений, для которого найдена **функциональная зависимость модуля скорости горизонтальной трендовой деформации  $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$  выбранного реперного интервала  $L$  земной поверхности от его размера, которая описывается степенной функцией** с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,96$ :

$$|\dot{\varepsilon}|_{\max} = 6,63 \cdot 10^{-3} L^{-0,932} , \quad (1)$$

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

$L$  – длина реперного интервала, м;  $0,1 \text{ км} < L < 90 \text{ км}$ .

Относительная погрешность аппроксимации  $\delta$  составляет 0,12.

Скорости деформаций, обусловленных вариационной короткопериодной составляющей, определены для 229 реперных интервалов локальных наблюдательных станций размерами в пределах 6 км, расположенных на промышленных, городских и незастроенных территориях, которые

проектировались в соответствии с выявленными тектоническими нарушениями с целью определения их активности. Все экспериментальные участки находились вне влияния, способного на момент наблюдений исказить результаты измерений (горные работы, различные вибрационные воздействия и т.д.). В результате обработки измерений получено распределение значений модуля скорости деформаций в зависимости от соответствующих им длин реперных интервалов и временных периодов, кратных 10 минутам (рисунок 2а).

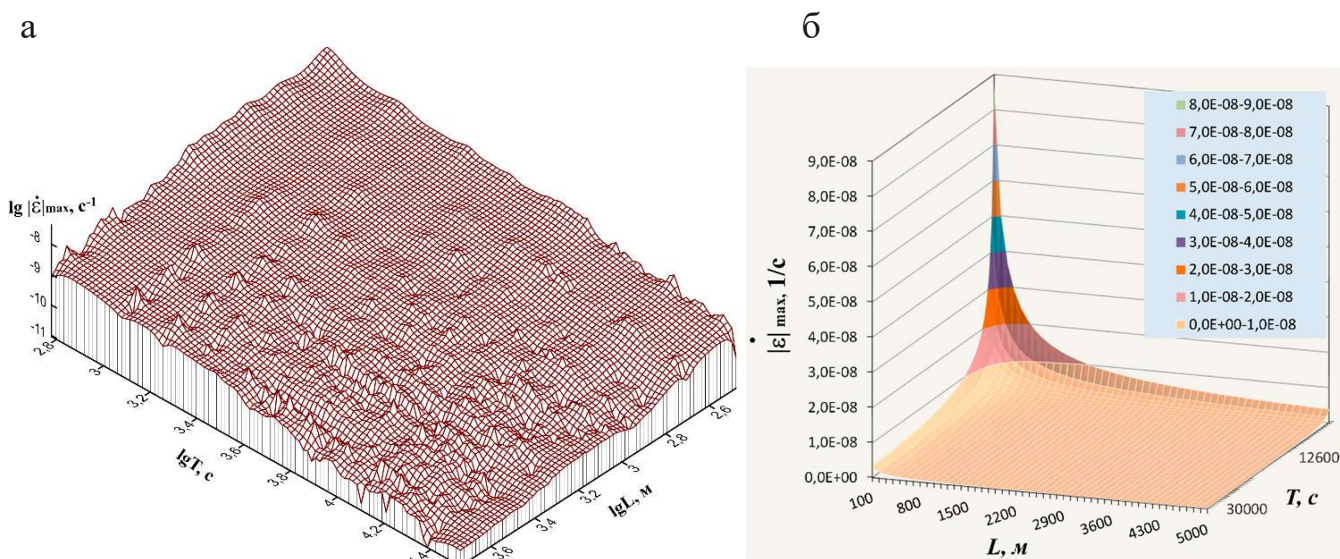


Рисунок 2 – Распределение максимального модуля скорости горизонтальных деформаций интервалов под воздействием вариационной короткопериодной составляющей: а – поверхность исходных данных; б – поверхность регрессии

*Зависимость максимального модуля скорости вариационной короткопериодной горизонтальной деформации земной поверхности  $|\dot{\epsilon}|_{\max}$  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  $R^2=0,94$  (рисунок 2б):*

$$|\dot{\epsilon}|_{\max} = 7,7 \cdot 10^{-4} L^{-0,80} T^{-0,84} \quad (2)$$

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

$L$  – размер реперного интервала, м;  $0,04 \text{ км} < L < 6 \text{ км}$ ;

$T$  – время регистрации, с.

Относительная погрешность аппроксимации  $\delta$  составляет 0,12.

Зависимости (1) и (2) согласуются с представлениями о иерархически блочном строении земной коры и *могут использоваться в качестве критериев для оценки*

**уровня деформаций на различных пространственно-временных масштабах при определении границ консолидированных структурных блоков.**

2) Исследования взаимосвязи между деформационными параметрами трендовой и вариационной короткопериодной составляющими 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 (территория Олимпиадинского месторождения) и вне ее (незастроенная территория около г. Рудный). Выбор техногенного участка в данном случае обусловлен наличием интенсификации геодинамических движений, что сокращает временной интервал для трендовых измерений в условиях отсутствия достаточного количества пунктов ГГС в пределах 6 км.

Исходя из того, что вариационная составляющая формирует в массиве постоянно меняющееся деформационное поле с дискретностью, соответствующей частоте опроса в измерениях, необходимо получить его тензорное представление не просто в конкретный заданный момент времени, а с учетом максимальных смещений (наихудшей ситуации в целях безопасности объектов) и частоты изменения направления вектора смещения за весь сеанс наблюдений. Такой метод разработан автором и представлен в одном из разделов главы.

На базе разработанного метода определены тензоры деформаций вариационных движений, а также трендовых движений за период 6 лет для 20 треугольных элементов наблюдательной сети (рисунок 3).

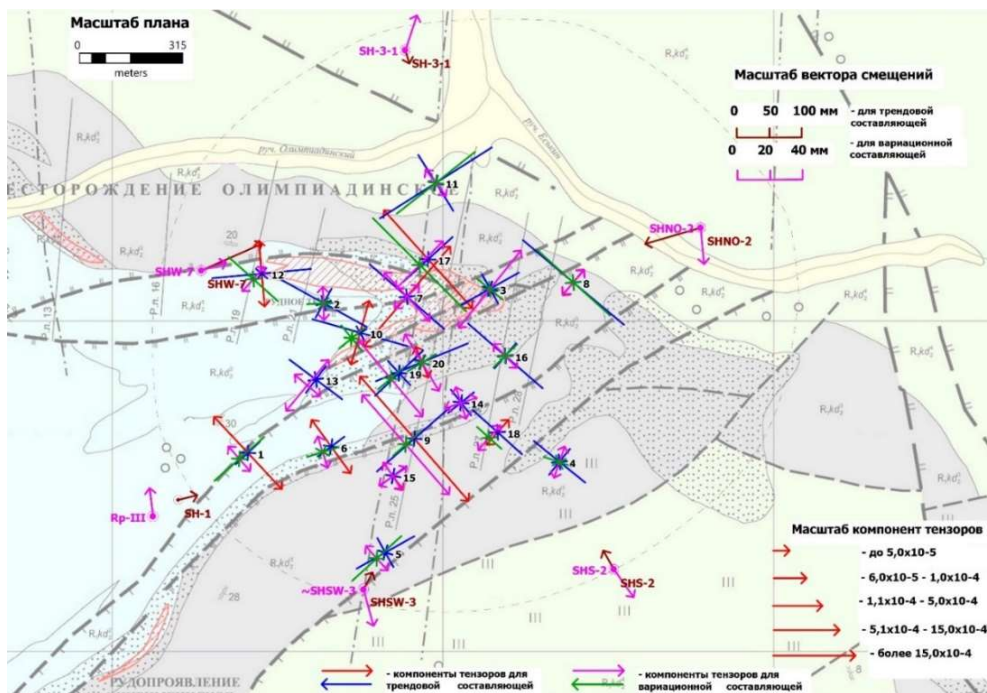


Рисунок 3 – Главные компоненты тензоров деформаций трендовой и вариационной составляющих, Олимпиадинское месторождение



Полученные результаты подтверждают, что максимальные значения горизонтальных деформаций, вызванных вариационной составляющей, могут быть сопоставимы с трендовыми деформациями за 6-летний период.

Установлено, что в 17 треугольных элементах из 20 совпадают направления главных компонент тензоров: в 12 треугольниках – в пределах 10 градусов, в 5 треугольниках – в пределах 20 градусов. Из 17 совпадающих тензоров 13 имеют совпадения в направлении положения компонент  $\varepsilon_{\max}$ , а в 4 тензорах – направление компоненты  $\varepsilon_{\max}$  для трендовых деформаций совпадает с  $\varepsilon_{\min}$  для вариационных и наоборот (таблица 1).

Таблица 1 – 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

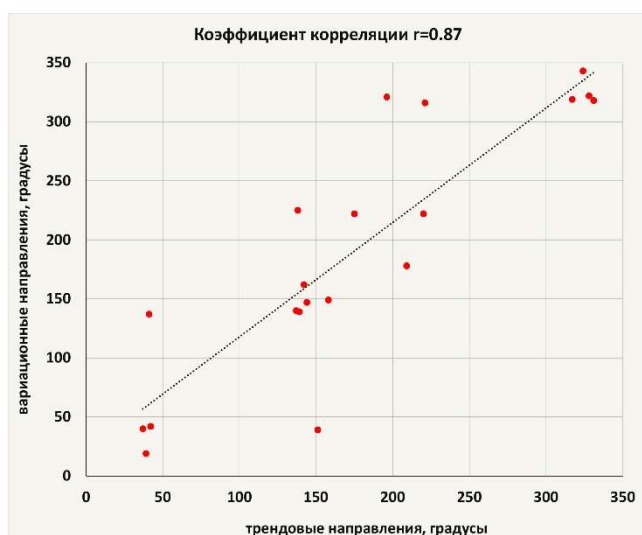
■ - не совпадают

■ - 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 4а) и  $r=0,95$ , когда в дополнение учитываются совпадения трендовой  $\varepsilon_{\max}$  с вариационной  $\varepsilon_{\min}$  и наоборот (рисунок 4б).

а



б

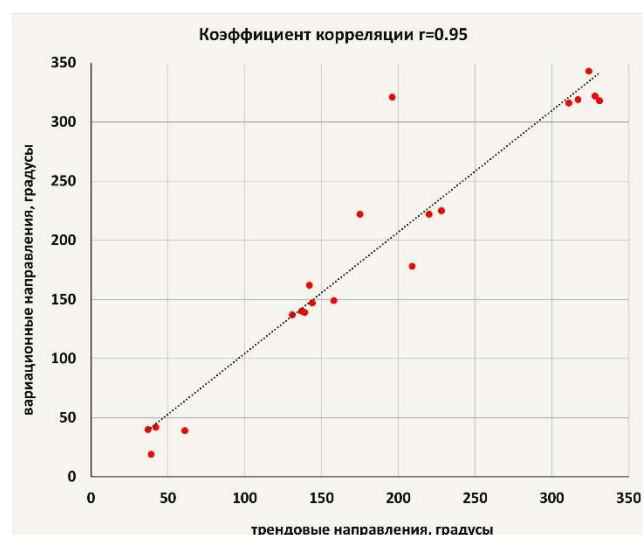


Рисунок 4 – Корреляционные поля направлений главных компонент тензоров деформаций для трендовой и вариационной составляющих:

а – учет совпадений только  $\varepsilon_{\max}$ ; б – учет совпадений  $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\max}$  с  $\varepsilon_{\min}$ .

На втором, не техногенном, участке в окрестностях г. Рудный коэффициент корреляции направлений главных компонент тензоров деформаций равен  $r=0,99$ .

Взаимосвязь направлений 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 в разработанном автором методе.

Выявленная зависимость дает возможность по результатам вариационных движений проводить экспресс-оценку направлений, по которым отсутствуют сдвиговые деформации, что важно для безопасного размещения объекта.

*Таким образом, 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.*

В четвертой главе представлена усовершенствованная методика выбора безопасных участков под размещение особо ответственных объектов (объекты атомной энергетики) по геодинамическому фактору и опыт ее применения при выборе площадок под строительство Южно-Уральской АЭС.

В рамках общей методики выбора площадок под ответственные объекты нормативными документами предусмотрена поэтапная многоуровневая оценка территорий. Выбор площадки подразумевает три этапа изучения предполагаемой территории размещения, два из которых, выполняющиеся на стадии предпроектной подготовки, заключаются в выборе приоритетного пункта в изучаемом районе и площадок в пределах этого пункта и заканчиваются выбором оптимальной площадки (3×3 км). 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.

Требования по учету современных движений земной коры при выборе площадок размещения ответственных объектов сводятся к оценке активности тектонических структур и определению геодинамически активных зон по фондовым данным (при исследовании района) и по результатам геодезических мониторинговых наблюдений в течение периода 3-5 лет (при исследовании пунктов). Ввиду того, что рекомендуемые критерии оценки параметров геодинамических движений в полной мере не рассматривают фактор их пространственно-временной изменчивости, предлагается ввести в методику усовершенствования в этом аспекте на всех трех этапах ее реализации.

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, во-первых, изучать район размещения не только по фоновым, как правило не всегда представительным данным, а на основании конкретных геодезических измерений трендовых движений, и во-вторых, проводить оценку деформационных параметров геодинамических движений в экспресс-режиме в течение 1-2 серий наблюдений. Критерии оценки деформаций для предлагаемых пространственно-временных уровней изложены в главе 3.

Предложенные усовершенствования применены при выборе площадок под размещение Южно-Уральской АЭС. На первом этапе по результатам проведенных исследований трендовых движений 31 пункта ГГС за 40 лет в районе размером 110 × 130 км в соответствии с предложенными критериями выбран консолидированный самоорганизовавшийся блок (рисунок 5).

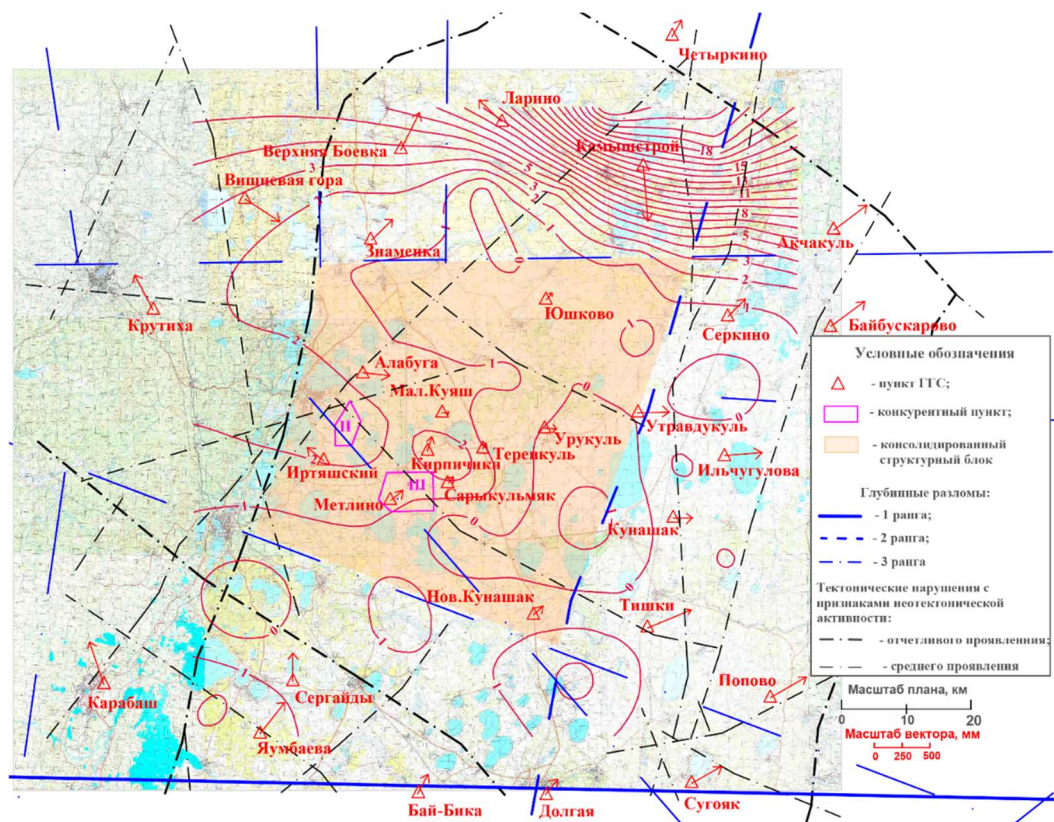


Рисунок 5 – Векторы горизонтальных трендовых движений пунктов ГГС и распределение главных максимальных линейных деформаций в районе размещения ЮУАЭС

В пределах блока выбраны два конкурентных пункта с размерами  $7 \times 4$  км (пункт II) и  $6 \times 8$  км (пункт III) по фактору технического водообеспечения и другим природным и социальным факторам. 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.

На пункте III на восточном фланге обнаружена локальная зона, расположенная на территории залегания карбонатных пород, в которой скорости горизонтальных короткопериодных деформаций значительно превышают максимальные значения, рассчитанные по формуле (2) (рисунок 6). За исключением этой зоны территории обоих пунктов II и III пригодны для безопасного размещения ЮУАЭС и по фактору современной геодинамической активности практически равноценны.

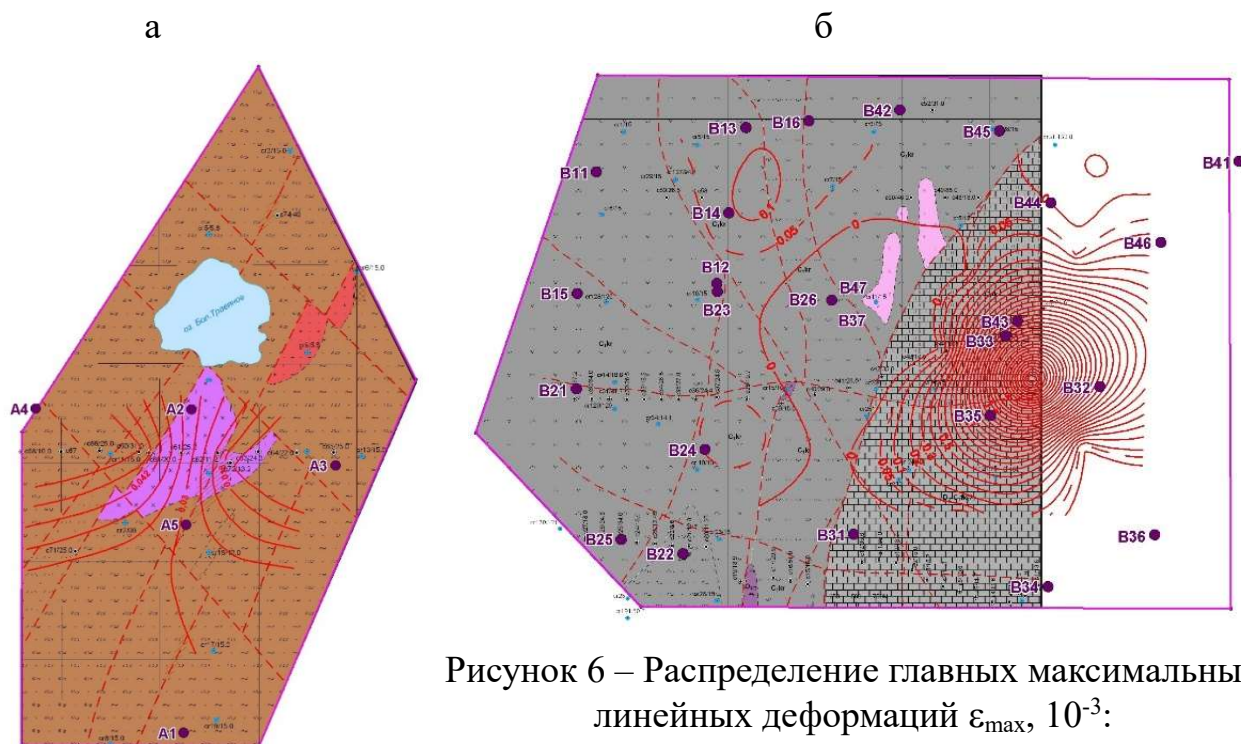


Рисунок 6 – Распределение главных максимальных линейных деформаций  $\epsilon_{\max}$ ,  $10^{-3}$ :  
а – на пункте II; б – на пункте III

Результаты изучения структурных особенностей массивов горных пород геофизическими методами показали, что на пункте III в вулканической толще блочная первоначальная структура лучше 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 по геодинамическому фактору выделено две равноценные площадки – северо-западная и юго-западная (III - I и III - II). Границей их может быть субширотное тектоническое нарушение, проходящее в центральной части (рисунок 7). Какое-либо промежуточное западное

расположение, в котором бы это нарушение оказалось внутри площадки, нецелесообразно. Выбор между этими площадками может быть осуществлен с учетом других факторов или по результатам мониторинговых геодезических наблюдений в течение периода 3-5 лет согласно нормативным документам.

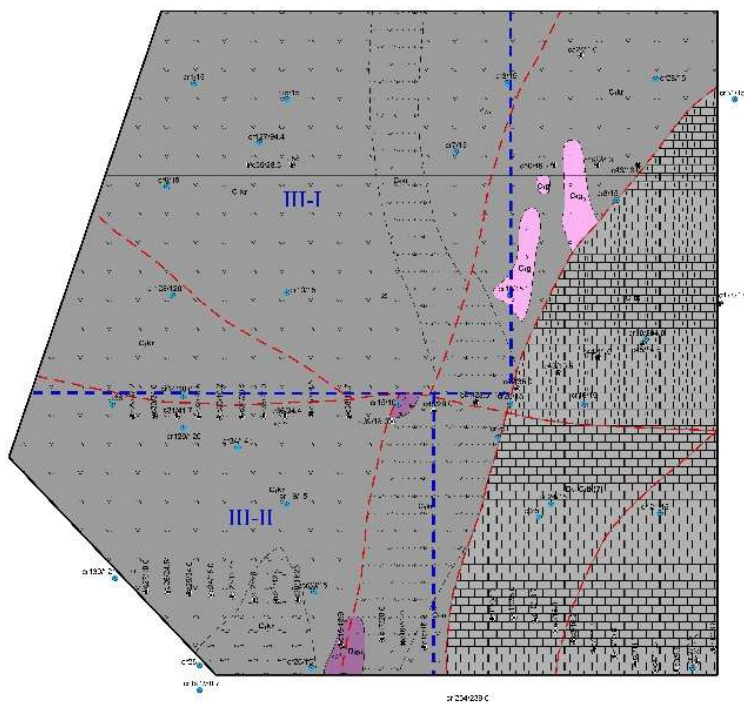


Рисунок 7 – Рекомендуемые площадки строительства III-I и III-II на пункте III

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

***Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:***

1. Коновалова, Ю. П. Исследование циклических короткопериодных геодинамических деформаций территорий при выборе площадок под строительство атомных станций / Ю.П. Коновалова // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 7. – С. 269-274.

2. **Коновалова, Ю.П.** Геодинамические аспекты выбора безопасных площадок размещения особо ответственных объектов недропользования / Ю.П. Коновалова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S11. – С. 133-138.

3. **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.

4. **Коновалова, Ю.П.** Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования / Ю.П. Коновалова. – DOI 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 6-17.

5. **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.

6. 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.

### ***Монографии:***

1. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия = Earth'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.

2. Геомеханические аспекты недропользования / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник, А.Е. Балек, **Ю.П. Коновалова** [и др.]. – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2022. – 256 с. – ISBN 978-5-7691-2556-0. – DOI 10.25635/j5035-6134-1492-n.

### ***Статьи в научных сборниках, журналах и материалах конференций***

1. **Коновалова, Ю.П.** Потенциально опасный спектр частот современных циклических геодинамических движений для объектов недропользования / Ю.П.

Коновалова // Геомеханика в горном деле (Екатеринбург, 14–15 октября 2009 г.). – Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2009. – С. 214-220.

2. **Коновалова, Ю.П.** Влияние современных геодинамических короткопериодных движений на изменение напряженно-деформационного состояния массива горных пород / Ю.П. Коновалова, В.И. Ручкин // Горное дело: материалы VIII Уральского горнопромышленного форума (6 - 8 ноября 2019 г.) : тезисы докладов. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, Компания Экспоград. – 2019. – С. 13. – DOI 10.25635/IM.2019.1.1.

3. **Коновалова, Ю.П.** Учет геодинамических факторов при проектировании и строительстве объектов недропользования / Ю.П. Коновалова // Геодинамика и минерагения Северной Евразии : материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (Улан-Удэ, 13-17 марта 2023 г.). – Улан-Удэ : Издательство Бурятского госуниверситета, 2023. – С. 286-288.