

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

На правах рукописи

Лосев Илья Владимирович

**ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ
СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
ЛАБОРАТОРИИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность: 1.6.21 – «Геоэкология»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Коликов Константин Сергеевич

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ | 12 |
| 1.1 Устойчивость геологической среды и проблема захоронения РАО | 12 |
| 1.2 Анализ опыта геодинамического районирования | 21 |
| 1.3 Анализ требований к геодинамическим исследованиям в районах захоронения РАО | 29 |
| 1.4 Цель и задачи исследования | 32 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | 34 |
| 2.1 Системный подход к анализу координатно привязанных геолого-геофизических данных | 34 |
| 2.2 Классификация инженерно-геологических явлений и процессов, влияющих на устойчивость структурно-тектонического блока | 42 |
| 2.3 ГИС-ориентированная база данных по Нижнеканскому массиву. | 54 |
| 2.5 Выводы | 68 |
| ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ДИСКРЕТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА | 71 |
| 3.1 Выявление блочных структур и геодинамических зон в районе исследования | 71 |
| 3.2 Нормализация разнокачественных и разноформатных данных | 76 |
| 3.3 Разработка алгоритма и программного модуля расчета показателей устойчивости | 82 |
| 3.4 Разработка мер активности динамических показателей | 87 |
| 3.5 Корреляционный анализ мер активности динамических показателей | 96 |
| 3.6 Выводы | 100 |
| ГЛАВА 4. ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРИТОРИЙ (НИЖНЕКАНСКИЙ МАССИВ) | 103 |
| 4.1 Блочные структуры ближнего района, дальней и ближней зон ПГЗРО | 103 |
| 4.2 Геодинамическое районирование по напряженно-деформированному состоянию структурных блоков | 107 |
| 4.3 Геодинамическое районирование на основе изучения современной кинематики структурных блоков | 115 |

| | |
|--|-----|
| 4.4 Геодинамическое районирование на основе алгоритмов системного анализа | 129 |
| 4.6 Выводы..... | 132 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 135 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ | 138 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 153 |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

GPS – система глобального позиционирования (США)

БД – база данных

ВОЗ – возможные очаги землетрясений

ГИС – географическая информационная система

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система (российская)

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

ГУ ОГЯП – геологические условия возникновения и активизации ОГЯП

ГЦ РАН – Геофизический центр Российской академии наук

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ДМА – дискретный математический анализ

ИБРАЭ РАН – Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии

НДС – напряженно-деформированное состояние

ОГЯП – опасные геологические явления и процессы

ОИАЭ – объекты использования атомной энергии

ПГЗРО – пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов

ПИЛ – подземная исследовательская лаборатория

РАО – радиоактивные отходы

РИД – результат интеллектуальной деятельности

СДЗК – современные движения земной коры

СТБ – структурный тектонический блок

ЦМР – цифровой моделью рельефа

ЯТЦ – ядерный топливный цикл

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность научной работы. На территории России накоплен огромный объем радиоактивных отходов (РАО), представляющих серьезную экологическую опасность для населения и окружающей среды. Наиболее опасными являются тепловыделяющие радиоактивные отходы, содержащие продукты деления, актиниды и трансурановые отходы. Согласно классификации, они относятся к 1 и 2 классам опасности и имеют период полураспада более 10 тысяч лет. В 1990-х годах прошлого столетия начались активные изыскания по поиску площадок для их захоронения в глубокие геологические формации. Выбор геологической формации, где изоляция РАО будет гарантирована на весь срок их радиологической опасности, оказался чрезвычайно трудной научно-практической задачей. Сравнение альтернативных участков осуществлялось с учетом множества геологических, гидрогеологических, тектонических и др. факторов. Важно было найти структурный блок земной коры, в равной степени имеющий надежные изоляционные свойства, геодинамическую стабильность и максимальные размеры.

В итоге многолетних изысканий в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива на юге Красноярского края для строительства пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) был выбран участок «Енисейский». В 2023 году на участке «Енисейский» началось строительство шахтных стволов подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Этот этап является неотъемлемой частью международных и отечественных нормативов, главная цель которого - окончательно убедиться в пригодности породного массива для размещения РАО. Однако, оказалось, что данные о геодинамическом режиме и тектонической стабильности региона характеризуются неполнотой, и необходимы дополнительные исследования по преодолению этих неопределенностей.

Для оценки геодинамической устойчивости геологической среды и ее прогнозе на период более 10 тыс. лет в мировой научной практике активно используется подход, основанный на многоэтапном системном анализе информационного массива данных. Этот метод позволяет выявить причины неопределенностей, наметить оптимальные пути их преодоления и получить достоверные прогнозные оценки на основе выявления фундаментальных геологических и геодинамических закономерностей, даже при ограниченном объеме геолого-геофизической информации.

В этой связи, разработка методики геодинамического районирования является актуальной научной задачей, которая позволит оценить устойчивость породного массива на участке «Енисейский» и повысить надежность геоэкологического обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

Цель работы заключается в геодинамическом районировании участка «Енисейский» Нижнеканского массива и прилегающих территорий по степени геодинамической устойчивости на основе системного анализа геолого-геофизических данных для геоэкологического обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

Идея работы состоит в использовании методов и алгоритмов дискретного математического анализа для выявления закономерностей пространственного распределения геолого-геофизических признаков, характеризующих геодинамическую устойчивость структурно-тектонического блока, в котором запланировано строительство пункта глубинного захоронения РАО.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **основные задачи**:

1. Выполнить системный анализ результатов исследований по оценке геодинамической устойчивости, в том числе в районах длительного хранения и захоронения РАО в геологических формациях;

2. Исследовать опыт применения методов дискретного математического анализа (ДМА) для пространственного анализа координатно-привязанных геолого-геофизических данных;

3. Разработать классификацию горно-геологических факторов, обуславливающих устойчивость геологической среды и создать ГИС-ориентированную базу данных по району исследования;

4. Разработать методику формализованной оценки геодинамической устойчивости в приложении к проблеме захоронения высокоактивных РАО в породах Нижнеканского массива;

5. Разработать алгоритмы нормализации данных при анализе функций изменчивости состояния геологической среды на основе метода ДМА и оценить их эффективность с использованием корреляционного анализа;

6. Оценить геодинамическую устойчивость участка «Енисейский» и прилегающих территорий;

7. Построить карты геодинамического районирования для использования в рекомендациях по организации геомеханического мониторинга и планирования натуральных экспериментов в выработках ПИЛ.

Методы исследований включают в себя анализ и обобщение научно-технической информации по проблеме исследования, математическое моделирование полей напряжений методом конечных элементов, полевые геологические наблюдения, методы системного анализа, вычисления и визуализация результатов на основе программного обеспечения ArcGIS, NextGIS QGIS и Python.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная классификация геолого-геофизических данных и их системный анализ, характеризующих опасные процессы и явления, позволяют выполнить в условиях априорной недостаточности информации оценку устойчивости геологической среды.

2. Районирование территории по степени опасности при захоронении радиоактивных отходов базируется на алгоритмах дискретного математического анализа динамических показателей, характеризующих длительную устойчивость структурно-тектонических блоков.

3. Ранжирование участка «Енисейский» и прилегающей территории на основе интегральной меры геодинамической безопасности позволило выполнить оценку долговременной устойчивости пункта размещения глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

Научная новизна состоит в:

- использовании динамических показателей при формализованном анализе пространственных геолого-геофизических данных как функций геодинамической активности геологической среды в приложении к проблеме подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов;
- - конструировании признаков на основе введения меры активности динамических показателей, указывающих на аномальность их пространственного распределения, методами системного и дискретного математического анализа;
- - выявлении слабой корреляционной связи мер активности динамических показателей, как свидетельства независимости используемого набора данных при системном анализе устойчивости структурных тектонических блоков в районе строительства ПИЛ;
- - дифференциации участка «Енисейский» и прилегающих районов по степени геодинамической устойчивости с использованием развитой методики геодинамического районирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- согласованностью полученных мер геодинамической безопасности с результатами натуральных геологических, геофизических и геоморфологических исследований;
- статистически значимыми оценками корреляции мер активности используемых признаков;
- соответствием и непротиворечивостью между собой расчетов, результатов математического моделирования, данных комплексных инструментальных наблюдений и сходимостью результатов районирования по трем независимым методикам.

Практическое значение и реализация результатов работы определяются значимостью создания пункта глубинного захоронения высокоактивных РАО в Красноярском крае для решения проблемы удаления РАО из биосферы и развития атомной отрасли. Методика оценки геодинамической безопасности входит в Программу геодинамических исследований в ПИЛ, реализуемой в настоящее время ГК «Росатом», по обоснованию долговременной безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО. Результаты работы могут использоваться также на горнорудных, проектных, строительных и инвестиционных организациях.

Реализация работы. Результаты работы использованы при выполнении положений документа «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждена Генеральным директором ГК «Росатом» А.Е. Лихачевым 28.03.2018 г.) и «Стратегического мастер-плана...» (Приложение А) [Дорофеев и др., 2017].

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в полевых геологических и геодезических работах на Нижнеканском массиве по сбору данных. Лично автором была создана база геолого-геофизических данных на основе ArcGIS [Лосев и др., 2020, 2024] по Нижнеканскому массиву и разработана методика дифференциации территорий по степени геодинамической устойчивости. Им созданы необходимые алгоритмы и

программные пакеты, защищенные РИДами [Лосев и др., 2022; Маневич и др., 2018, 2019, 2021, 2024], а также построены карты геодинамического районирования территории строящегося пункта глубинного захоронения РАО в Красноярском крае.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: «Неделя горняка» (Москва, 2018, 2019, 2021, 2023, 2024); Шестой международной научно-практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование», (Москва, МПГУ, 2018); XXVIII Всероссийской молодежной конференции земной коры «Строение литосферы и геодинамика» ИЗК РАН, (Иркутск, 2019); XI Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 2020); Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (Москва, 2021, 2024) Международной конференции к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН "Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли"(Суздаль, 2024).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 8 статьях, из которых 7 - в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 7 в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus/Web of Science. Получено 6 авторских свидетельств (РИД) на базы данных и программы для ПК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, списка литературы из 128 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 153 странице машинописного текста, содержит 8 таблиц, 47 рисунков и 1 приложение.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю д. т. н., К.С. Коликову за помощь в ходе работы над диссертацией. Глубокую благодарность автор выражает академику РАН, научному руководителю ГЦ РАН, д.ф.-м.н., основоположнику научной

школы системного анализа геолого-геофизических данных А. Д. Гвишиани. Автор признателен своим старшим коллегам из Геофизического центра РАН чл.-корр. РАН В.Н., д.т.н. Татаринovu, д.т.н. В.И. Кафтану, д.т.н. В.Н. Морозову, д.ф.-м.н. С.М. Агаяну и д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоеву за постоянное внимание и помощь над диссертацией. Автор признателен всем сотрудникам кафедр «Безопасность и экология горного производства» и «Геология и маркшейдерское дело», и в особенности научному руководителю в аспирантуре д.т.н. Ю. В. Кириченко Горного института НИТУ «МИСиС» за постоянное внимание и практические советы по теме исследования.

Материалом для данной работы послужили результаты, полученные автором в рамках работ по теме Государственного задания ГЦ РАН №: 122080300206-4: «Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей», утвержденного Минобрнауки России, и проекту РНФ № 18-17-00241. «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

1.1 Устойчивость геологической среды и проблема захоронения РАО

Геологическая среда представляет собой иерархически структурированную, активную динамическую систему, реагирующей на внешние энергетические источники, определяющие ее тектоническое развитие [Морозов и Татаринов, 1996; Садовский, 1989; Татаринов и др., 2018a]. Роль геологической среды в обеспечении технологической и геоэкологической безопасности подземных объектов различного назначения неразрывно связана с понятием «устойчивость». Различные авторы раскрывают термин с различных позиций: А.Д. Арманд [Арманд, 1983, 1988], Г.А. Голодковская [Голодковская и Елисеев, 1981], Г.К. Бондарик [Бондарик, 1981; 1984], В.К. Епишина и В.Т. Трофимов [Трофимов, 1994], З.В. Дашкевич [Дашкевич, 1984], Г.Л. Кофф с соавт. [Кофф и др., 1997], Ю.Г. Пузаченко [Пузаченко, 1983], В.Н. Морозов и В.Н. Татаринов [Морозов и Татаринов, 1996], А.Д. Гвишиани и В.Н. Татаринов [Гвишиани и Татаринов, 2019] и др. Под этим понятием они подразумевают:

- состояние, которое остается стабильным во времени или незначительно изменяется;
- сохранение постоянных качественных и количественных физических характеристик;
- способность восстанавливать свое прежнее состояние после возмущения;
- способность поддерживать жизненно важные параметры на определенном уровне за счет изменения других параметров;
- способность накапливать опасные воздействия без опасного разрушения на протяжении длительного времени;

- способность возвращаться в исходное состояние после возмущения и т.д.

Анализ внутреннего содержания термина позволил выявить его более глубокую сущность в приложении к проблеме. Важно понимать, что стабильность геологической среды не означает полную неподвижность или отсутствие изменений. Напротив, главное свойство геологической среды как раз заключается в ее эволюции и изменении [Сергеев, 1987; Трофимов, 1994]. Но это происходит в пределах определенных рамок, которые позволяют ей сохранять свои основные функции. Кроме того, устойчивость геологической среды имеет важное значение для сосуществования различных видов живых организмов. Система геологической среды предоставляет необходимые ресурсы и условия для поддержания жизни. Поэтому ее способность сохранять жизненно важные параметры на определенном уровне является неотъемлемой составляющей устойчивого функционирования окружающей среды [Голодковская, 1981; Королев и Николаева, 1994]. Только понимая и учитывая особенности геологической устойчивости, мы можем разрабатывать эффективную стратегию охраны окружающей среды, чтобы обеспечить устойчивое развитие нашей страны.

По отношению к проблеме захоронения РАО в геологических формациях понятие устойчивость было сформулировано В.Н. Татариновым. *Устойчивость геологической среды - это неизменность или изменение ее свойств, процессов и состояния в пределах, которые не приведут к опасным деформациям, напряжениям и структурным нарушениям во вмещающем инженерный объект структурно-тектоническом блоке в заданный интервал времени [Гвишиани и Татаринов, 2019].*

Диапазон изменения степени устойчивости связан с иерархией структурных тектонических блоков (пространственный масштабный эффект),

динамикой изменения из состояния, включая цикличность геодинамических процессов (временной масштабный эффект).

В определении заложены: перечень главных опасностей (связанных с ними признаков, подлежащих исследованию), степень опасности объекта (нормативные значения), необходимость проведения режимного мониторинга (время, цикличность процессов) и масштаб исследований (иерархический подход) [Татаринов и др., 2014а].

Изучение устойчивости среды является важной задачей при разработке и реализации проектов по захоронению РАО [Морозов и др., 2021; Татаринов и др., 2019а, 2019б; и др.]. Необходимо учитывать, как природные факторы, такие как различные геологические и техногенные процессы. Одним из ключевых аспектов устойчивости геологической среды является ее способность сохранять свои инженерно-геологические свойства на протяжении заданного времени [Андерсон и др., 2011]. Это время должно быть достаточным для обеспечения безопасности и предотвращения выхода радионуклидов за пределы рабочей зоны объекта. Важно также учесть возможность изменения инженерно-геологических свойств с течением времени, и принять меры для их контроля и стабилизации.

Геологический опыт свидетельствует, что процесс эволюции природных систем имеет общую черту – их структурное усложнение [Борняков, 2008; Садовский, 1989]. Это позволяет сделать вывод, что появление схожих тектонических структур в разных местах и временах не является случайным [Трифонов, 2001]. Однако, чтобы полностью понять и объяснить эти процессы, необходимо учитывать это в динамических параметрах. Рельеф, напряженное состояние породного массива, физико-механические свойства горных пород, геохимические ореолы, геофизические поля - все эти характеристики отражают проявление геодинамических процессов, приводящих в итоге к

образованию устойчивых пространственных структур в среде [Лобацкая, 2005; Нестеренко, 2021; Нестеренко и др., 2023; Олова, 1975; Петров и Мовчан, 2003]. Поэтому, изучение эволюции систем требует комплексного подхода и анализа различных аспектов взаимодействия среды и ее эволюционных процессов.

В основе оценки устойчивости подобных систем лежат представления о развитии диссипативных структур [Борняков, 2008; Петров и Мовчан, 2003]. Эти структуры возникают в неравновесной среде, когда энергия рассеивается источником извне. Одним из примеров таких структур является геологическая среда, которая представляет собой наглядное представление режима развития диссипативных структур [Кочкин и Петров, 2015; Ломтадзе, 1977; Морозов и Татаринов, 1996; Сим, 1991]. Наглядное представление режима развития таких структур, к которым можно отнести и геологическую среду, показано на рисунке 1.1.

На нем показан возможный характер изменения некоторого абстрактного признака системы во времени. На начальной стадии происходит изменение признака (а, б). При достижении некоторого значения $F_{i\text{кр}}$ у системы появляется два энергетических пути развития: разрушение и переход в изначальное состояние или дальнейшее накапливание энергии и переход в новое состояние, но на новом уровне. При этом на стадии перехода в неустойчивость возможны некоторые флуктуации. Из рисунка видно, что надо искать при анализе данных, чтобы выявить переход к неустойчивости, помимо роста их абсолютных значений. Это изменение скорости (градиента) и развитие флуктуаций.

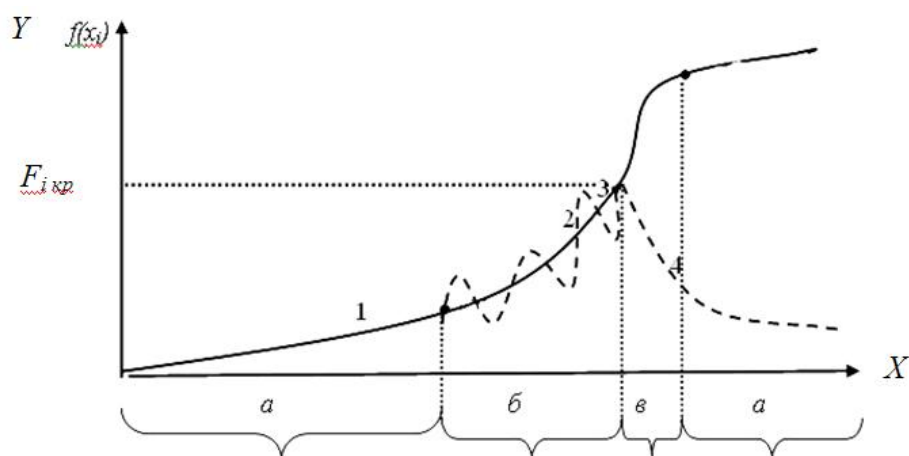


Рисунок 1.1 – Траектория эволюция диссипативной системы. 1 - кривая, описывающая изменение одного из признаков во времени; 2 – возможные флуктуации на стадии неустойчивого режима развития; 3 – точка бифуркации; 4 – один из вариантов дальнейшего развития

Если мы рассмотрим структурный тектонический блок, вмещающий ПГЗРО, как диссипативную механическую систему, то полная энергия, поступающая в блок из окружающей его литосферы, будет состоять из кинетической и потенциальной энергии. Циклическое, затухающее и трендовое развитие системы, основанной на кинетической и потенциальной энергии, может привести к неупорядоченному его состоянию. При анализе устойчивости необходимо учитывать основные свойства систем: локальность, открытость и нелинейность. *Локальность* позволяет выделять отдельные структуры из более крупных иерархических систем. *Открытость* характеризует взаимодействие с окружающей средой. *Нелинейность* является результатом воздействия множества источников на развитие объекта [Лосев и др., 2020, 2024; Морозов и др., 2008а].

Существенный вклад в понимание влияния параметров геологической среды на ее устойчивость внес М.А. Садовский. Построенная им модель

«геофизической среды» базируется на следующих положениях [Садовский, 1989; Садовский и Писаренко, 1991]:

1) Среда состоит из иерархической последовательности блоков, прочность которых значительно больше разделяющих их прослоек;

2) Структурные блоки в различной степени «насыщены» энергией, поступающей из внешних систем. Достигнув неустойчивого состояния, некоторые блоки «сбрасывают» энергию, вызывая деформирование среды в асейсмичных районах или ее разрушение в сейсмических областях;

3) Деформирование сопровождается образованием в геологической среде пространственных структур, которые можно рассматривать как самоорганизацию среды, служащую для трансформации энергии;

4) Накапливаемая потенциальная энергия в структурных объемах среды диссипируется, в основном, на иерархической системе поверхностей (границы блоков, земная поверхность, обнажения горных выработок).

М.А. Садовский подчеркивал, что важно выявлять свойства блочной среды, которые отражают ее устойчивость и ее способность к активности: «Дискретные свойства среды появляются в сравнительно медленно протекающих процессах деформирования горных масс, что находит отражение в дискретных (в пространстве и времени) характеристиках современных движений земной коры».

Важными техногенными факторами, которые оказывают влияние на устойчивость ПГЗРО, являются время его эксплуатации, степень опасности радионуклидов, геометрические размеры выработок и ориентировка их расположения относительно тектонических структур [Андерсон и др., 2011]. Эти факторы требуют учета при выборе мест размещения таких объектов [Морозов и Татаринов, 1996].

Оценка устойчивости ПЗГРО представляет собой анализ различных видов внешних воздействий – значимых и незначимых. В соответствии с принципом "слабого звена", мы классифицируем факторы и рассматриваем только те, которые имеют наибольшее влияние на устойчивость, интегрируя их в разрабатываемую методику [Рагозин, 1997; Tatarinov et al., 2018].

В публикациях и нормативах, включая рекомендации МАГАТЭ, район исследования делится на различные по иерархии масштабные уровни. Это позволяет более точно определить уровень устойчивости каждого конкретного участка (рисунок 1.2) [Гвишиани и др., 2021a; Татаринов и др., 2018]. Этот подход основан на принципе перехода от общего к частному, начиная с анализа процессов на самом крупном масштабном уровне, примерно 300 км [Андерсон и др., 2011; Гвишиани и Татаринов, 2019; Татаринов, 2001].

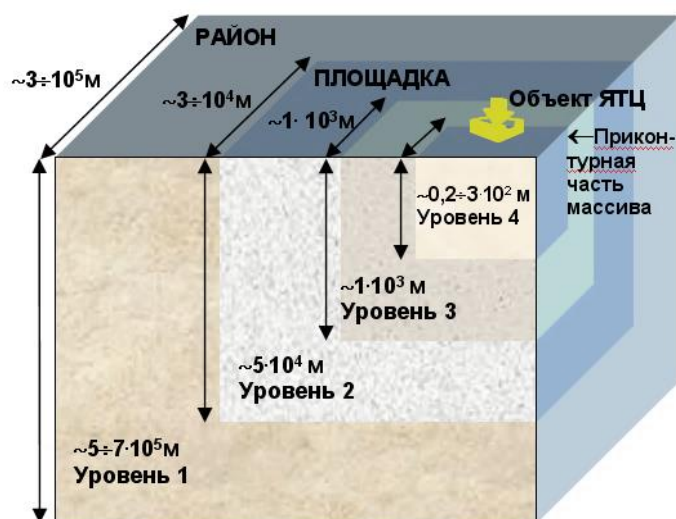


Рисунок 1.2 – Иерархический подход к системному изучению геологической среды при выборе мест размещения объектов ядерного топливного цикла [Татаринов, 2001]

Такой подход соответствует международным стандартам, установленным МАГАТЭ, и позволяет наиболее полно изучить и понять факторы, влияющие на устойчивость геологической среды. Для более

глубокого понимания геологических процессов, связанных с деформациями в земной коре, необходимо провести комплекс анализов и исследований. Одним из ключевых этапов является анализ космических снимков, данных геофизических наблюдений и рельефа, а также создание карты линеаментов [Андерсон и др., 2011; Бондарик, 1984; Бусыгин и Никулин, 2016]. Эти данные позволяют оценить сейсмическую опасность от землетрясений и другие важные параметры.

После этого начинаются более глубокие исследования, направленные на анализ и прогноз напряженно-деформированного состояния структурного тектонического блока. В рамках этих исследований проводится реконструкция тектонического режима с определением направления действия главных напряжений, разрабатываются структурные и кинематические модели на основе данных GPS/ГЛОНАСС наблюдений, а также проводится расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) [Морозов и др., 2008а; Морозов и др., 2021; Руководство по геодинамическому ..., 2012].

Для более точной оценки устойчивости земной коры активно используются данные о современных движениях земной коры (СДЗК), полученные с использованием ГНСС-методов [Андерсон и др., 2011; Миллюков и др., 2015; Татаринов и др., 2018а]. Основной задачей здесь является выделение и классификация территорий по скоростям деформаций земли, а также выявление участков с наиболее высоким риском растяжения и сжатия [Татаринов и др., 2014а]. Важным шагом в этом направлении стало создание уникального геодинамического полигона в районе Нижнеканского массива в 2010-2012 гг. [Андерсон и др., 2011; Морозов и др., 2008а; Татаринов, 2006].

Несмотря на значительные достижения, проблема оценки и прогнозирования устойчивости земной коры на длительные временные промежутки все еще остается актуальной и требует разработки новых научных

и методических подходов. Важно учитывать различные факторы, такие как геологические особенности региона, климатические изменения, антропогенное воздействие и другие, для более точного анализа и прогнозирования деформаций и сейсмической активности [Батугин, 1997; Дзедоев, 2019].

Для прогнозирования радиобиологической опасности радиоактивных отходов, превышающей 10 тысяч лет, требуется анализ временных рядов данных о свойствах и процессах. Экстраполяция этих данных в долгосрочной перспективе основана на предположении о сохранении текущих тенденций эволюции среды. Однако реальное развитие ситуации зависит от сложной динамики процессов и множества влияющих факторов. Важно понимать, что точность таких прогнозов сильно зависит от границ экстраполяции и степени учета всех возможных сценариев развития событий.

Для эффективного решения проблем неопределенности в геодинамике необходимо внедрение системного подхода, который не только упорядочивает исследования, но и помогает анализировать их результаты [Гвишиани 2008; Гвишиани и др., 2021а, 2021б; Семенов, 2013; Татаринов и др., 2018б; Gvishiani et al., 2021]. Системный анализ включает в себя разнообразные методы и алгоритмы, которые выявляют важные зависимости между геологическими процессами и состоянием окружающей среды. Эти зависимости являются основой для последующей классификации территорий по степени их геодинамической устойчивости и дальнейшее её геодинамическое районирование. Исследования, проведенные в данной области, подчеркивают важность системного подхода и его влияние на принятие обоснованных решений в геологии.

1.2 Анализ опыта геодинамического районирования

В горных науках широко применяется метод геодинамического районирования, важной задачей которого является выявление активных тектонических блоковых структур, их кинематики и взаимодействия [Петухов и Батугина, 1990; 1999]. Метод геодинамического районирования активно применяет традиционные методы математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС). Эти методы позволяют проводить анализ полей напряжений в различных вариантах, а также использовать разнообразные инженерно-геологические параметры (например, кинематический, блочный, экспертной оценки и др.) [Батугин, 2006; Батугина, 1988; Гвишиани и др., 2008; Морозов и др., 2021; Петухов и Батугина, 1990; Руководство по геодинамическому ..., 2012; Morozov et al., 2019].

Метод геодинамического районирования был создан И.М. Петуховым и И.М. Батугиной [Батугина, 1988; Петухов и Батугина, 1999; Петухов и др., 1989; Петухов и Линьков, 1983] в конце 1970-х годов во ВНИМИ и позже модифицирован [Морозов и др., 2021; Николаев, 1988; Руководство по геодинамическому ..., 2012]. Изначально, его задачей было предотвращение горных ударов во время добычи полезных ископаемых, а концепция заключалась в изучении тектонических напряжений и блоковой структуры земной коры. В публикациях [Батугин, 2006; Морозов и др., 2008; Петухов и Батугина, 1999; Петухов и др., 1989; Tatarinov et al., 2018] подчеркивается, что геодинамические явления проявляются зонально. Было установлено, что горные удары связаны с касательной компонентой тензора напряжений, а ориентация компонент тензора и тип напряженного состояния связаны с иерархией тектонических блоков [Батугин, 2006; Петухов и Батугина, 1999].

В 1956 году И.М. Петухов высказал гипотезу о том, что энергия горного удара зависит не только от энергии упругого сжатия пласта, но и от энергии, поступающей из граничных очагу областей. В методе заложен принцип системного подхода "от общего к частному", который помог выявить взаимодействие блоков различного ранга (I, II, III, IV и т.д.) [Алексеев и др., 2003; Батугина, 1988]. В общем метод основан на последовательном решении следующего ряда задач [Петухов и Батугина, 1990].

1. Выявление блочной структуры строения верхней части земной коры в ее иерархической подчиненности с выделением напряженных и разгруженных зон;

2. Оценка динамики взаимодействия блоков с определением параметров их смещений и деформаций;

3. Ранжирование участков земной коры по степени напряженно-деформированного состояния и уровня геодинамической опасности;

4. Разработка мероприятий по снижению геодинамической опасности при проектировании отработки месторождений.

Метод геодинамического районирования широко использовался и при строительстве газо- и нефтепроводов, транспортных объектов, гидростанций, подземных сооружений и других проектов. Нормативные документы «Роснадзора» включают принципы геодинамического районирования для обеспечения геоэкономической безопасности при выборе местоположения объектов ядерного топливного цикла [Петухов и Батугина, 1990, *Руководство по геодинамическому ...*, 2012; и др.]. Оценка динамики взаимодействия блоков и определение параметров их смещений и деформаций являются важными шагами в этом процессе. Также проводится ранжирование участков земной коры по степени НДС и уровню геодинамической опасности [Морозов и др., 2008б; 2016; 2021; Татаринов и др., 2014а].

Важное место в методе занимает классификация природно-техногенных факторов, оказывающих влияние на устойчивость. На рисунке 1.3 показаны наиболее значимые внутренние и внешние источники дестабилизации геологической среды для различных типов объектов ядерного топливного цикла [Андерсон и др., 2011; Трифонов, 1985, 2001].

Другой подход – так называемый «кинематический метод геодинамического районирования» [Татаринов и др., 2014б] основан на изучении современных движений структурных блоков, с последующим переходом к деформациям и напряжениям. В этом подходе в качестве граничных условий задаются не абсолютные величины напряжений, которые трудно измерить из-за крайней неоднородности геологической среды и влияния масштабного эффекта, а скорости движений блоков, устанавливаемые по данным ГНСС-наблюдений с точностью до 2-3 мм/год на базисах до 10 км.

В методике экспертной оценке устойчивости геологической среды, разработанной В.Н. Морозовым и В.Н. Татариновым [Морозов и Татаринов, 1996], предложено использовать «потенциал устойчивости» (от лат. *potentia* – сила, запасы), представляющий собой интегральную оценку геодинамической активности территории, устанавливаемую по плотностям распределения комплекса параметров $\vec{F}_i = [f(x_i), \dots, f(x_m)]$, предварительно классифицированных по группам устойчивости:

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^N \varphi_i(x) \times C_i \times D_i, \quad (1.1)$$

где $\varphi(x_i)$ – экспертная оценка плотности распределения $f(x_i)$ фактора; N – количество факторов; C_i – цена фактора; D_i – коэффициент учета особенностей распределения \vec{F}_i .

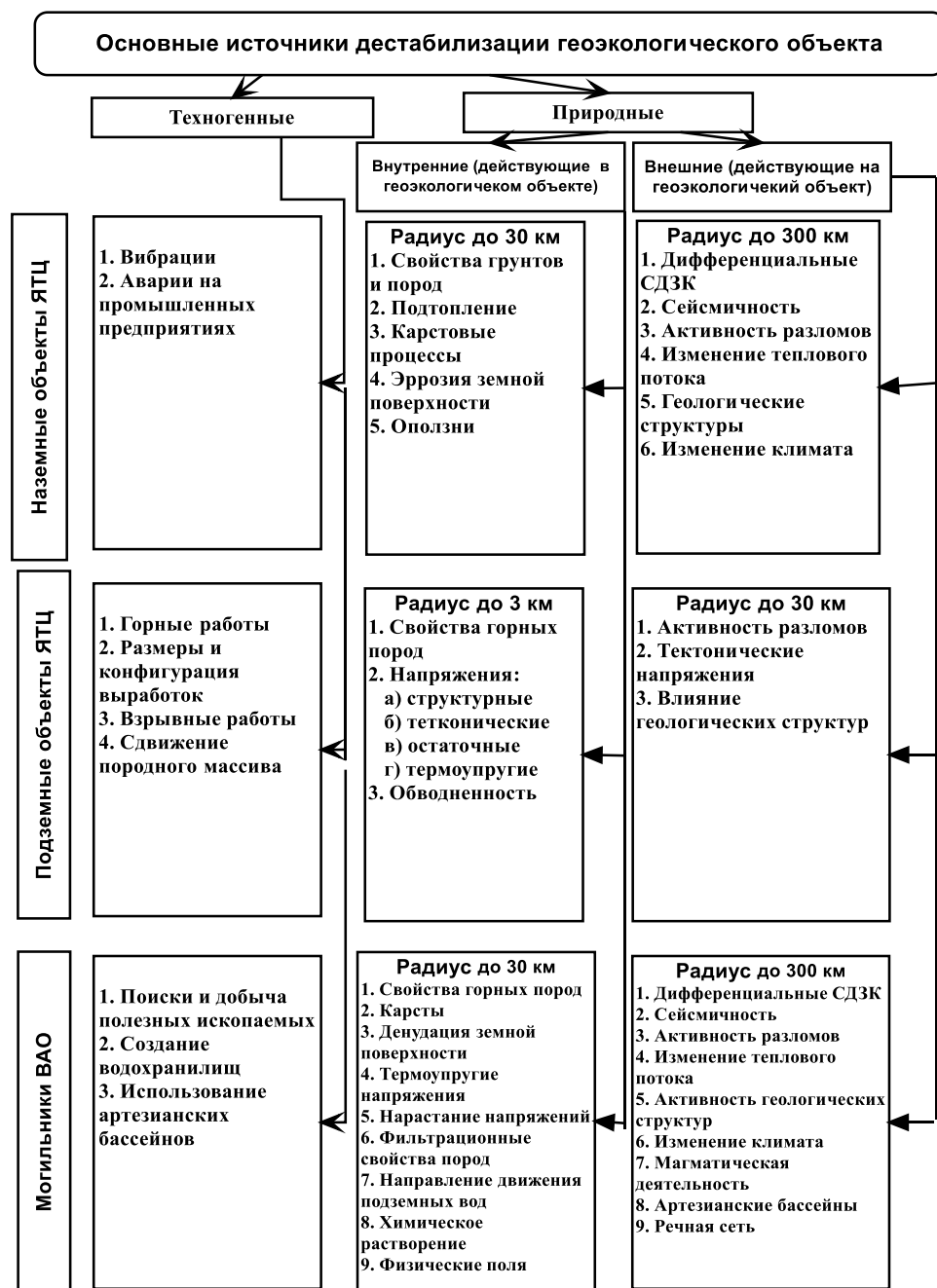


Рисунок 1.3 - Наиболее важные внутренние и внешние источники дестабилизации геологической среды для различных типов объектов ядерного топливного цикла [Андерсон и др., 2011]

Помимо балльной оценки различных факторов \vec{F}_i (структурной нарушенности, геофизических полей, рельефа, скоростей СДЗК и др.) учитываются особенности их распределения по величине $grad \vec{F}_i$ (для

скалярного поля) или $div \vec{F}_i$ (для векторного поля).

Следующая методика геодинамического районирования основана на анализе степени опасности НДС, обусловленной образованием зон концентрации напряжений, с помощью совокупности концентраций 3-х характеристик: потенциальной энергии деформации, модуля градиента деформации и потенциальной энергии формоизменения [Морозов и др., 2008а; Татаринов и др., 2014б]. Здесь для описания НДС привлекаются энергетические параметры, связанные с сопротивлением пород блока возможному разрушению: накопленную потенциальную энергию деформации (за счет которой и могут происходить нарушения сплошности среды); модуль градиента энергии (являющегося мерой наибольшего убывания энергии по направлению, противоположному направлению градиента энергии); девиаторная составляющая энергии – т.н. потенциальная энергия формоизменения [Гвишиани и др., 2019а].

Большой прогресс в оценке устойчивости пород Нижнеканского массива достигнут группой ученых научной школы академика А.Д. Гвишиани [Agayan et al., 2020а, 2020б; 2021; Gvishiani et al., 2008, 2021]. Ими был разработан оригинальный системно-аналитический метод районирования, когда комплекс экспериментальных геолого-геофизических данных и результаты моделирования трансформируются в нечеткие структуры и рассчитывается единый интегрированный показатель геодинамической безопасности [Гвишиани и Татаринов, 2019; Agayan et al., 2021; 2022].

Методы дискретного математического анализа (ДМА) и машинного обучения используют понятие «признак». *Признак* — это измеримое свойство или характеристика наблюдаемого явления. Выбор информативных и независимых признаков является важнейшим действием при распознавании образов, классификациях и регрессии [Jiang et al., 2020; Nino-

Adan et al., 2021]. Значениями признаков могут быть числовые ряды, изображения, функции, графы, результаты запросов к базе данных, и т. д. Однако такие задачи, как поиск аномалий в геофизических полях, геодинамическое районирование и ряд других актуальных задач оценки природно-техногенных рисков, требуют создания более эффективных признаков. Для задач анализа данных признаки синтезируются с применением математического моделирования [*Jia et al., 2021; Jing et al., 1995; Pérez - Aguirre et al., 2021*]. Часто они содержат сложные математические конструкции, которые сложны для физической интерпретации. Поэтому признаковая модель объекта должна быть адекватно проанализирована, а результаты анализа должны корректно отражать реальное состояние геологической системы [*Agayan et al., 2022*].

На основе анализа различных методик геодинамического районирования была выстроена следующая схема обоснования пригодности площадки ПИЛ для захоронения высокоактивных РАО (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Блок-схема геодинамического районирования для обоснования пригодности площадки ПИЛ для захоронения высокоактивных РАО

Схема включает четыре блока задач: выявление блочных структур и геодинамических зон, проведение необходимых инструментальных наблюдений, математическое моделирование НДС, районирование в виде построения карт и схем геодинамической устойчивости (безопасности).

Подводя итог анализа опыта применения различных подходов к геодинамическому районированию, можно сделать следующие выводы.

1. Фундаментальное отличие ПГЗРО от других подземных объектов заключается в его сроке эксплуатации. Если для горнорудных предприятий или АЭС он составляет период порядка 50-100 лет, то для ПГЗРО – до 100 тыс. лет.

Это предъявляет расширенные требования к перечню и объему геолого-геофизических характеристик, классификации и методам анализа.

Длительный период эксплуатации ПГЗРО определяет необходимость [Кочкин, 1998]:

а) анализа широкого перечня характеристик геологической среды, т.к. со временем увеличивается вероятность развития многих негативных процессов и явлений, кумулятивного накопления критических для объекта параметров;

б) учета дополнительных факторов, увеличивающих неопределенность прогноза, т.к. начинают влиять пространственно-временные эффекты, например, цикличность геодинамических движений, вероятность наступления сильного сейсмического события при увеличении временного интервала и др.

2. Структурный тектонический блок необходимо рассматривать как динамическую активную систему с распределенными параметрами, которые зависят от времени и от координат. Поэтому при оценке устойчивости исходная информация рассматривается как многомерные пространственно-временные наборы данных. Степень активности геологической среды отражается в пространственных особенностях (геоморфологии) их распределения, включая рельеф земной поверхности и геофизические поля. На этом основаны методы выделения линеаментов, активных разломов, зон повышенной трещиноватости, складок, карста и т.д. [Бондарик, 1984; Ильин, 2008; Лукина и др., 1990; Руководство по геодинамическому ..., 2012; Agayan et al., 2020; 2022; Gvishiani et al., 2021].

3. Для выявления пространственных особенностей распределения данных наиболее эффективно применение современных методов математического моделирования и методов системного анализа на основе ДМА.

1.3 Анализ требований к геодинамическим исследованиям в районах захоронения РАО

При разработке методики геодинамического районирования необходимо опираться на рекомендации Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и Руководств по безопасности [НП-100-17; НП-064-05; НП-050-03; НП-032-19; НП-016-05; РБ-019-01 (РБ-019-18); РБ-142-18]. В НП-064-05 устанавливаются 3 степени опасности процессов, явлений и факторов природного происхождения:

I степень – особо опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся максимально возможными значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и сопровождающийся природными и/или техногенными катастрофами;

II степень – опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся достаточно высокими (но не выше, чем известное максимальное значение) значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени;

III степень – не представляющий опасности процесс (явление, фактор), характеризующийся низкими значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени.

Площадки размещения объектов ЯТЦ ранжируются в зависимости от степени опасности, реализующихся на них процессов, явлений и факторов. Устанавливаются три класса площадок: А – площадка, на которой отсутствуют внешние воздействия I и II степеней опасности; Б – площадка, на которой отсутствуют внешние воздействия I степени опасности; В – площадка, на которой имеются внешние воздействия I-III степеней опасности.

Активные тектонические разломы, вне зависимости от их масштаба, являются частью геодинамических зон, для которых *доказана подвижность на протяжении четвертичного периода (1,6 млн. лет)*. Этот тезис определяет

«двухстадийный» подход к геодинамическому районированию. На стадии 1 выявляется положение геодинамических зон, на стадии 2 доказывается или опровергается допущение об их активности и определяется степень подвижности с помощью инструментальных и натурных измерений (заверка бурение, траншеи, геодезические наблюдения и др.). Если это не удастся, то тогда принимается заведомо консервативная оценка, т.е. такие зоны считаются активными.

Кроме этого, в РБ-019-18 указано на необходимость выполнения геодинамического районирования:

- «При проведении исследований рекомендуется обосновывать минимально допустимое удаление площадки от геодинамических зон и активных разломов;

- Исследования геодинамических условий ближнего района и площадки размещения ОИАЭ рекомендуется проводить для территории, ограниченной радиусом 30 км, на картографических материалах в масштабе 1:50 000 для выбора однородного тектонического блока, в пределах которого нет геодинамических зон и активных разломов».

Там же даны определения основных терминов.

Геодинамическая зона - это межблоковая граница, в пределах которой на неотектоническом, четвертичном и современном этапах геологического развития выявлен широкий спектр проявлений эндогенных (в том числе тектонической активности и землетрясений) и экзогенных процессов [РБ-019-18]. *Геодинамическая зона* - это линейный или кольцевой участок земной коры, в пределах которого установлен градиент скорости четвертичных движений 10^{-9} в год и более [РБ-142-18].

Как видно, под геодинамической зоной понимается участок земной коры (в большинстве случаев линейный) подвижность которого существенно выше

фоновой и имеет признаки «проявления» на земной поверхности. Представляется, что главная задача разрабатываемой методики заключается в выявлении подобных зон и ранжирование территории по степени их опасности для ПГЗРО.

Активный разлом – тектоническое нарушение с признаками постоянных или периодических перемещений бортов разлома в четвертичный период геологического развития (1,6 млн. лет), величина (скорость) которых такова, что она представляет опасность для сооружений и требует специальных мероприятий для обеспечения их безопасности [РБ-019-18]. Второе определение [НП-064-05]: *активный разлом* - тектонический разлом, по которому за последние 1 млн. лет (четвертичный период) произошло относительное перемещение примыкающих блоков земной коры на 0,5 м и более.

В нормах МАГАТЭ по безопасности SSG-9 рекомендуется проводить исследования путем последовательного сужения области исследований: регион (радиус 300 км), ближний район (радиус 25-30 км), район расположения площадки (радиус 3-5 км) и площадка (радиус порядка 1 км). Учитывая это результаты анализа инженерных изысканий и исследований рекомендуется представлять на основе картографических материалов следующих масштабов: по региону - 1:5 000 000 – 1:10 000 000; по району - 1:500 000; по ближнему району 1:50 000 (по аналогии с рисунком 1.1).

В качестве возможных критериев выделения геодинамических зон рекомендуется использовать:

- масштабность и геодинамическую активность на неотектоническом, четвертичном и современных этапах геологического развития локальных геодинамических зон и активных разломов;

- цепочки микроземлетрясений, установленных по результатам локального сейсмического мониторинга, проявление ощутимых и сильных землетрясений и палеоземлетрясений;
- данные режимных наблюдений методами геодезии, включая ГНСС;
- протяженные геоморфологические элементы;
- наличие протяженных аномалий геофизических полей и др. [НП-064-05].

1.4 Цель и задачи исследования

Прогноз длительной геодинамической стабильности геологической среды при подземной изоляции высокоактивных РАО в геологических формациях представляет собой сложную междисциплинарную научную задачу, которая в настоящее время не решена ни в одной стране мира. Анализ исследований в области оценки устойчивости геологической среды и опыта геодинамического районирования, а также существующих нормативных требований к условиям районов захоронения, позволил сформулировать цель, идею и основные задачи диссертационной работы.

Цель заключается в геодинамическом районировании участка «Енисейский» Нижнеканского массива и прилегающих территорий по степени геодинамической устойчивости на основе системного анализа геолого-геофизических данных для геоэкологического обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

Идея работы состоит в использовании методов и алгоритмов дискретного математического анализа для выявления закономерностей пространственного распределения геолого-геофизических признаков, характеризующих длительную геодинамическую устойчивость структурно-тектонического блока, в котором запланировано строительство пункта глубинного захоронения РАО.

Для доказательства научной гипотезы и достижения цели диссертационного исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить системный анализ результатов исследований по оценке геодинамической устойчивости, в том числе в районах захоронения РАО в геологических формациях;

2. Исследовать опыт применения методов дискретного математического анализа (ДМА) для пространственного анализа координатно-привязанных геолого-геофизических данных;

3. Разработать классификацию горно-геологических факторов, обуславливающих устойчивость геологической среды и создать ГИС-ориентированную базу данных по району исследования;

4. Разработать методику формализованной оценки геодинамической устойчивости в приложении к проблеме захоронения высокоактивных РАО в породах Нижнеканского массива;

5. Разработать алгоритмы нормирования данных при анализе функций изменчивости состояния геологической среды на основе метода ДМА и оценить их эффективность с использованием корреляционного анализа;

6. Оценить геодинамическую устойчивость участка «Енисейский» и прилегающих территорий;

7. Построить карты геодинамического районирования для дальнейшего использования в рекомендациях по организации геотехнического мониторинга и планирования натурных экспериментов в выработках ПИЛ.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

2.1 Системный подход к анализу координатно привязанных геолого-геофизических данных

В работах известного ученого в области системного анализа акад. А.Д. Гвишиани метод системного анализа характеризуется как «научный метод познания, в котором различные процессы, протекающие в сложных системах «человек – объект – окружающая среда» описываются формальным, математическим и/или формально-логическим, языком. Системный анализ – это понимание явлений через систему взаимодействующих его компонент друг с другом и с геологической средой. Системный анализ описывает явления в терминах системы, ее элементов, состояний элементов и взаимодействий элементов между собой и внешней средой» [Гвишиани и др., 2019a]. В начале исследований проблема трансформируется в математический аналог, который затем исследуется соответствующими методами системного анализа: оптимизации, геоинформатики, искусственного интеллекта, распознавания образов и т. д. [Гвишиани и Татаринов, 2019; Гвишиани и др., 2019a].

Системный подход состоит в том, что объект исследования рассматривается как самостоятельная система, обладающая своими особенностями функционирования и развития. Принцип системности предполагает представление объекта как системы, характеризующейся [Сурмин, 2003]: элементным составом; структурой как формой взаимосвязи элементов; функциями элементов и целого; единством внутренней и внешней среды системы; законами развития системы и ее составляющих.

Системный подход широко используется для принятия решений при прогнозировании и оценке экологической опасности природных и техногенных систем, включая горные предприятия и экологически опасные

объекты в земных недрах [Гвишиани и др., 2021б; Квейд, 1969; Овчинникова и др., 2024; Татаринов и др., 2018б; Холодов 2015; Чернышев и Чернышев, 2008; Agayan et al., 2022; Jia et al., 2021, и др.]. Метод активно применяли для решения различных задач в области наук о Земле известные ученые А.Д. Гвишиани, А.Н. Дмитриевский, А.А. Барях, В.Ю. Забродин, В.Н. Захаров, Ю.А. Косыгин, Л.И. Лобковский, А.А. Никитин, Н.М. Быкова, В.Н. Татаринов и др. Зародившись в конце 60-х годов прошлого века, метод системного анализа успешно развивался во многих странах мира и к настоящему времени показал высокую результативность и эффективность. В качестве примера можно привести многолетнюю деятельность Международного института прикладного системного анализа (IIASA) (Вена, Австрия, <http://www.iiasa.ac.at/>).

В геодинамике системным методом исследуется геологическая среда как активная многокомпонентная система (рисунок 2.1), учитывающая такие составляющие как - элемент, связь и взаимодействие [Гвишиани и др., 2018; Гвишиани и др., 2021; Agayan et al., 2022].



Рисунок 2.1 - Схема компонентов системы «Геологическая среда» с учетом [Чернышев и Чернышев, 2008]

Элемент - это самостоятельная часть системы, характеризующая свойство, состояние или процесс в среде. Сам элемент характеризуется только его внешними проявлениями в виде связей и взаимосвязей с остальными элементами.

Множество элементов системы можно описать в виде

$$F = \{f_i\}, i = 1, \dots, n, \quad (2.1)$$

где f_i – i -й элемент системы; n – число элементов. Каждый элемент f_i характеризуется свойствами Z_{i1}, \dots, Z_{im} (напряжения, плотность, температура и т.д.), которые определяют его в данной системе однозначно.

Совокупность всех m свойств элемента f_i называют состоянием элемента

$$Z_i = (Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, \dots, Z_{ik}, \dots, Z_{im}). \quad (2.2)$$

Связь характеризует зависимость свойств одного элемента от других. Множество Q связей между элементами можно представить в виде

$$Q = \{q_{ij}\}, i, j = 1, \dots, n. \quad (2.3)$$

Структура системы – совокупность элементов системы и связей между ними в виде множества

$$D = \{A, Q\}. \quad (2.4)$$

Внешняя среда – это набор существующих в пространстве и во времени объектов (систем), которые, как предполагается, действуют на систему.

Методология системного анализа [Квейд, 1969; Чернышев и Чернышев, 2008] включает в себя следующие последовательные действия при анализе информации (рисунок 2.2) [Гвишиани и др., 2019a]:

1. *Постановка задачи* – определение проблемы, выявление целей и границ решения, а также классификация признаков;
2. *Поиск* – создание баз данных, определение методов и средств достижения целей;
3. *Толкование* – построение различных моделей, их анализ;
4. *Реализация* – агрегирование наиболее вероятной альтернативы устойчивости структурного блока, геодинамическое районирование;
5. *Подтверждение* – экспериментальная проверка решения.

Необходимо особо подчеркнуть, что на каждом этапе исследования новые данные и новые знания о геодинамическом режиме территории последовательно интегрируются в базу данных (БД), которая на основе обратной связи постоянно корректируется (на рисунке 2.2 обратная связь

показана пунктиром). Обратная связь – одно из фундаментальных понятий теории систем.

В системном анализе можно выделить три главных направления [Гвишиани и Татаринов, 2019; Чернышев и Чернышев, 2008]. Сначала необходимо построить модель исследуемой системы, т.е. дать формализованное описание изучаемого объекта, затем - сформулировать критерий решения задачи системного анализа, т.е. обозначить задачу исследования и, в конце, решить задачу.



Рисунок 2.2 - Системный подход к анализу информации [Гвишиани и Татаринов, 2019]

Актуальной задачей при оценке устойчивости структурного тектонического блока является выделение в многомерном массиве геопространственных данных (геофизические поля, геохимия, космические снимки, рельеф, карты современных движений, данные сейсмологического мониторинга и другие) линейно вытянутых аномалий. Такого рода аномалии называются геодинамическими зонами. Известно, что они часто связаны с наиболее опасными подвижными тектоническими структурами в верхней части земной коры – разломами, границами блоков, линияментами, потенциальными зонами ВОЗ и др., которые выражены в рельефе [Гвишиани и др., 2021a; Agayan et al., 2020, 2021, 2022]. Очевидно, что именно такие зоны представляют наибольшую опасность и должны быть выявлены.

На рисунке 2.3 показана схема последовательности действий по оценке устойчивости участка «Енисейский» и место системного анализа.

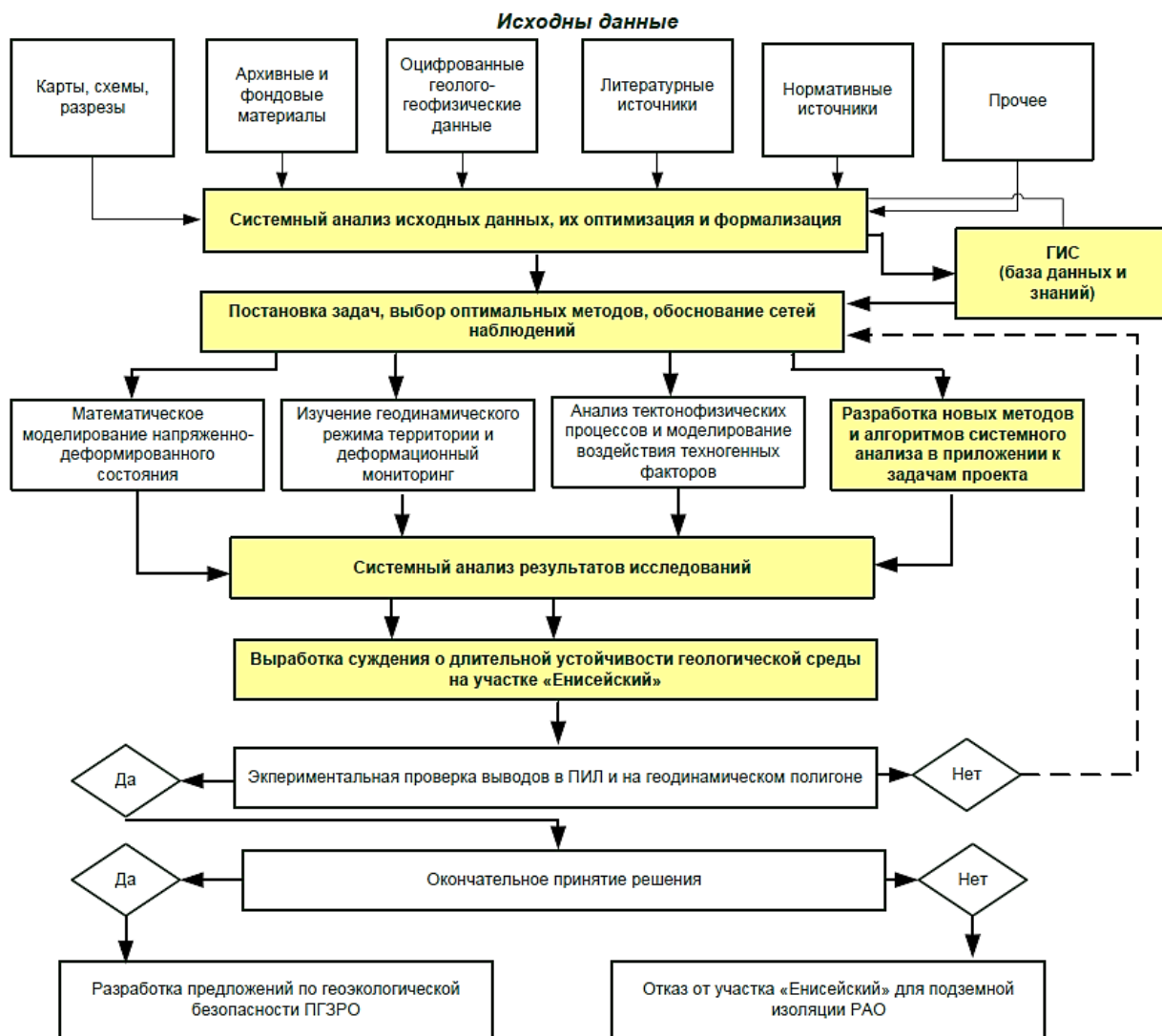


Рисунок 2.3 – Схема системного подхода к выработке решения о пригодности или не пригодности участка «Енисейский» для захоронения высокоактивных РАО. Желтым цветом выделены разделы, затронутые в настоящей работе

Основные процедуры алгоритма [Чернышев и Чернышев, 2008]:

- изучение структуры системы, анализ её компонентов, выявление взаимосвязей между отдельными элементами;
- сбор данных о функционировании системы, исследование информационных потоков, наблюдения и эксперименты над анализируемой системой;
- построение моделей;

- проверка адекватности моделей, анализ неопределённости и чувствительности;
- исследование ресурсных возможностей;
- определение целей системного анализа;
- формирование критериев;
- генерирование альтернатив;
- реализация выбора и принятие решений.

При этом активно используются алгоритмы ДМА [Гвишиани и др., 2018; *Agayan et al., 2021*], нацеленные на анализ данных: кластеризацию и трассирование в многомерных массивах, морфологический анализ рельефов, поиск аномалий и трендов на записях и так далее. Алгоритмы ДМА объединены общей формальной основой, базирующейся на нечетких сравнениях чисел и мерах близости в дискретных пространствах. Идея ДМА состоит в создании дискретных аналогов понятий классического математического анализа: предел, непрерывность, гладкость, связность, монотонность, экстремум и т.д. ДМА не противоречит классическим методам обработки данных, а дополняет их, но, по сравнению с ними, более ориентирован на моделирование логики эксперта или интерпретатора [*Agayan et al., 2020*].

Для анализа информации также широко используются методы искусственных нейронных сетей, методы распознавания образов, математической обработки, преобразования и интерпретации геологической информации, системно-структурный анализ строения экзогенных и эндогенных блоковых структур, методы проектирования систем точек сбора информации о свойствах и состоянии природно-техногенных систем и др. [Гвишиани и др., 2008, 2018, 2021а; Гвишиани и Татаринов, 2019; Татаринов и др., 2018б; *Agayan et al., 2021*].

2.2 Классификация инженерно-геологических явлений и процессов, влияющих на устойчивость структурно-тектонического блока

Первый шаг при выполнении геодинамического районирования заключается в сборе геолого-геофизических данных о районе исследований данных и их организации на основе ГИС. Многообразие геологических процессов и явлений и специфика решаемой задачи обуславливают необходимость их классификации. С методологической точки зрения, это распределение множества процессов и явлений на классы и подклассы в виде таблиц по определенному признаку. Проблемами классифицирования геологических процессов и явлений занимались известные геологи: Г. К. Бондарик, А.С. Батугин, Е.П. Емельянова, Ф. В. Котлов, В. Д. Ломтадзе, И. В. Попов, Ф. П. Саваренский, Е. М. Сергеев, В. Т. Трофимов и др.

Геологические процессы - процессы, протекающие в горных породах, часто вызывающие их движение и деформации, изменяющие их состояние, строение, состав, свойства, создающие новые генетические типы отложений, новые формы рельефа внутри массивов горных пород и на поверхности.

Геологические явления – это результат геологических процессов, приводящих к изменению пород и форм рельефа. Например, тектонические движения – процесс, а разлом – явление.

Согласно [Лосев и др., 2020] классификация геологических процессов и явлений – это деление совокупности соподчиненных единиц (групп, классов, типов, видов, разновидностей и др.) объектов «процесс» и «явление», для установления между ними связей, взаимоотношений, необходимых для решения конкретной задачи. В нашем случае совокупность процессов и явлений должна быть направлена на оценку геодинамической устойчивости (определение см. выше), гарантирующей геоэкологическую безопасность захоронения высокоактивных РАО.

Имеется достаточно большое количество различных инженерно-геологических классификаций, [Батугин, 1997; Бондур и Зверев, 2005; Ломтадзе, 1977; Морозов и Татаринов, 1996; Рац и Чернышев, 1970; Gitis and Ermakov, 2004; Kagan et al., 2014; Soloviev et al., 2018]. На основе их анализа с учетом задач настоящего исследования была разработана классификация, включающая в себя два блока (таблицы 2.1 и 2.2):

а) *опасные геологические явления и процессы* (ОГЯП), влияющие на устойчивость структурно-тектонического блока, вмещающего РАО;

б) *геологические условия* возникновения и активизации ОГЯП (ГУ ОГЯП).

Цель классификации заключалась в априорном выделении из весьма объемного списка геолого-геофизических данных именно тех, которые непосредственно характеризуют устойчивость СТБ [Agayan et al., 2022].

Множество $F = \{f_i\}$, $i = 1, \dots, n$, элементов геологических условий и явлений были объединены в две группы. В первую - входят *физические* характеристики пород (пределы прочности на сжатие и растяжение, модуль упругости, тепловые свойства, плотность и др.), характеристики структурной нарушенности среды и проницаемости (коэффициент структурного ослабления, коэффициент фильтрации, модуль трещиноватости, плотность теплового потока, уровень грунтовых вод и т.д.). Во вторую – *геодинамические* характеристики, определяющие напряженно-деформированное состояние и кинематику СТБ (напряжения, скорости горизонтальных и вертикальных современных движений земной коры, их градиенты, скорости деформаций, геометрические характеристики тектонических разломов, каталоги сейсмических событий и др.).

Таблица 2.1 - Опасные геологические явления и процессы (ОГЯП), определяющие длительную устойчивость структурных тектонических блоков

| Группа | Вид | Тип |
|--|---|---|
| <p><i>I. Сейсмические явления</i></p> | <p>Тектонические землетрясения (импульсные быстрые явления)</p> | <p>Катастрофические землетрясения $M > 8$</p> |
| | | <p>Сильные землетрясения $8 > M > 6$</p> |
| | | <p>Слабые землетрясения $M < 6$</p> |
| | | <p>Сейсмоакустические импульсы как индикаторы активности разломов</p> |
| | <p>Динамические формы разрушения породных массивов (влияние выработанного пространства от техногенного объекта)</p> | <p>Горно-тектонический удар</p> |
| | | <p>Горный удар</p> |
| | | <p>Микроудары, стрельяния, шелушение, заколообразование</p> |
| | <p>Техногенные сейсмические явления</p> | <p>Техногенные землетрясения</p> |
| | | <p>Воздействие на приконтурную часть массива взрывных горнопроходческих работ</p> |
| | | <p>Вибрации от промышленных объектов</p> |
| <p><i>II. Тектонические движения земной коры</i></p> | <p>Новейшие тектонические движения. Движения неогенового (23,03-2,58 млн лет) и антропогенового этапов (начался 2,58 млн. лет</p> | <p>Геоморфологические особенности рельефа и речной сети рельефа</p> |

| | | |
|--|---|---|
| | назад) | |
| | Исторические движения (длительность движений 100-6000 лет) | Сейсмодислокации |
| | | Перемещения и деформации, фиксируемые по историческим и археологическим данным. |
| | Современные движения земной коры (возраст ~ 0-100 лет) | Вертикальные движения |
| | | Горизонтальные движения |
| | | Экзогенные движения (оползни) |
| | Техногенные движения (время 10^{-8} - $6 \cdot 10^3$ год) | Оседание земной поверхности при образовании выработанного пространства |
| | | Горизонтальные техногенные движения |
| | Дифференцированные (интенсивные) движения в зоне тектонических разломов | Сдвиг |
| | | Сброс |
| | | Взброс |
| <i>III. Структурная нарушенность геологической среды</i> | Трещинообразование | Тектоническая трещиноватость |
| | | Трещиноватость от медленных геодинамических процессов (деформации) |
| | | Трещинообразование в подработанном массиве |
| | | Сейсмогенная |

| | | |
|--|--|--|
| | | трещиноватость |
| | | Техногенная трещиноватость вокруг горных выработок (от воздействия БВР) |
| | | Трещинообразование в зонах повышенной концентрации напряжений (деструкция пород) |
| | Разломообразование | Образование тектонического разлома пересекающего СТБ |
| | | Образование тектонического разлома за пределами СТБ (оценка влияния на сам СТБ) |
| | | Образование тектонического разлома в ходе медленных геологических процессов |
| | Техногенное нарушение структуры массива | Горные работы, образование выработок |
| | | Бурение скважин |
| | | Оседание земной поверхности |
| | <i>VI. Гидрогеологические и гидрологические явления и процессы</i> | Гидрология (деятельность вод) |
| Заболачивание и подтопление | | |
| Подмыв и разрушение берегов (абразия, переработка берегов, промоины) | | |

| | | |
|---|--|--|
| | | Верховодка (фильтрация вод с поверхности из-за осадков, метеорологических особенностей региона) |
| | Эрозионные гидрогенные процессы | Склоновая эрозия |
| | | Овражная эрозия |
| | | Речная эрозия |
| | | Сели |
| | Фильтрационное разрушение горных пород | Фильтрационный выпор |
| | | Суффозия (внутренняя, внешняя) |
| | | Карст (карбонатный, сульфатный, соляной) |
| | | Плывуны (истинные – на глинах, псевдо – на песках) |
| | | Прорывы воды в горных выработках |
| <i>V. Экзогенные геологические явления и процессы</i> | Оползни | Оползни структурные |
| | | Оползни пластические |
| | | Оползни структурно-пластические |
| | | Оползни-обвалы |
| | Обвальные процессы и явления | Обвалы и обрушения |
| | | Вывалы |
| | | Осыпи |
| | Эрозия и выветривание | Эрозионные явления |

Таблица 2.2 – Геологические условия возникновения и активизации ОГЯП

| Группа геологических условий | Вид | Индекс | Тип |
|--|--|------------|--|
| <i>I. Общегеологические и структурно-тектонические условия</i> | Геотектоническая обстановка района | G1C1T 1 | Платформенные области (платформы) |
| | | G1C1T 2 | Области активного орогенеза (орогены) |
| | | G1C1T 3 | Геосинклинали |
| | | G1C1T 4 | Области равнин и низкогорий (срединные массивы) |
| | | G1C1T 5 | Области тектонических процессов на конвергентных границах литосферных плит |
| | Структурная нарушенность геологической среды | G1C2T 1 | Трещиноватость горных пород |
| | | G1C2T 2 | Разломы и разрывы |
| | | G1C2T 3 | Глубинные тектонические разломы |
| | | G1C2T 4 | Зона динамического влияния тектонического разрыва |
| | Сейсмологические и | G1C3T 1 | Сейсмический режим района |

| | | | |
|---|---|------------------------|--|
| | тектонофизические условия | G1C3T 2 | Тектонические напряжения |
| | | G1C3T 3 | Гравитационные напряжения |
| | | G1C3T 4 | Ориентация осей тектонических напряжений |
| II. Геоморфологические условия | Общая геоморфологическая обстановка | G2C1T 1 | Формы рельефа |
| | | G2C1T 2 | Расчлененность рельефа |
| | Морфоструктуры | G2C2T 1 | Элементы рельефа |
| | | G2C2T 2 | Линеаменты |
| | | G2C2T 3 | Гипсометрические характеристики рельефа |
| | | G2C2T 4 | Эрозионная сеть |
| | III. Инженерно-геологические, гидрогеологические, гидрологические, инженерно-гидрометеорологические условия | Геологическое строение | G3C1T 1 |
| Гидрогеологические условия | | G3C2T 1 | Водоносные горизонты |
| | | G3C2T 2 | Водоупоры |
| Гидрологические и метеорологические условия | | G3C3T 1 | Поверхностные водные объекты |
| | | G3C3T 2 | Метеорологический режим района |
| IV. Геофизические поля | Геофизические поля | G4C1T 1 | Гравитационное поле |
| | | G4C1T 2 | Электрическое и магнитное поле |

| | | | |
|---|------------------------------------|------------|---|
| | | G4C1T 3 | Аномалии скоростей распространения упругих волн |
| | Тепловое поле | G4C2T 1 | Тепловой поток |
| | | G4C2T 2 | Температурный градиент |
| <i>V. Физические свойства минералов, горных пород, массивов пород и окружающих сред</i> | Механические свойства | G5C1T 1 | Образцов горных пород и минералов |
| | | G5C1T 2 | Массива горных пород |
| | Плотностные и структурные | G5C2T 1 | Образцов горных пород и минералов |
| | | G5C2T 2 | Массива горных пород |
| | Тепловые свойства | G5C3T 1 | Образцов горных пород и минералов |
| | | G5C3T 2 | Массива горных пород |
| | Электрические и магнитные свойства | G5C4T 1 | Образцов горных пород и минералов |
| | | G5C4T 2 | Массива горных пород |
| | Химические свойства | G5C5T 1 | Горных пород и минералов |
| | | G5C5T 2 | Подземных и поверхностных вод |
| | Фильтрационные свойства | G5C6T 1 | Образцов горных пород и минералов |
| | | G5C6T 2 | Массива горных пород |
| | Радиационные свойства | G5C7T 1 | Горных пород и минералов |

| | | | |
|--|---|------------|---|
| | | G5C7T 2 | Подземных и поверхностных вод |
| VI. Условия сформированные техногенным воздействием и взаимодействием с окружающей средой | Наличие техногенных объектов | G6C1T 1 | Инженерные сооружения на поверхности земли |
| | | G6C1T 2 | Подземные и инженерные сооружения |
| | Источники изменения свойств геологической среды | G6C2T 1 | Изменения физических свойств минералов, горных пород, массивов пород и окружающих сред |
| | | G6C2T 2 | Изменения геофизических полей |
| | | G6C2T 3 | Изменение геоморфологически х условий |
| | Силовое воздействие на структурно- тектонический блок | G6C3T 1 | Образование полостей из-за проходки горных выработок |
| | | G6C3T 2 | Сейсмическое воздействие (вибрации, взрывные работы и т.д.) |
| | | G6C3T 3 | Закачка флюидов в геологический массив |

Главная задача классификации (таблица 2.1) – максимально дифференцировать ОГЯП, отразить неделимые таксономические единицы системы опасных геологических процессов. Главная задача второй классификации (таблица 2.2) – обобщить множество геологических условий,

ответственных за формирование и активизацию ОГЯП. В итоге, формулируются две задачи: оптимальное обобщение геологических условий и максимальная детализация таксономических единиц опасных процессов и явлений.

Классификация несет прикладной характер, не претендуя на общую таксономию. Процесс ее создания основан на анализе научной и нормативно-правовой литературы из областей геотектоники, структурной геологии, геомеханики, геоморфологии, инженерной геологии и гидрогеологии, неотектоники, инженерной геодинамики и геотектоники, а также строительные правила, ГОСТы, нормативные требования МАГАТЭ и отдельные другие. Всего было проанализировано около 15 нормативных документов.

Систематизация ОГЯП содержит 3 уровня (таблица 2.1) – определены группы, виды и типы. Группа идентифицирует ОГЯП, указывает на его принадлежность к определенному семейству геологических явлений и процессов. Всего было выделено пять групп:

1. Сейсмические явления и процессы;
2. Дифференцированные движения земной коры;
3. Структурная нарушенность;
4. Гидрогеологические и гидрологические явления и процессы;
5. Экзогенные геологические явления и процессы;

Вид генетически дифференцирует разновидности группы ОГЯП, а тип определяет конечный неделимый элемент большой системы групп горно-геологических явлений и процессов.

В классификации геологических условий ОГЯП (ГУ ОГЯП) (таблица 2.2) определены группы геологических условий, виды и типы: общегеологические и структурно-тектонические условия;

геоморфологические условия; инженерно-геологические, гидрогеологические, гидрологические, гидрометеорологические условия; геофизические поля; физические свойства минералов, горных пород, массивов пород и окружающих сред (геологической, гидрологической и прочее); техногенное воздействие.

Вид определяет разновидности геологических условий в рамках группы (например, структурная нарушенность геологической среды), а тип – конечную разновидность геологических условий (к примеру, трещиноватость горных пород, разломы и т.д.). ГУ ОГЯП могут быть формализованы разными наборами признаков (индикаторов). В отдельной колонке соответствующей минимально определенному виду геологических условий, записано признаковое описание, которыми можно измерить и определить таксономический вид. Признаковое описание можно дополнять, можно использовать признаки, которые удобно использовать в расчетах.

Анализ ОГЯП и их ГУ ОГЯП позволил сформулировать задачи исследований:

- определение и ранжирование по степени необходимости и возможности исследования, опасных горно-геологических явлений и процессов, нарушающих устойчивость СТБ;
- определение набора геологических условий, необходимых для изучения;
- определение набора данных для исследований в рассматриваемом районе размещения радиоактивных отходов;
- разработка прогнозов возникновения и активизации опасных ОГЯП и ГУ ОГЯП и оценка устойчивости СТБ на их основе;
- определение набора сценариев опасных, внештатных и аварийных ситуаций на исследуемой природно-технической системе.

2.3 ГИС-ориентированная база данных по Нижнеканскому массиву

Следующий этап исследований заключался в сборе, систематизации и формализации данных в соответствии с разработанной классификацией. Необходимо отметить, что не по всем характеристикам, которые представлены в классификации, удалось получить данные, ввиду их закрытости или физического отсутствия. Доступная информация была разделена на 3 категории:

- данные, полученные из открытых источников (карты, космические снимки, отчеты, статьи, публикации и т.д.);
- данные, которые были получены путем прямых измерений;
- данные - как результат системного анализа, геолого-геофизической интерпретации и математического моделирования.

В итоге все данные были интегрированы в единый ArcGIS-проект [Гвишиани и др., 2021; Лосев и др., 2020], содержащий модули системного анализа на языке Python, позволяющие проводить интерпретацию данных, строить математические модели и визуализировать результаты в виде тематических карт [Бондур и Зверев, 2005; Kagan et al., 2014; Soloviev et al., 2018]. ГИС-проект представляет собой приложение, рабочая оболочка которой реализована в среде ESRI ArcGIS for Desktop. Данные хранятся преимущественно в виде ESRI шейп-файлов, растровых изображений с геопривязкой, таблиц, карт, отчетов и т.д.

На рисунке 2.4 представлена блок-схема базы данных (БД). При создании БД использовались информационные ресурсы ГЦ РАН [Kagan et al., 2014]. БД включает в себя следующий набор цифровых тематических слоев [Гвишиани и др., 2021]:

1. Географическая основа района;
2. Спутниковые снимки района (ArcGIS World Imagery, 2018);

3. Цифровая модель рельефа по данным радарной интерферометрической съемки поверхности Земли - *Shuttle radar topographic mission* (<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>);
4. Карта линеаментов масштаба 1:200 000 [Лобацкая, 1998];
5. Схема неотектонических структур зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [Лобацкая, 1998];
6. Схемы тектонических разломов [Морозов и др., 2019];
7. Геологическая карта Нижнеканского массива, масштаб 1:200 000 [Колямкин и др., 2015];
8. Геологическая карта участка «Енисейский масштаба» 1:10 000 [Морозов и др., 2019];
9. Каталог эпицентров землетрясений в регионе (Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии, СКЗ/SECNE);
10. Кинематическая модель современных горизонтальных движений и скоростей деформаций земной коры по данным ГНСС-мониторинга [Татаринов и др., 2014б];
11. Карты полей напряжений Нижнеканского массива, построенные по результатам моделирования методом конечных элементов [Андерсон и др., 2011];
12. Карта аномального магнитного поля [Колямкин и др., 2015].
13. Карта гравитационного поля [Колямкин и др., 2015].

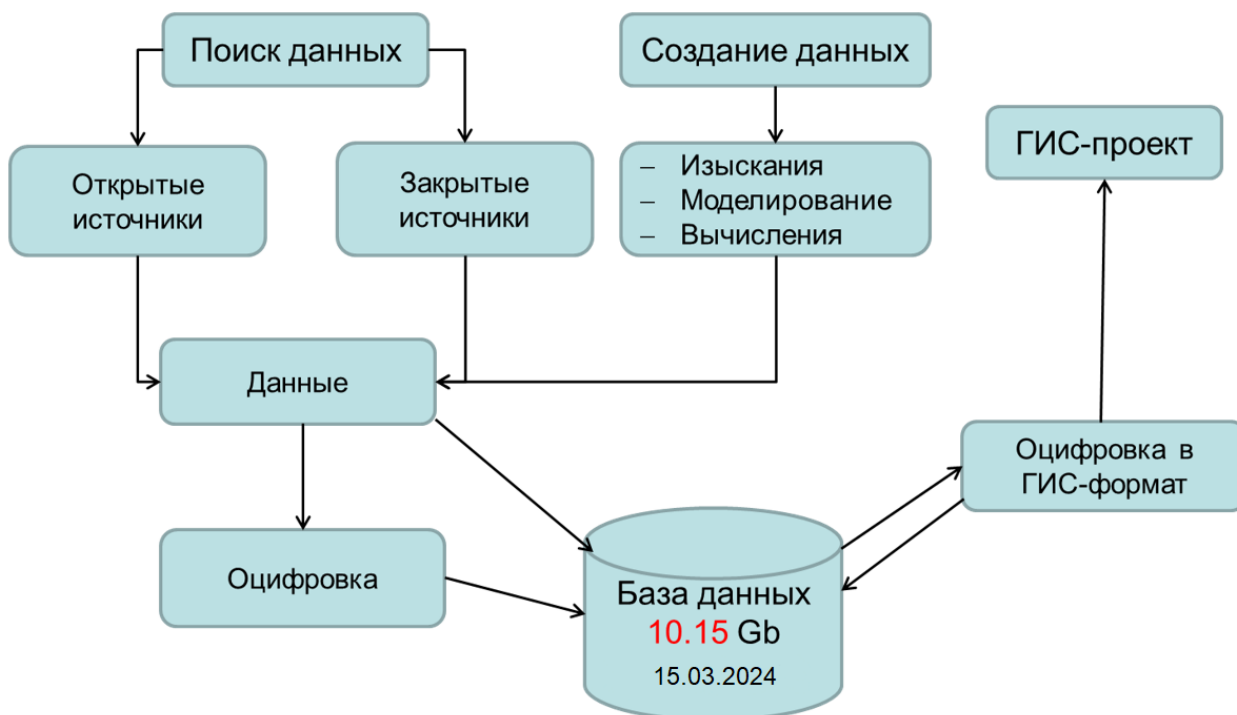


Рисунок 2.4 – Блок-схема базы данных [Лосев и др., 2020, 2024]

Географическая основа региона включает стандартную физическую и топографическую базовые карты, границы стран, субъектов, населенные пункты и дорожную сеть. В БД включены космические снимки региона, полученные из открытой коллекции *ArcGIS World Imagery, 2018*. БД также содержит спутниковые снимки открытого доступа Google Earth и снимки НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» с космических аппаратов «Ресурс-П» и «Канопус-В». На рисунке 2.5 приведен пример спутникового снимка района г. Железногорск с наложенной схемой активных тектонических разломов по Р.М. Лобацкой [Лобацкая, 1998].

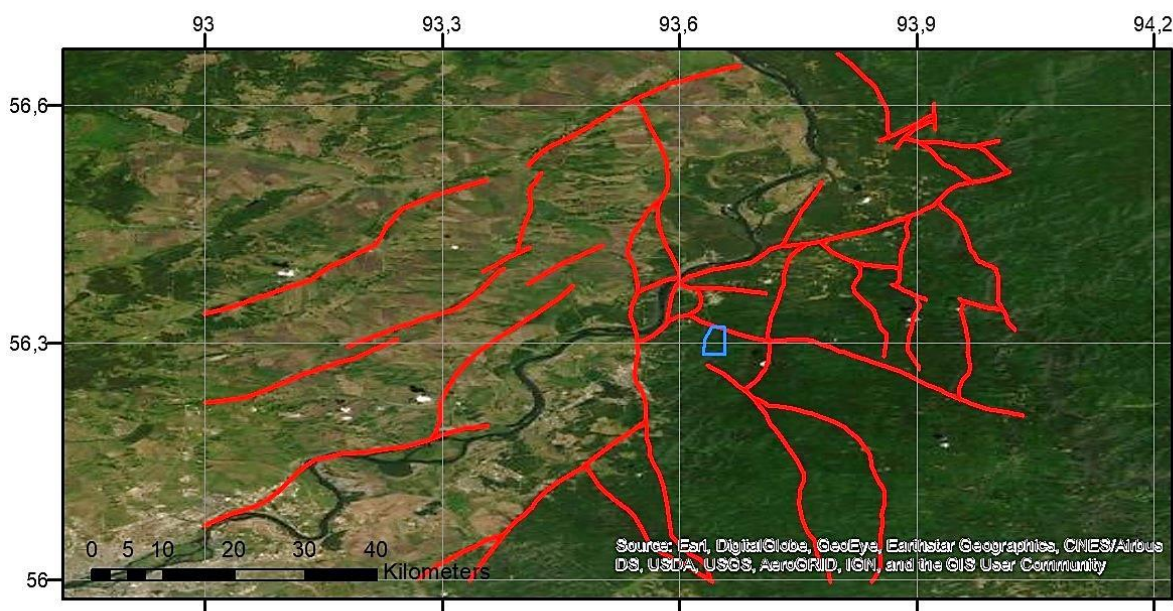


Рисунок 2.5 - Пример слоя БД: спутниковый снимок *ArcGIS World Imagery* района и наложенная на него схема активных тектонических разломов. Красные линии – разломы; синий прямоугольник - расположение площадки ПИЛ

Под цифровой моделью рельефа (ЦМР) понимается цифровое представление рельефа в виде трехмерных массивов данных, образующих множество высотных отметок в узлах регулярной и нерегулярной сетки и их координат. Различные ЦМР являются производными материалов ДЗЗ и, в связи с различными средствами их получения и методами обработки, могут сильно отличаться друг от друга. На сегодняшний день наиболее востребованы модели рельефа, полученные в рамках проектов SRTM и ASTER. Цифровая модель рельефа, построенная по данным SRTM-4, представлена файлами в системе координат WGS-84/EGM96, географически соответствующими одной эллипсоидальной трапеции размером 1x1 градуса и структурно представляет собой матрицу с шагом сетки 3x3 угловых секунды дуги для SRTM DEM и 1x1 угловых секунды, разрешением 90 и 25 м

[<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>].

На рисунке 2.6 показан фрагмент ЦМР района. На ней четко видны его основные геоморфологические особенности: крупные линейные структуры – Атамановский отрог Енисейского кряжа и долина р. Кан, ориентированные под азимутом близким к 150° - 160° . Остальные структуры более мелкого порядка имеют подчиненное значение и также ориентированы в субмеридиональном направлении. Выделяются также ряд мелких элементов, в т.ч. опереющих указанные структуры.

Выделяемые на снимках тектонические блоки, рассматриваются как консолидированные элементы верхней части земной коры, а их границы, в особенности, узлы пересечения границ блоков различных рангов – как места повышенной геодинамической опасности. В районах без маскирующего рыхлого осадочного чехла, практическое выявление разломов, в т. ч. активных, не вызывает затруднений [Косыгин и Соловьев, 1983]. Сложнее там, где прямые доказательства наличия разлома отсутствуют. Поэтому используют косвенные признаки: линейные аномалии рельефа, коленообразные изгибы речных долин и др. Эти аномалии, выделяемые на космоснимках, называют также линеаменами. В БД представлена карта линеаментов региона масштаба 1:200 000 из [Лобацкая, 1998]. Считается, что линеаменты связаны с глубинными разломами в земной коре, а эпицентры землетрясений приурочены к участкам их сочленений [Бондур и Зверев, 2005; Бусыгин и Никулин, 2016].

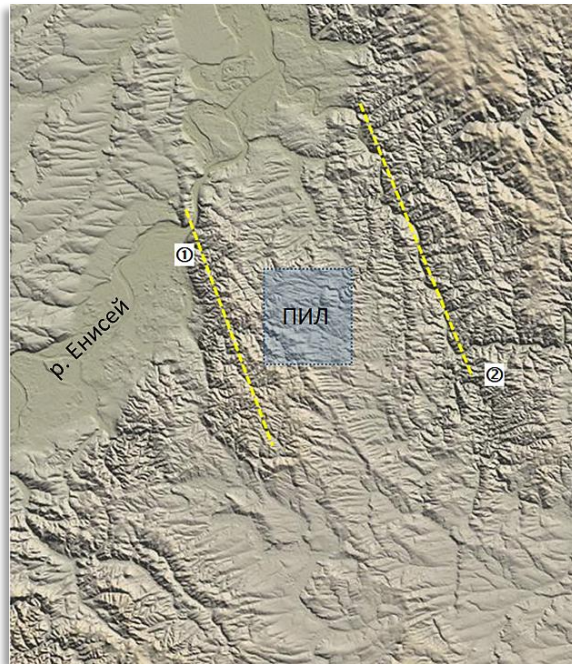


Рисунок 2.6 - Цифровая модель рельефа по данным SRTM-4. Серый квадрат участок строительства ПИЛ. Желтым пунктиром показаны главные геоморфологические линейные формы: 1. Атамановский отрог Енисейского кряжа; 2. Долина р. Кан

В следующем элементе БД (слой 5) содержится схема неотектонических структур зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты из [Лобацкая, 1998]. Тектоническое строение района отражает геолого-структурная схема юго-западного обрамления Сибирской платформы (рисунки 2.7-2.9).

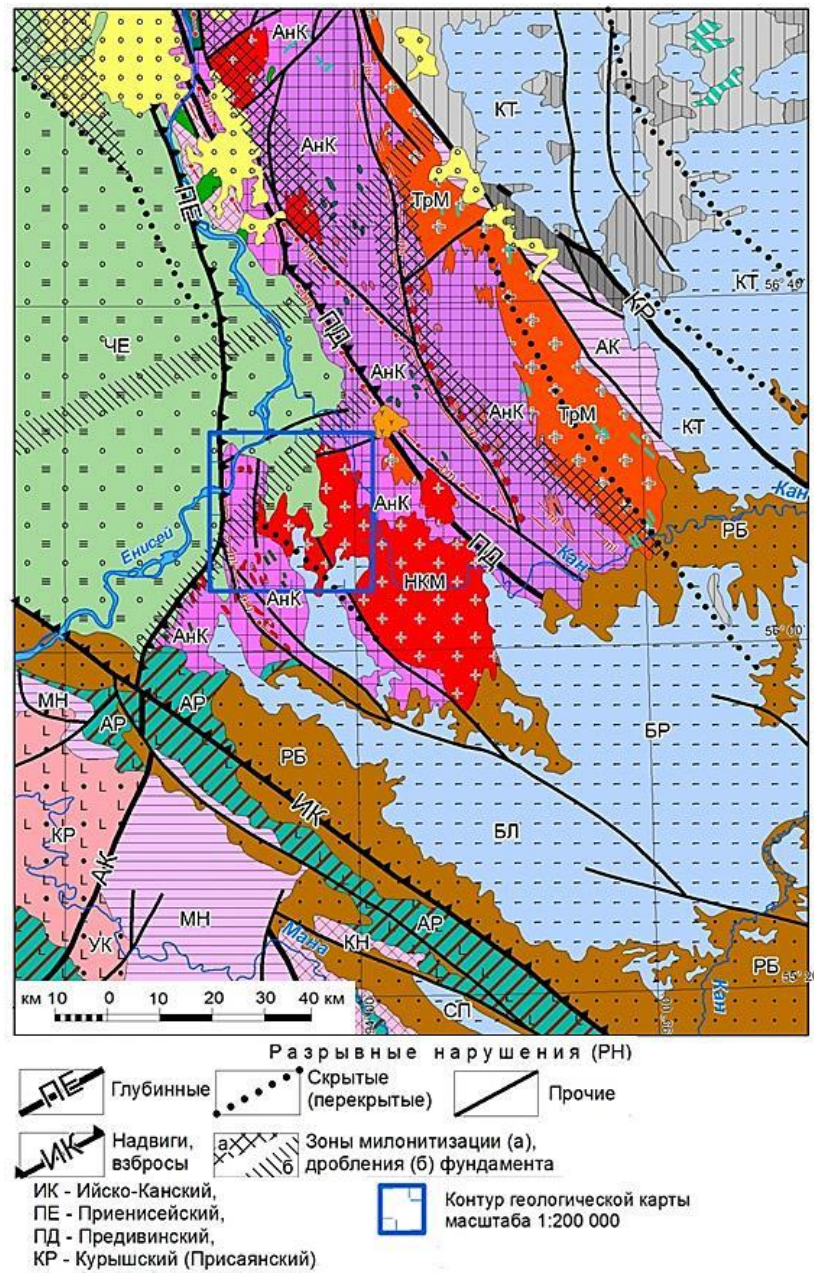


Рисунок 2.7 - Тектоническая схема района, 1:1 000 000 [Лобацкая, 1998]

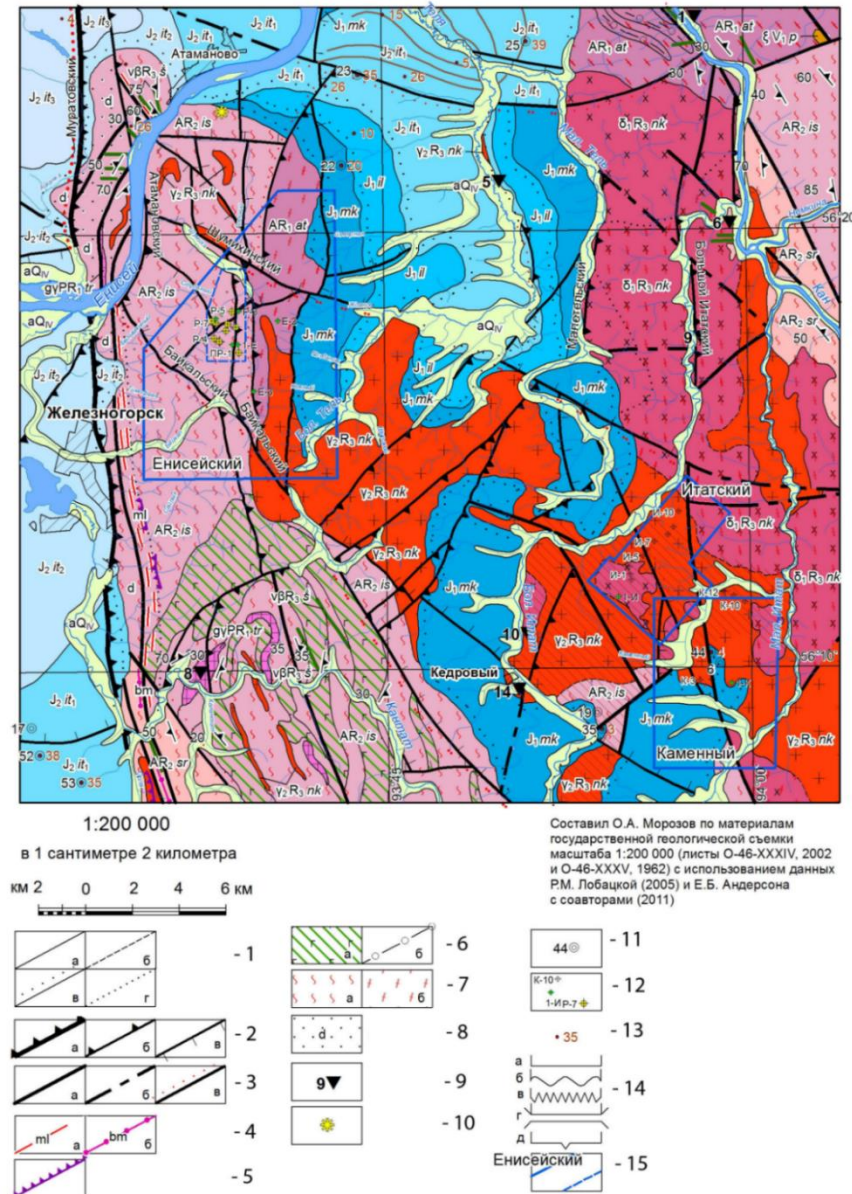


Рисунок 2.8 - Геологическая карта района, О.А. Морозов, 2011 [Морозов и др., 2019]: 1 – границы: установленные (а), предполагаемые (б), несогласного залегания (в), фациальные (г); 2 – взбросы: главные (а), второстепенные (б); сбросы (в); 3 – разрывные нарушения: неустановленные (а), предполагаемые (б), активизированные (в); 4 – милониты (а), бластомилониты (в); 5 - уступы рельефа; 6 – амфиболиты (а), сланцы (б); 7 – мигматиты (а), гранитоиды (б); 8 – диафториты; 9 – обнажения; 10 – мерзлота; 11,12 – скважины; 13 – четвертичный слой; 14 – взаимоотношение слоев: согласное (а), несогласное (б); 15 – Енисейский

(б), угловое несогласие (в), тектоническое (г), интрузивное (д); 15 – участок захоронения РАО

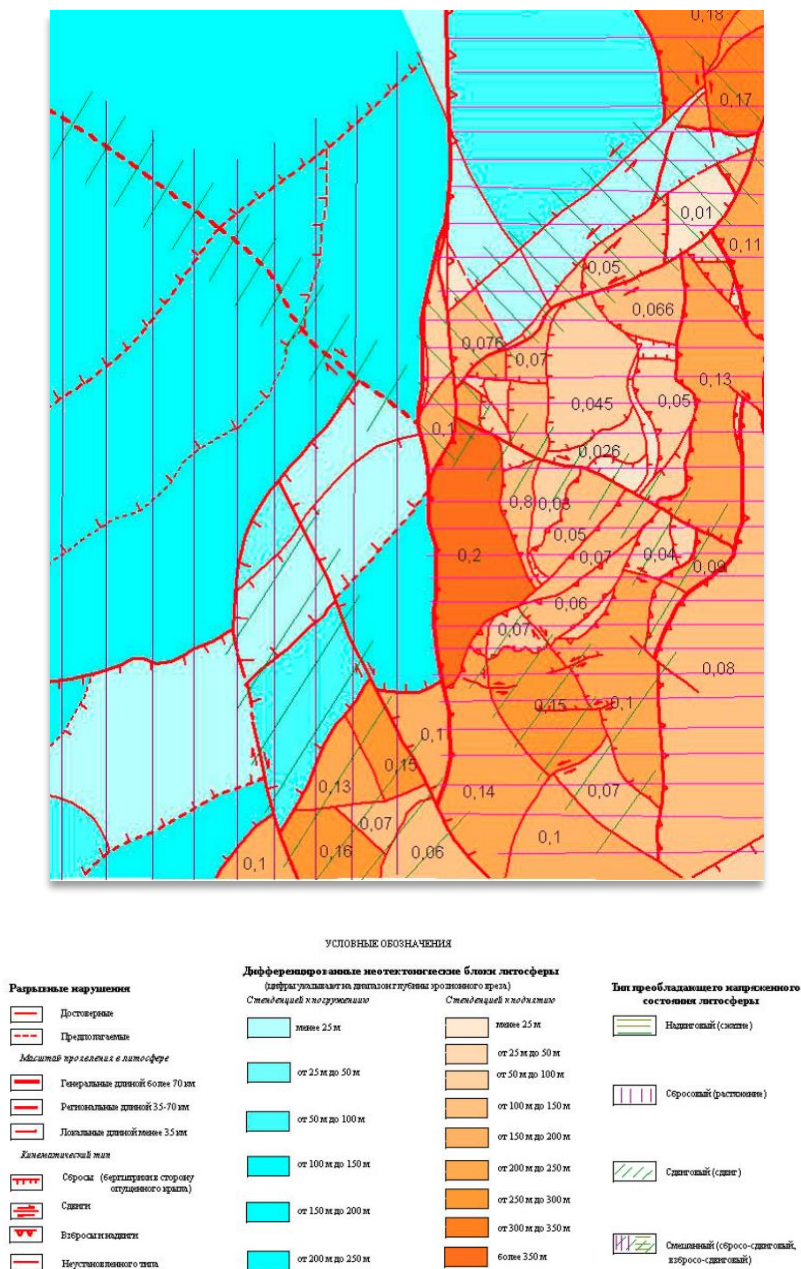


Рисунок 2.9 - Неотектоническая схема района по Р.М. Лобацкой [Лобацкая, 0.01–0.21– скорости вертикальных движений за плейстоцен, мм/год, вертикальная штриховка - области преобладания близгоризонтального растяжения, горизонтальная - близгоризонтального сжатия, косая штриховка - областям левосдвиговых и правосдвиговых тангенциальных напряжений

Слои 4, 5, 6 – характеризуют тектонические нарушения земной коры и линейно вытянутые геодинамические зоны. Слои 4 и 5 содержат информацию, на основе которой выделяются границы сочленения структурных тектонических блоков земной коры, в том числе подтвержденные инструментальными данными. Эти границы выделяются также по геоморфологическим особенностям ЦМР (линейность, изрезанность, изменчивость и др.), которые отличаются от «фонового» рельефа, и традиционными методами морфоструктурного анализа.

Наиболее крупными разрывными нарушениями являются глубинные Приенисейский (ПЕ), Предивинский (ПД) и региональный Присяянский (КР) разломы. Они закладывались в разное время, многократно подновлялись и участвовали в неотектонических процессах. В районе ПГЗРО также развиты разрывные нарушения субмеридионального, северо-западного и субширотного, запад-северо-западного простирания. Самый близкий к площадке - Приенисейский разлом. Он прослеживается на расстояние более 600 км. Согласно исследованиям, размер зоны динамического влияния Приенисейского разлома может быть оценен до 6 км. Тогда площадка ПИЛ попадает на границу зоны динамического влияния ПЕ. В соответствии с руководством по безопасности [РБ-019-18] этот разлом можно отнести к – XV порядку (ранг 4).

Тематические слои 7, 8, представлены геологической картой Нижнеканского массива в масштабе 1:200 000 и геологической картой участка Енисейский масштаба 1:10 000. На рисунке 2.8 приведена геологическая карта района, разработанная в ИБРАЭ О.А. Морозовым [Морозов и др., 2019].

Слой 9 включает в себя распределение сейсмических событий из специализированного каталога землетрясений Северной Евразии (СКЗ/SECNE). В БД также представлены оцифрованные карты общего

сейсмического районирования для региона ОСР-2016 и карта мест возможного возникновения сильных землетрясений для Алтай-Саяны-Прибайкалья [Дзедобоев и др., 2019]. На рисунке 2.10 продемонстрирован пример запроса распределения эпицентров землетрясений из каталога БД.

Слои 10, 11 являются результатами моделирования и геодинамической интерпретации данных и содержат: модель современных горизонтальных движений и деформаций земной коры по данным ГНСС-мониторинга, карту полей напряжений, построенной по результатам моделирования методом конечных элементов [Андерсон и др., 2011; Татаринов и др., 2014б].

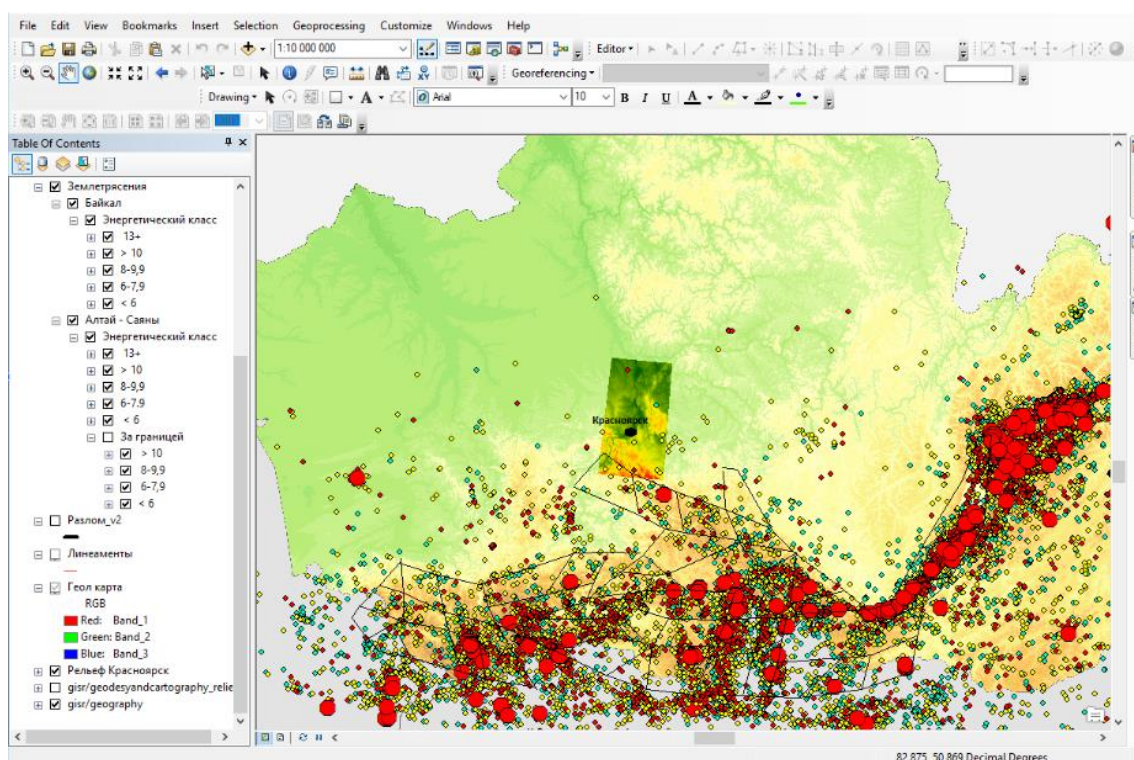


Рисунок 2.10 - Вариант запроса эпицентров землетрясений из специализированного каталога землетрясений Северной Евразии, СКЗ/SECNE

Следующие два слоя карты отражают геофизические поля в пределах ближнего района – это карта аномального магнитного поля (рисунок 2.11) и карта гравитационных аномалий (рисунок 2.12).

Аномальное магнитное поле, обусловлено намагниченностью горных пород. Как правило, региональные аномалии вызваны крупными намагниченными телами, тогда как имеющие меньшие размеры локальные аномалии создаются относительно небольшими объемами пород. Они вычисляются как разность между измеренным значением, приведенным к середине года съемки и к выбранной эпохе нормального магнитного поля Земли, и этим нормальным полем. Аномалии связаны как с положительными формами рельефа (горы), так и различием плотности пород.

Из рисунка 2.11 видно, что отрицательные магнитные аномалии (красный цвет) в центральной части района имеют северо-запад – юго-восточное простирание. При этом их направление существенно отличается от простирания основных разломов, за исключением Кедрового и Шумихинского. Распределение гравитационных аномалий имеет изометричный характер. В тоже время, если рассматривать как ориентацию максимальных градиентов поля (сгущение изолиний), то видна их взаимосвязь с зоной контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты по Муратовскому разлому.

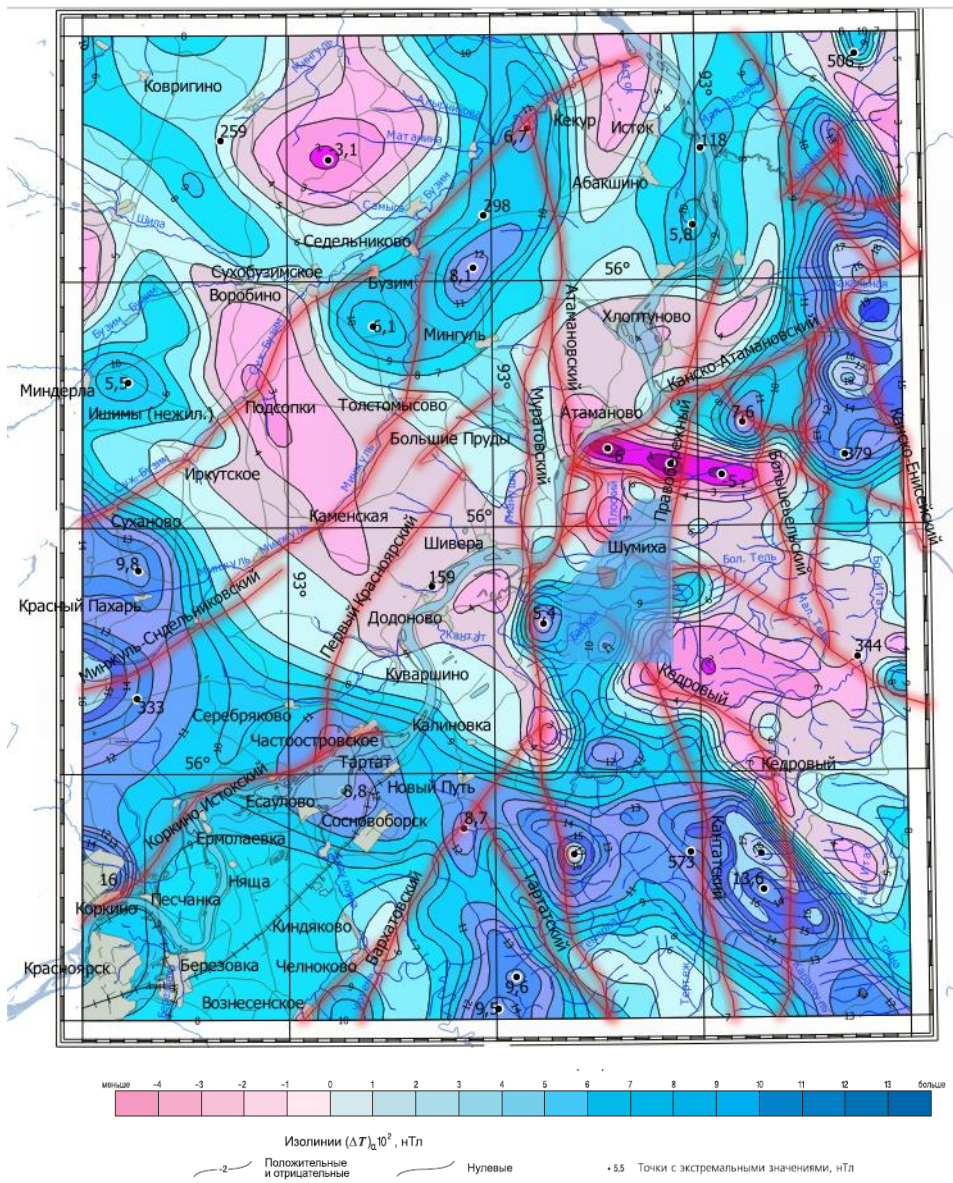


Рисунок 2.11 - Карта аномального магнитного поля, масштаб 1:500 000, ВСЕГЕИ [Колямкин и др., 2015], коричневые линии - активные разломы

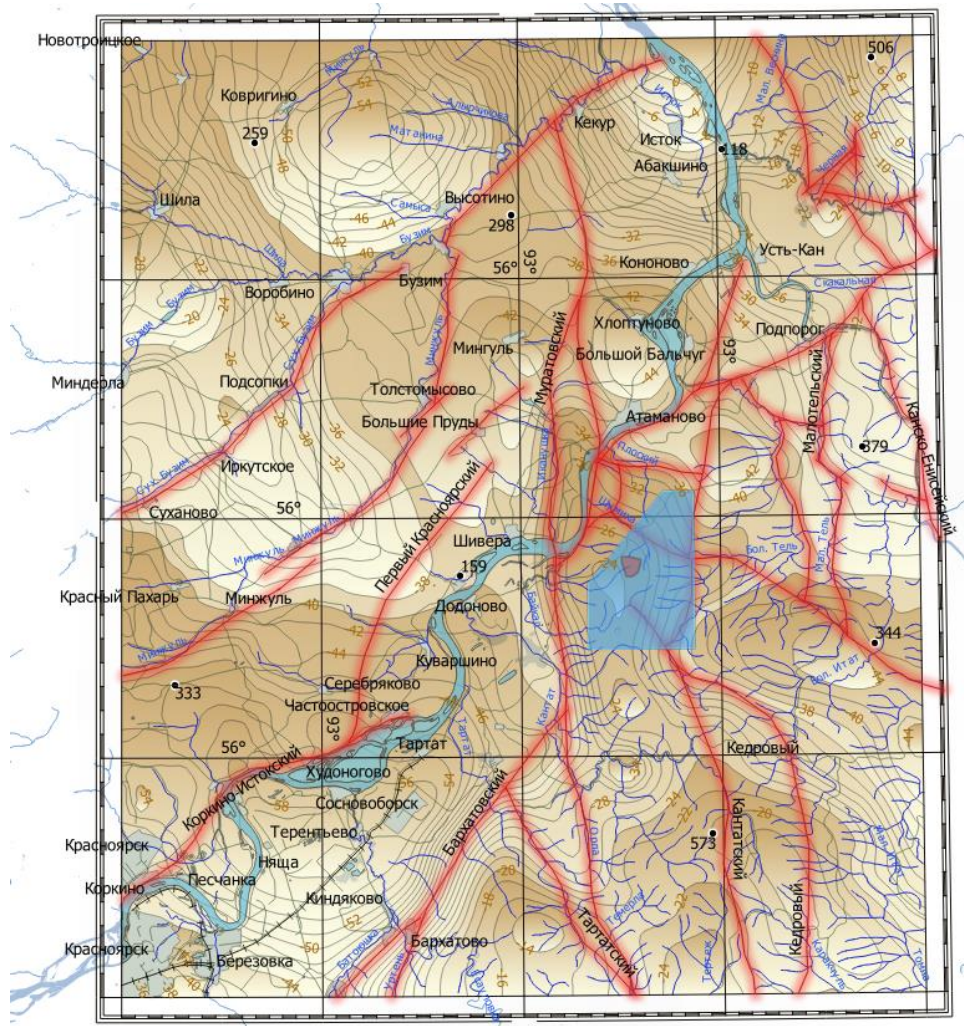


Рисунок 2.12 – Карта гравитационных аномалий, масштаб 1:500 000 [Колямкин и др., 2015]

На рисунке 2.13 представлена геоморфологическая карта ближнего района строительства пункта глубинного захоронения РАО [Колямкин и др., 2015]. На нем видно, что большинство тектонических разломов подчинено единому субмеридиональному направлению. Последний слой Базы данных отображает карту рассчитанной интегральной меры геодинамической безопасности района и участка строительства ПИЛ, полученной в результате системного анализа всех предыдущих слоев [Гвишиани и др., 2021a]. Она приведена в главе 4.

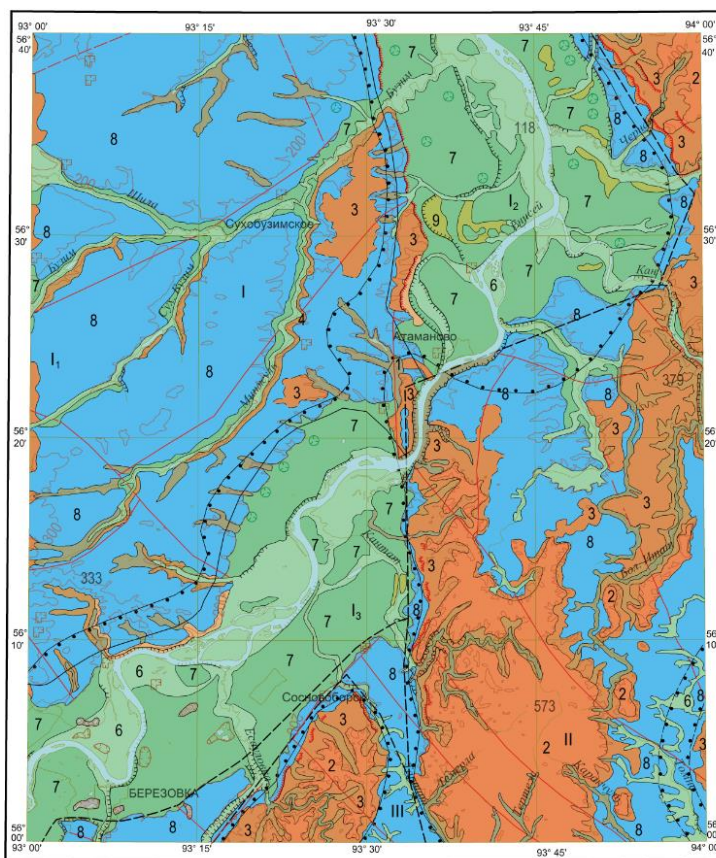


Рисунок 2.13 – Геоморфологическая карта ближнего района ПГЗРО, масштаб 1:200 000

2.5 Выводы

1. Анализ существующих методов и подходов анализа пространственных геолого-геофизических данных показал, что при оценке устойчивости геологической среды на длительные периоды времени необходимо опираться на методы системного анализа данных (машинного обучения, дискретного математического анализа, искусственного интеллекта и др.), которые позволяют эффективно выявлять геолого-геофизические признаки геодинамической неустойчивости в условиях недостаточности и зашумленности информации.

2. Признаки, как результат измерения или моделирования характеристик структурного тектонического блока содержат сложные математические конструкции, которые являются трудными для физической интерпретации. В этом случае признаковая модель исследуемого объекта должна быть адекватно проанализирована с использованием алгоритмов системного анализа. Для этого была разработана инженерно-геологическая классификация, включающая в себя опасные геологические явления и процессы, влияющие на устойчивость структурного тектонического блока, вмещающего РАО, и геологические условия возникновения и активизации опасных геологических явлений и процессов.

На основе методов и алгоритмов ДМА и нечеткой логики должна быть разработана методика и алгоритмы формализованного анализа разноформатных данных, учитывающая взаимосвязь геодинамики и геоморфологических особенностей пространственного распределения комплекса геолого-геофизических характеристик (включая цифровую модель рельефа, напряженно-деформированное состояние, геофизические поля и др.).

3. Для практической реализации методики была создана ГИС-ориентированная база данных по Нижнеканскому массиву содержащая первичные данные различной тематики (геология, геофизика, ДЗЗ, сейсмология, ГНСС, геоморфология и др.) и данные, полученные в результате анализа исходной информации, математических моделей и их геодинамической интерпретации. Программные модули дают возможность проводить многовариантный анализ геоинформационных слоев, созданных как на основе оригинальных алгоритмов ДМА, так и на базе классических подходов. Исходные данные рассматриваются как многомерные пространственно-временные ряды. Степень активности системы отражается в особенностях (морфологии) их распределения, включая рельеф земной

поверхности, схему тектонических нарушений разломов и напряженно-деформированное состояние и т. д.

Для этого может быть реализована возможность построения математических моделей и представления результатов исследований в виде тематических карт районирования, отражающих результаты оценки опасности дестабилизации геологической среды отдельных признаков, а также проводить ранжирование структурных тектонических блоков, классифицированных по принципу опасности.

По результатам исследования сформулировано **первое научное положение.**

Разработанная классификация геолого-геофизических данных и их системный анализ, характеризующих опасные процессы и явления, позволяют выполнить в условиях априорной недостаточности информации оценку устойчивости геологической среды..

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ДИСКРЕТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Разработанная методика геодинамического районирования включает в себя основные принципы геодинамического районирования, созданного И.М. Петуховым, И.М. Батугиной с соавт. [*Батугина, 1988; Петухов и др., 1989; Петухов и Батугина, 1990, 1999*], и алгоритмы анализа пространственных данных методами ДМА. Методика построена на «классическом» подходе, заключающемся в выявлении блочного строения геологической среды, последующей оценке напряжений методами математического моделирования и построения интегральной меры безопасности. Отличие заключается в том, что для формализованной оценки устойчивости используются алгоритмы системного анализа геопространственных данных. Их применение позволяет по неявным признакам выявить потенциально неустойчивые зоны, которые в длительной перспективе могут привести к разрушению или ослаблению приконтурной части выработок ПГЗРО с последующей инфильтрации радионуклидов с подземными водами в окружающую среду.

3.1 Выявление блочных структур и геодинамических зон в районе исследования

Согласно общепринятой методологии геодинамического районирования первый шаг - выявление активных структур в границах площадки ПИЛ и на прилегающих территориях (см. рисунок 1.3).

К признакам проявления геодинамической активности относятся [*Руководство по геодинамическому ..., 2012*]:

- контрастность высот рельефа;
- резкие различия ландшафтных характеристик;

- ориентация гидрографической сети;
- линейные формы морфоструктур;
- ступенчатый профиль речных долин;
- неустойчивый гидрографический режим рек;
- активное развитие оползневых процессов;
- высокие значения современных движений.

Таблица 3.1 – Порядок, ранг и протяженность структур при изучении геодинамических и сейсмотектонических условий территории расположения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) по [Королев и Николаева, 1994] и [Алексеев и др., 2003]

| Масштаб структуры | по [Королев и Николаева, 1994] | | | | по [Алексеев и др., 2003] | |
|--------------------|--------------------------------|----------|----------------|----------------------|---------------------------|--------------|
| | Порядок | Ранг | Длина, км | Масштаб и виды работ | Ранг | Масштаб |
| Планетарная | XVIII | 1 | 10 000-20 000 | 1:50 000 000, ОСР | I-1 | 1:40 000 000 |
| | XVII | 2 | 3000-6000 | 1: 50 000 000, ОСР | II-2 | 1:20 000 000 |
| Региональная | XVI | 3 | 1000-2000 | 1:5 000 000, ОСР | III-3 | 1:12 000 000 |
| Местная | XV | 4 | 300-600 | 1:500 000, ДСР | I-2 | 1:2 500 000 |
| | XIV | 5 | 100-200 | 1:500 000, ДСР | I-2 | 1:1 000 000 |
| | XIII | 6 | 30-60 | 1:50 000, ДСР, УСТУ | II-2 | 1: 200 000 |
| Местная, локальная | XII | 7 | 10-20 | 1:50 000, УСТУ | III-3 | 1:50 000 |
| Локальная | XI | 8 | 3-6 | 1:50 000, УСТУ | IV-3 | 1:25 000 |
| | X | 9 | 1-2 | 1:50 000, УСТУ | V-3 | 1:10 000 |

* - цветом выделены масштабы структур в пределах ближнего района, дальней и ближней зон ПГЗРО

Земная кора представляет собой дискретно-иерархическую блочную среду, в которой энергетическое состояние низших по рангу блоков формируется структурами более высокого ранга. Изучением иерархической дискретности геологической среды занимались М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко и др. [Садовский, 1989; Садовский и Писаренко, 1991]. Установлено, что расстояние между границами блоков подчиняется закону:

$$L_i + \frac{1}{L} = k_n, \quad (3.1)$$

где k_n - коэффициент подобия перехода от одного масштаба блоков к другому, $k_n \approx 3.162$, отражающий дискретность структур; L_i - максимальная ширина блока; L_{i+1} - максимальная ширина блока следующего порядка.

Таким образом, энергетическое состояние блоков (а, следовательно, и их устойчивость) находится в прямой зависимости от их размеров. Как полагал М. А. Садовский [Садовский, 1989; Садовский и Писаренко, 1991], структурный блок можно рассматривать как часть более широких природных систем, которые существуют в циклическом режиме напряженно-деформированного состояния. И, чем больше срок их жизни, тем большую структурную нарушенность они приобретают.

В тоже время, рядом авторов подчеркивается, что максимальная концентрация напряжений чаще приурочена к структурам среднего или мелкого масштабного ранга. Это связано с тем, что по времени образования они моложе. Считается также, что места сопряжения структур представляют наиболее неустойчивые зоны, в которых вероятность развития сейсмических и негативных геомеханических процессов выше [Казикаев и др., 2016].

Существующие классификации делят тектонические разломы по:

- времени формирования: современные, активные в течение последних 100 лет; исторические, активные в период от 100 лет до 6 тыс. лет; молодые,

сформировавшиеся в период 6–12 тыс. лет; четвертичные, возраст которых может достигать 1,8 млн. лет; новейшие, сформировавшиеся за последние 40 млн. лет;

- порядку и рангу структур (таблица 3.1);
- по характеру деформаций: сбросы и взбросы (включая надвиги), сдвиги, взбросо-сдвиги, сбросо-сдвиги, сдвиго-сбросы, сдвиго-взбросы, взрезы;
- по скорости – медленные (тектонический крип) и быстрые (сейсмогенные);
- по типу деформаций: складчатые (пликативные) и разрывные (дизъюнктивные).

Выделение границ блоков осуществляется по следующим признакам [*Руководство по геодинамическому районированию ...*, 2012]:

- а) более высоким скоростям движений;
- б) более высокой концентрации напряжений;
- в) структурным изменениям;
- г) линейным высокоградиентным зонам в рельефе, геофизических и геохимических полях;
- д) цепочкам микроземлетрясений и др.

Для выделения геодинамических зон и активных разломов используется достаточно большое количество методов [*Гвишани и др.*, 2019а; *Ильин*, 2008; *Казикаев и др.*, 2016; *Макаров и Щукин*, 1979; *Морозов и др.*, 2021; *Николаев*, 2005; *Николаев*, 1988; *Руководство по геодинамическому районированию ...*, 2012; *Сим*, 1991]:

- дешифрирование космических снимков;
- структурно-тектоническое, структурно-геоморфологическое изучение и дешифрирование карт ДЗЗ;

- анализ ЦМР;
- тектонофизические исследования;
- геолого-геофизические, геодинамические и сейсмологические наблюдения;
- повторное нивелирование, интерферометрия, ГНСС-измерения;
- обследовании зон разломов с помощью траншей;
- геофизические и геохимические методы;

При выявлении активных структур широко используются математические методы обработки ЦМР и других геолого-геофизических данных: ДМА, кластерный анализ, искусственного интеллекта и пр. Подвижность тектонических структур, выявленных по указанным признакам, должна быть подтверждена количественной оценкой по результатам натурных наблюдений (геодезические наблюдения, включая ГНСС и повторное нивелирование, сейсмологический мониторинг, разведка (опробование) канавами, геологические маршруты и др.).

Таким образом, существует достаточно много методов и методик выявления блочной структуры. Однако, их общим недостатком являются три аспекта. Первый связан с отсутствием необходимых исходных геолого-геофизических данных и большими затратами времени на их получение. Второй, определяется характером геодинамической эволюции среды. В платформенных районах она протекает очень медленно с циклическим развитием движений. Это приводит к тому, что регистрируемые параметры практически находятся на пределе чувствительности метода. И третий, определяется необходимостью экстраполяции геодинамического режима на период времени более 10 тыс. лет. С этим связаны особые требования к набору признаков, их качеству и методам обработки геолого-геофизических данных [Гвишиани и др., 2018, 2019а; Гвишиани и Татаринов, 2019].

3.2 Нормализация разнокачественных и разноформатных данных

Для некоторых методов, в особенности для методов искусственного интеллекта и при анализе функций изменчивости состояния геологической среды, необходимо предварительно специфическим образом обрабатывать входящую информацию. Для этого используется метод нормализации данных [Квейд, 1969; Потылицына и др., 2013; Singh, 2020].

Нормализация – это процесс приведения разных масштабов и единиц измерения к единому виду. Это делается для упрощения сравнения и анализа данных, иногда — в рамках заданного диапазона, например, $[0 \dots 1]$ или $[-1 \dots 1]$, иногда с заданным свойством, например, стандартным отклонением равным 1. Цель нормализации — приведение различных геоданных в самых разных единицах измерения и диапазонах значений к единому виду, который позволит сравнивать их между собой или использовать для оценки признаков и их комбинаций. На практике это необходимо, например, для кластеризации и в алгоритмах машинного обучения [Боровиков, 1998; Хайкин, 2006].

Поиск аномальных значений неустойчивости по комплексу полей геолого-геофизических данных основан на ранжировании узлов конечной двумерной сетки для выбора наихудших узлов. В статье [Гвишиани и др., 2019б] представлены алгоритмы учета различных экспертных точек зрения на заданные функции, их свойства и динамику, а также на то, какие именно узлы мы объявляем «наилучшими». В работе используется язык нечетких множеств и нечеткой логики, обладающий большими возможностями по сравнению с классическими множествами и булевой логикой для передачи различных экспертных представлений свойствах и процессах в геологической среде. Воспользуемся данным алгоритмом для решения наших задач районирования.

Пусть в районе расположения ПИЛ имеется несколько структурных тектонических блоков. Требуется установить, какой из них наиболее пригоден для захоронения РАО. Число информативных инженерно-геологических параметров F_i равно N . Для каждого блока имеется m – мерное пространство значений инженерно-геологических параметров $\vec{F}_i = [f(x_1), \dots, f(x_m)]$. Получение агрегированной функции \vec{F}_i в виде полинома с натуральными значениями инженерно-геологических параметров $f(x_m)$, может быть осложнено с точки зрения вычислений из-за того что абсолютные оценки количественных и качественных характеристик исследуемого района существенно различаются. К примеру, координаты точек ГНСС-пунктов наблюдений за СДЗК могут быть представлены в геоцентрической, при этом анализируются физико-механические свойства горных пород, коэффициенты фильтрации и др. Существенные отличия в натуральных значениях входящей информации приводят к неопределенности в ее совместном анализе (в виде обобщающей функции \vec{F}_i). Поэтому целесообразно преобразовывать натуральные значения в безразмерные значения инженерно-геологических параметров $f(x_m)$, которые будут определяться единой шкалой значений.

Первоначально процедура нормализации данных берет свое начало из математической статистики [Уилкс, 1967], постепенно получая распространение в анализе контроля качества [Ноулер и др., 1989], анализе экологических систем [Шитиков и Мاستицкий, 2017], анализе пространственной изменчивости свойств горных работ [Ческидов, 2012] и др. Преобразование значений геологических факторов определяется соотношением:

$$\bar{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\lambda_j}, \quad (3.2)$$

где \bar{x}_j – преобразованное (нормализованное) значение; x_j – натуральное значение фактора; x_{j0} – центр варьирования для числового ряда n -го фактора; λ_j – интервал варьирования для числового ряда n -го фактора; j – количество значений в числовом ряду фактора n .

Каждый фактор изменяется на: уровне, соответствующему большему значению $x_{jВ}$ – верхний уровень; уровне, соответствующему меньшему значению $x_{jН}$ – нижний уровень. Посередине между ними размещен, основной (базовый) уровень – центр варьирования x_{j0} . А половина расстояния между верхним и нижним уровнем варьирования называется интервал варьирования λ_j (рисунок 3.1) [Боровиков, 1998].

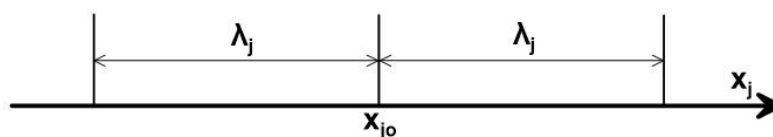


Рисунок 3.1 - Уровни варьирования фактора

В качестве интервалов и центров варьирования числовых рядов информации принимаются различные оценочные значения их выборок, таблица 3.2.

При нормализации значений геологической информации, можно использовать целый ряд комбинаций оценочных параметров выборок. Однако возникает вопрос – какую именно комбинацию необходимо выбрать. Для выбора комбинации оценочных параметров выборки был разработан алгоритм [Маневич и др., 2018], его блок-схема представлена на рисунке 3.2.

Таблица 3.2 - Формулы расчета оценочных значений выборок геологических параметров

| № | Формула оценочного значения выборки | Описание |
|---|--|--|
| 1 | x_{max} | Максимальное натуральное значение из выборки |
| 2 | x_{min} | Минимальное натуральное значение из выборки |
| 3 | $ x_{max} - x_{min} $ | Модуль разницы максимального и минимального значения |
| 4 | $x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$ <p>где n – количество значений в выборке x_j – натуральное значение выборки</p> | Среднее арифметическое значение выборки |
| 5 | $x_{j0} = x_{geom} = \sqrt[n]{(x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_j)}$ | Среднее геометрическое значение выборки |
| 6 | Отметка в выборке данных, такое, что половина исходных данных меньше этой отметки, а половина – больше. | Медиана выборки |
| 7 | $\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_j - x_{cp})^2}$ <p>x_{cp} – среднее арифметическое значение</p> | Среднеквадратичное отклонение выборки от среднего арифметического |
| 8 | $\lambda_i = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2}$ | Среднеквадратичное значение выборки |
| 9 | 0 | Нулевое значение (может быть только центром варьирования, т.к. ноль не может быть в знаменателе) |



Рисунок 3.2 - Схема алгоритма поиска оптимальной формулы нормализации данных

Выбор оптимальной комбинации оценочных значений для процедуры нормализации основан на поиске минимальной суммы Евклидова расстояния значений обобщающей функции $F(f_1, \dots, f_j)$ от ее среднего значения F_{cp} :

$$S(F) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (F_j - F_{cp})^2} \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

Формируется массив числовых рядов значений геологических факторов $f_1(x_{11}, \dots, x_{j1}), \dots, f_g(x_{1g}, \dots, x_{ig});$

По заданным выборкам рассчитываются (рисунок 3.2) все оценочные значения, приведенные в таблице 3.2.

1. Нормирование заданного массива данных всеми возможными комбинациями оценочных значений из таблицы 3.2 по (3.2) (для таблицы выходит 72 комбинации);

2. Расчет числовых рядов обобщенных функций $F_1 - F_{72}$ в аддитивной форме, по формуле (3.4) (пример приведен в таблице 3.3):

$$F_{nj} = \sqrt{(\hat{x}_{j1})^2 + \dots + (\hat{x}_{jg})^2}, \quad (3.4)$$

где \hat{x}_{jg} – преобразованное натуральное значение x_j геологического фактора f_g ; j – порядковый номер значения в выборке; g – порядковый номер геологического фактора; n – порядковый номер комбинации (расчетной формулы), $n = 72$.

Таблица 3.3 - Пример вычислений по алгоритму поиска оптимальной формулы нормализации данных

| № | Натуральные значения | | | Нормированные значения | | | Обобщенная функция | СКО обобщенной функции |
|-----|----------------------|-----|----------|------------------------|-----|----------------|--|--------------------------------|
| | f_1 | ... | f_g | \hat{f}_1 | ... | \hat{f}_g | F_{jn} | S_{jn} |
| l | x_{l1} | ... | x_{lg} | \bar{x}_{l1} | ... | \bar{x}_{lg} | $\sqrt{(\hat{x}_{l1})^2 + \dots + (\hat{x}_{lg})^2}$ | $\sqrt{(F_{ln} - F_{cp.n})^2}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| j | x_{j1} | ... | x_{jg} | \bar{x}_{j1} | ... | \bar{x}_{jg} | $\sqrt{(\hat{x}_{j1})^2 + \dots + (\hat{x}_{jg})^2}$ | $\sqrt{(F_{jn} - F_{cp.n})^2}$ |
| | | | | | | | | $\sum_{i=1}^n (S_{jn})$ |

3. Вычисление суммы Евклидова расстояния значений обобщенной функции F_{jn} от ее среднего значения $F_{cp.n}$, по (3.5):

$$S_n = \sum_{i=1}^n (S_{jn}) = \sum (S_{11} + \dots + S_{jn}) = \sum \left(\sqrt{(F_{1n} - F_{cp.n})^2} + \dots + \sqrt{(F_{jn} - F_{cp.n})^2} \right), (3.5)$$

где $F_{cp.n}$ – среднее значение обобщенной функции, полученной комбинацией n ; j – порядковый номер значения в выборке; n – порядковый номер комбинации (расчетной формулы), $n = 72$

4. Поиск минимальной величины S_n ;

5. Вывод нормированных данных, рассчитанных комбинацией, при которой $S_n \rightarrow \min$.

Комбинация, при которой сумма СКО комбинаций n окажется минимальной – считается оптимальной и используется для обработки информации. Созданный на этой основе алгоритм (*GP 1.0*) [Маневич и др., 2018] позволяет выбрать оптимальную комбинацию оценочных значений данных для процедуры нормирования.

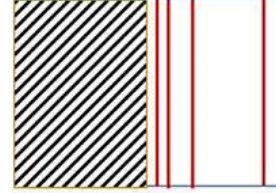
3.3 Разработка алгоритма и программного модуля расчета показателей устойчивости

Существует большое количество методов выделения линеаментов и активных разломов по определенным признакам на аэро- и космоснимках, методами морфометрического анализа и т.д. [Батугин, 1988; Лукина и др., 1990; Несмеянов, 2004; Николаев, 2005; Сим, 1991]. На рисунке 3.3 показаны “простые” примеры признаков “устойчивых” и “неустойчивых” участков на картах распределения геолого-геофизических параметров $F = \{f_i\}$.

“Менее устойчиво” - опаснее

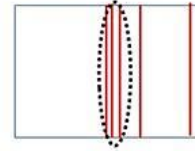
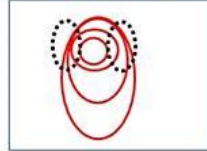
“Более устойчиво” – менее опаснее

а) Абсолютные значения параметра, заштриховано превышение $F > F_{\text{крит.}}$



б) Скорость изменения F (градиента).

Области $\max \text{grad } F$ - пунктирные овалы более опасны



в) Длина, ширина, узлы, плотность и др. распределения F по площади (линейность - опаснее)

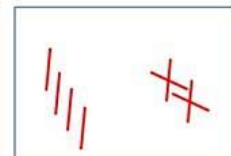
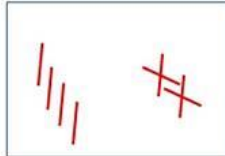
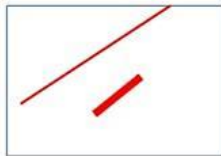


Рисунок 3.3 - Примеры устойчивых и неустойчивых ситуаций на картах распределения геолого-геофизических параметров $F = \{f_i\}$ на координатной плоскости Π [Гвишиани и др., 2021а]

Считаем, что на координатной плоскости $\mathbb{R}^2(x_1, x_2)$ имеется некоторая область $\Pi = \{a \leq x_1 \leq b; c \leq x_2 \leq d\}$. Для этой области задан набор геолого-геофизических полей F из m наборов данных (в виде цифровых карт различных параметров: географических, геологических, геофизических, геодинамических, экономических и других) (рисунок 3.4).

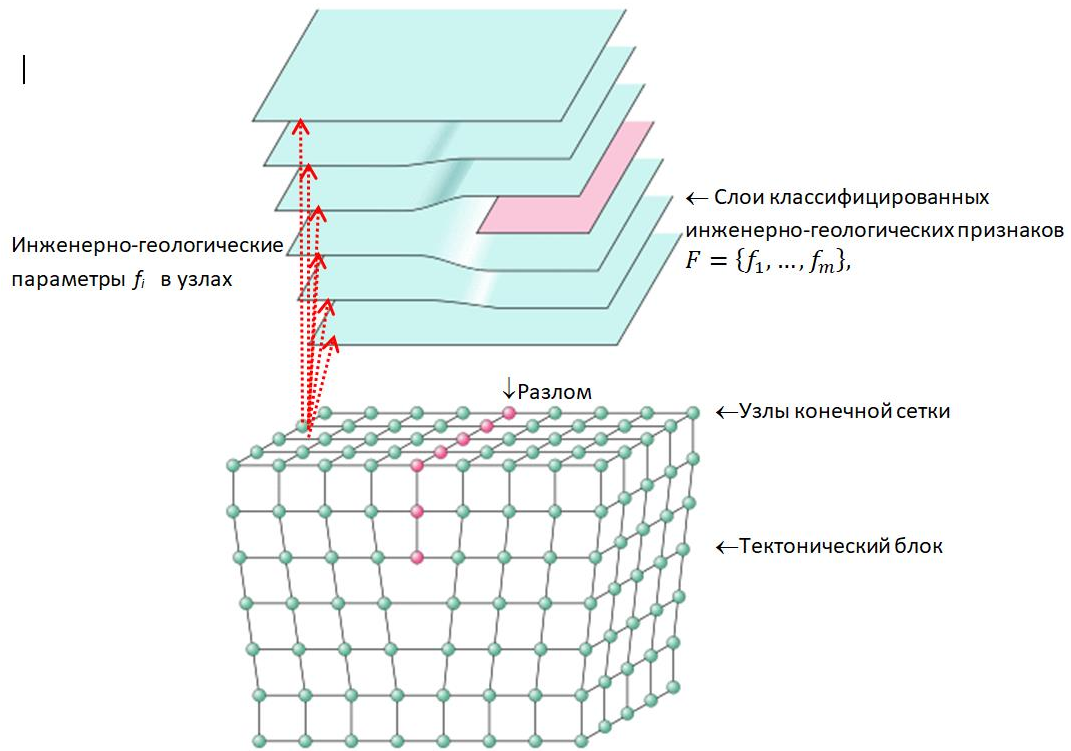


Рисунок 3.4 – К разработке алгоритма расчета показателей устойчивости. Требуется оценить устойчивость области Π по комплексу признаков F [Гвишиани и др., 2019б]:

$$F = \{f_1, \dots, f_m\},$$

$$f_i: \Pi \rightarrow \mathbb{R}; i = 1, \dots, m \quad (3.6)$$

Или разбить область Π на относительно неустойчивые (условно опасные) и устойчивые (условно безопасные) элементы, т.е. фактически выполнить геодинамическое районирование [Batugina and Petukhov, 1988].

В области Π задается регулярная сетка $W = W(h_1, h_2)$ с узлами w :

$$W = \left\{ w = (a + ih_1; c + jh_2) \left| \begin{array}{l} i = 0, \dots, N; h_1 = \frac{b-a}{N} \\ j = 0, \dots, M; h_2 = \frac{d-c}{M} \end{array} \right. \right\}. \quad (3.7)$$

Далее на сетке W необходимо проанализировать пространственное распределение систем функций F в окрестностях узла w . Для этого определим

нечеткую меру активности μ_F в интервале от 0 до 1, по следующим правилам.

Правило 1. *Вычисление динамического показателя.*

Каждый параметр f из набора F является функцией распределения на сетке W . Тогда для каждого параметра f можно определить динамический показатель D_f , который является функциональной характеристикой измерения f . Значение $D_f(w)$ трактуется как количественная оценка поведения функции f в узле $w \in W$, вычисленная по заданным правилам. В терминах анализа данных динамический показатель $D_f(w)$ является признаком.

Правило 2. *Вычисление меры активности динамического показателя.*

Для каждого динамического показателя D_f определяется мера активности (аномальности) μD_f в интервале от 0 до 1. Она показывает степень выраженности свойства f в узле w , определенного показателем D_f . Мера активности μD_f рассчитывается из динамического показателя D_f в рамках методологии дискретного математического анализа. Переход $D_f \rightarrow \mu D_f$ переводит анализ измерения f на язык нечеткой логики: меры активности μD_f для разных динамических показателей D_f являются нечеткими структурами на сетке W и могут соединяться в любых составах и любых количествах с помощью операций нечеткой логики и усреднений.

Правило 3. *Вычисление интегральной меры активности μ_F .*

На последнем шаге алгоритма выполняется соединение всех мер активности μD_f в единый интегральный показатель μ_F . Формула соединения представляет собой среднее арифметическое всех мер активности μD_f . В зависимости от задачи исследования могут применяться весовые коэффициенты для мер активности или другие формулы соединения [Oshchenko et al., 2020]. Для отражения меры геодинамической безопасности используется величина обратная интегральной мере активности:

$$S_F = 1 - \mu_F . \quad (3.8)$$

Преобразование $F \rightarrow \mu_F$ переводит векторный анализ относительно системы функций F в скалярный анализ относительно итоговой меры аномальности μ , что в теории принятия решений будет являться сведением многокритериальной задачи к скалярному выбору функции полезности. В терминах геодинамического районирования [Gvishiani et al., 2008] критерии оценки величины S_F по системе признаков F определяются по таблице 3.4. Такой подход к ранжированию является адекватным, т.к., если некоторая интегральная мера выражена в интервале $[0 \dots 1]$, то условия $S_F \leq 0.25$ и $S_F \geq 0.75$ означают устойчивость или неустойчивость. Попадание в интервал $(0.25; 0.75)$ говорит о неопределенности и необходимости дополнительных исследований [Agayan et al., 2022].

Таблица 3.4 – Ранжирование интегральной меры геодинамической безопасности S_F

| Узел (ячейка, структурный блок) w | Мера геодинамической безопасности S_F |
|-------------------------------------|---|
| опасен | ≤ 0.25 |
| нейтрален | $\in (0.25; 0.75)$ |
| безопасен | ≥ 0.75 |

Таким образом, в алгоритм включает в себя следующие параметры:

1. «Динамический показатель» – каждый динамический показатель трактуется как количественная оценка того или иного свойства исходных данных.
2. «Мера активности динамического показателя» – мера показывает на шкале $[0, 1]$ степень активности динамического показателя.

3. «Мера безопасности динамического показателя» - величина обратная мере активности динамического показателя.

4. «Интегральная мера безопасности» представляет собой соединение мер безопасности динамических показателей.

3.4 Разработка мер активности динамических показателей

Для реализации алгоритма были разработаны программные модули на основе расчета морфометрических показателей и нормализации геолого-физических параметров, характеризующих особенности рельефа $L_{Re}^1(w)$, $L_{Re}^2(w)$, $|\nabla_{Re}|(w)$; близость $\rho(w, \mathcal{P})$ к активным разломам, их плотность $\rho(w, \rho)$, компоненты тензора напряжений $\sigma_{xx}(w)$ $\sigma_{yy}(w)$ и интенсивность напряжений $\sigma_{int}(w)$, компоненты тензора деформации $E_{xx}(w)$ $E_{yy}(w)$ параметр деформации – дилатация $dil(w)$, аномалии магнитного поля $L_{Mag}^2(w)$, $|\nabla_{Mag}|(w)$. [Гвишиани и др., 2019; Agayan et al., 2022]. Первые два показателя – L_{Re}^1 , L_{Re}^2 характеризуют геоморфологическую изменчивость, а третий $|\nabla_{Re}|$ – градиент рельефа. L_{Re}^1 , L_{Re}^2 характеризуют изрезанность рельефа во внутреннем узле w , по абсолютным значениям и по углам.

$$L_{Re}^1(w) = \frac{\sum_{\bar{w} \in C(w)} |Re(\bar{w}) - Re(w)|}{4}. \quad (3.9)$$

$$L_{Re}^2(w) = \frac{2 + \cos \theta_\Gamma + \cos \theta_B}{2}, \quad (3.10)$$

$$\cos \theta_\Gamma = \frac{-1 + (Re(w_4) - Re(w)) \times (Re(w_6) - Re(w))}{\sqrt{1 + (Re(w_4) - Re(w))^2} \times \sqrt{1 + (Re(w_6) - Re(w))^2}}, \quad (3.11)$$

$$\cos \theta_B = \frac{-1 + (Re(w_2) - Re(w)) \times (Re(w_8) - Re(w))}{\sqrt{1 + (Re(w_2) - Re(w))^2} \times \sqrt{1 + (Re(w_8) - Re(w))^2}}. \quad (3.12)$$

Третий показатель перепада рельефа есть модуль градиента $|\nabla_{Re}(w)|$, отвечает за максимальное изменение рельефа в узле w и вычисляется с помощью оператора Собеля [Sobel and Feldman, 1973]:

$$|\nabla_{Re}(w)| = |\nabla_{Re}^r(w)| + |\nabla_{Re}^b(w)|, \quad (3.13)$$

$$\nabla_{Re}^r(w) = (Re(w_7) + 2Re(w_8) + Re(w_9)) - (Re(w_1) + 2Re(w_2) + Re(w_3)), \quad (3.14)$$

$$\nabla_{Re}^b(w) = (Re(w_3) + 2Re(w_6) + Re(w_9)) - (Re(w_1) + 2Re(w_4) + Re(w_7)). \quad (3.15)$$

Меры активности динамических показателей для L_{Re}^1 , L_{Re}^2 , $|\nabla_{Re}|$ считаются как:

$$\begin{aligned} \mu L_{Re}^1(w) &= \frac{L_{Re}^1(w)}{L_{Re}^1(w) + \overline{L_{Re}^1}} \\ \mu L_{Re}^2(w) &= \frac{L_{Re}^2(w)}{L_{Re}^2(w) + \overline{L_{Re}^2}}. \\ \mu \nabla_{Re}(w) &= \frac{\nabla_{Re}(w)}{\nabla_{Re}(w) + \overline{\nabla_{Re}}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

При рассмотрении проблем, связанных с устойчивостью структурных тектонических блоков, ключевым является вопрос о макроскопическом проявлении геодинамического процесса. В земной коре таким проявлением чаще всего является относительное смещение частей массива относительно друг друга. Учет процессов, происходящих на границах между СТБ, представляется необходимым условием для построения современных аналитических и численных геодинамических моделей. Для этого были добавлены показатели $\rho(w)$, который характеризует плотность разломов и $\rho(p, \mathcal{P})$, который характеризует близость к тектоническим разломам.

Динамический показатель плотности определялся методом оценки линейной плотности, которая получается в круговой окрестности внутри

каждой ячейки растра. Длина отрезка каждой линии, пересекаемой круговой окрестностью, умножается на коэффициент веса линий, затем все значения длины суммируются и делятся на площадь круга. Этот процесс повторяется для всех ячеек растра. Расчёт значений $\rho(p, \mathcal{P})$ от некоторой ячейки p до разлома \mathcal{P} получается с помощью критерия Колмогорова среднего с отрицательным показателем:

$$\rho(p, \mathcal{P}) = \begin{cases} 0, & \text{если } p \in \mathcal{P} \\ M_q(\rho(p, P_k)|_1^N), & \end{cases} \quad (3.17)$$

где

$$q < 0$$

$$M_q(\rho(p, P_k)|_1^N) = \left(\frac{\sum_{k=1}^N \rho(p, P_k)^q}{N} \right)^{1/q}. \quad (3.18)$$

Меры активности динамического показателя для $\rho(p, \mathcal{P})$, определяются как:

$$\mu\rho(p, \mathcal{P}) = \frac{\rho(p, \mathcal{P})}{\rho(p, \mathcal{P}) + \overline{\rho(p, \mathcal{P})}}. \quad (3.19)$$

Для реализации методологии был разработан программный модуль [Гвишиани и др., 2021a], с помощью которого были выполнены тестовые расчеты для площади, в центре которой находится ПИЛ. При тестировании использовались три морфометрических показателя, характеризующих особенности рельефа $L_{Re}^1(w)$, $L_{Re}^2(w)$, $|\nabla_{Re}(w)|$, и четвертый — близость $\mu\rho(p, \mathcal{P})$ к активным разломам. Расчет суммарной меры безопасности по четырем признакам проводился по алгоритму, схема которого приведена на рисунке 3.5.

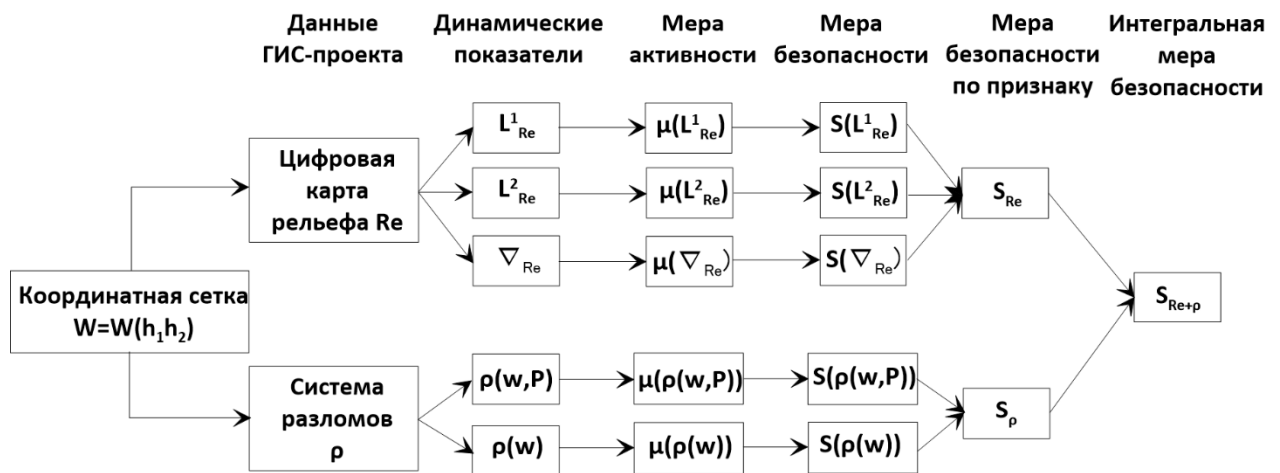


Рисунок 3.5 - Схема расчета интегральной меры безопасности для Нижнеканского массива

На рисунке 3.6 представлена интегральная мера $S_{Re+\rho}$, построенная по особенностям признакам особенностей рельефа и близости к тектоническим разломам в соответствии со схемой на рисунке 3.5.

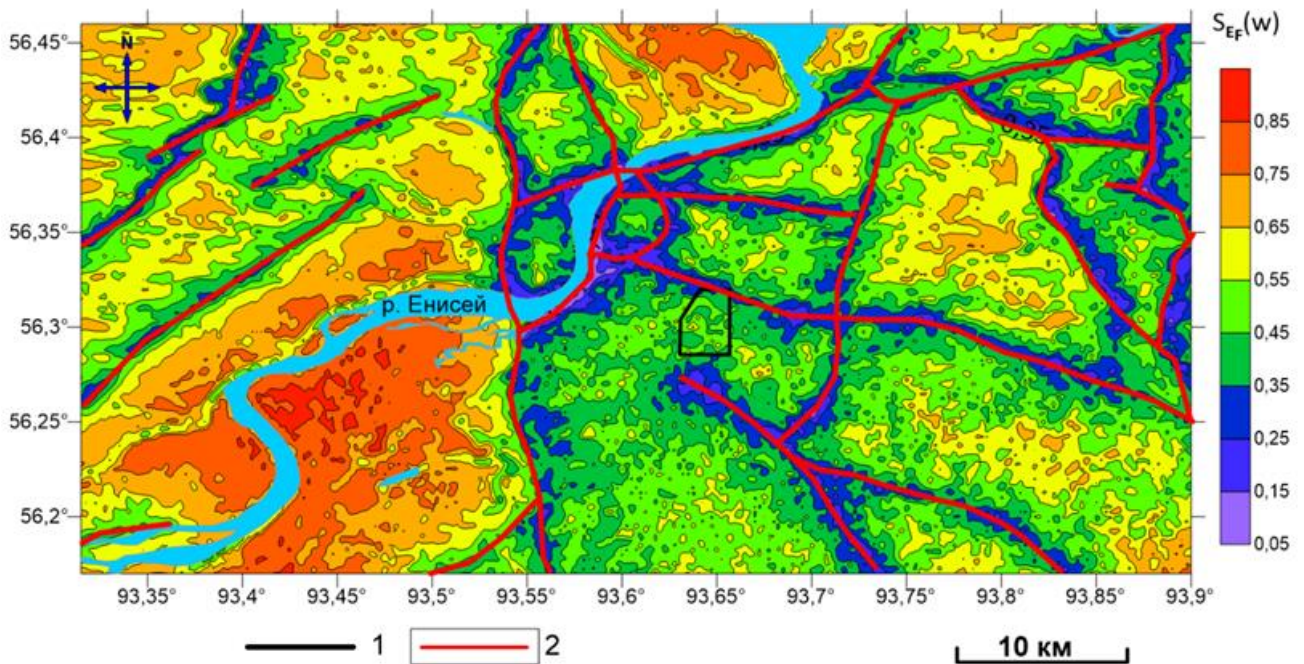


Рисунок 3.6 - Интегральная мера геодинамической безопасности $S_{Re+\rho}$ по пяти признакам μD_f . Условно безопасные ($S_{Re+\rho} > 0,65$), нейтральные ($0,45 < S_{Re+\rho} < 0,65$), опасные ($S_{Re+\rho} < 0,65$) [Гвишиани и др., 2021а]

На рисунке 3.7а показана исходная цифровая модель рельефа района захоронения РАО. На рисунке 3.7 b,c,d приведены рассчитанные карты изменчивости рельефа по показателям соответственно $L_{Re}^1(w)$ и $L_{Re}^2(w)$, $|\nabla_{Re}|(w)$. Пример расчета меры близости к тектоническим разломам $\rho(w, \mathcal{P})$ как кратчайшего расстояния до тектонического разлома приведен на рисунке 3.7f мера плотности разломов $\rho(w)$ на рисунке 3.7e.

Следующие динамические показатели активности относятся к напряженно-деформированному состоянию. Рассчитывались динамические показатели активности - компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} и интенсивности напряжений σ_i , которые были получены из результатов расчета напряженного состояния в работе [Morozov et al., 2019]. Также определялись динамические показатели активности параметров деформаций земной поверхности, полученные по результатам ГНСС-измерений [Андерсон, 2011; Татаринев и др., 2022; Gvishiani et al, 2020, 2021]. В качестве исходных данных использовались компоненты тензора деформации e_{xx} , e_{yy} и деформация дилатации E_{Dil} . Преобразование параметров НДС выполнялось на основе нормализации в шкалу активности в интервале от 0 до 1.

Для этого определяются показатели, которые соответствуют следующим значениям динамической меры активности в таблице 3.5: a – максимальное значение напряжений/деформаций; b – значение напряжений или деформаций на положительной части шкалы, выявленная экспертным путем; c – значение напряжений или деформаций на отрицательной части шкалы, выявленная экспертным путем; d - минимальное значение напряжений/деформаций. Далее для каждого интервала по x_i выполняется преобразование по (3.20). Таким образом, каждому интервалу значений напряжений и деформаций соответствует определенная формула расчета и интервал значений меры динамической активности [Гвишиани и др., 2021a]:

$$x_i \in \begin{bmatrix} [a; b] \\ [b; \frac{b+c}{2}] \\ [\frac{b+c}{2}; c] \\ [c; d] \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} 0.5 \times \frac{x-a}{b-a} \\ 0.5 + \frac{x-b}{c-b} \\ 1.5 - \frac{x-b}{c-b} \\ 0.5 \times \frac{d-x}{d-c} \end{cases} . \quad (3.20)$$

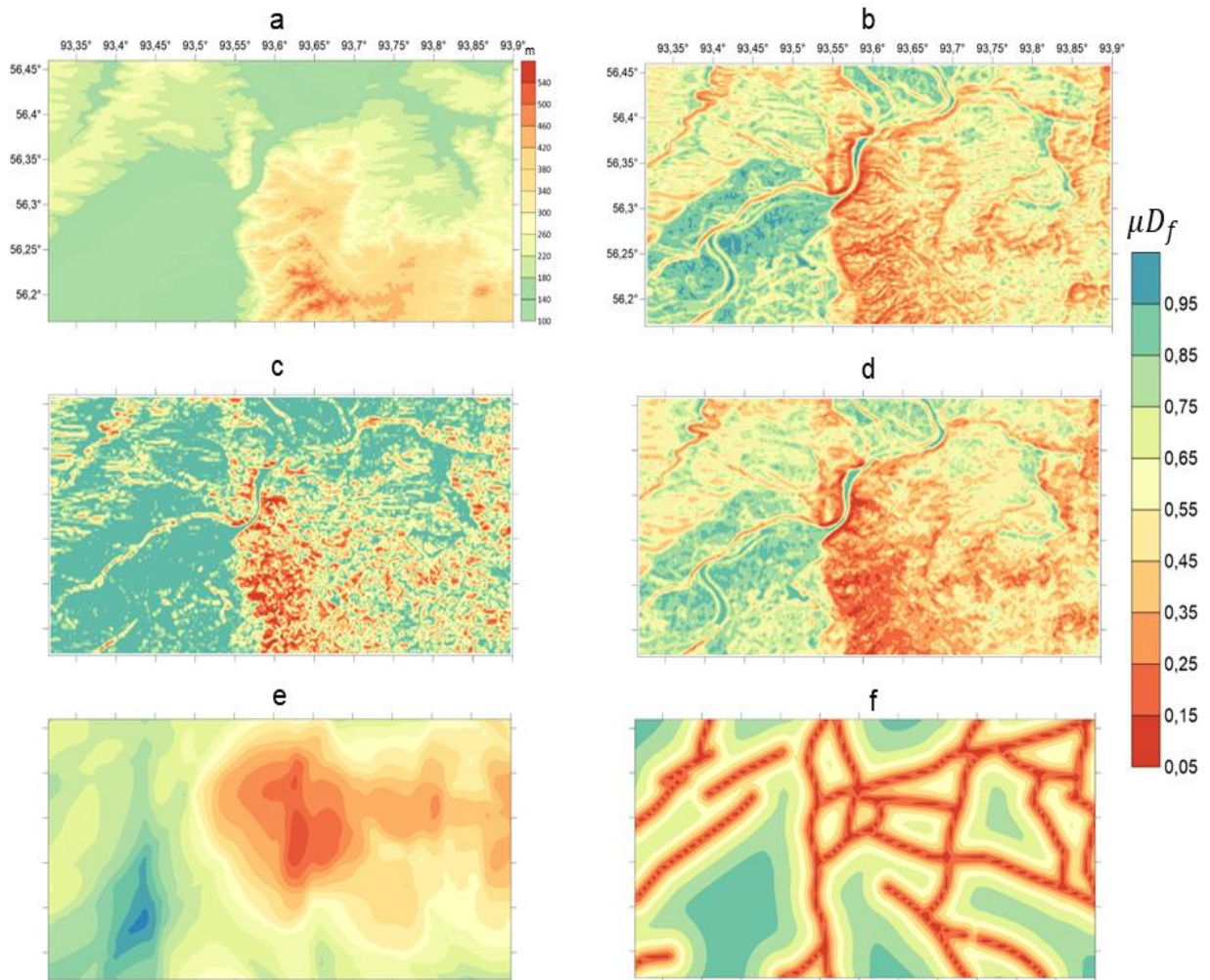


Рисунок 3.7 – Рельеф и меры активности динамического показателя рельефа и разломов. а – рельеф; б – мера рельефа, $\mu L_{Re}^1(w)$; с – мера рельефа, $\mu L_{Re}^2(w)$; д – мера рельефа, $\mu \nabla_{Re}(w)$; е – мера плотности разломов, $\mu \rho(w)$; ф – мера кратчайшего расстояния до разломов, $\mu \rho(w, \mathcal{P})$

Таблица 3.5 – Интервалы меры динамической активности

| № | Интервал напряжений | Интервал меры |
|---|-----------------------------------|---------------|
| 1 | $[a; b]$ | 0 – 0.5 |
| 2 | $\left[b; \frac{b+c}{2} \right]$ | 0.5 – 1 |
| 3 | $\left[\frac{b+c}{2}; c \right]$ | 1 – 0.5 |
| 4 | $[c; d]$ | 0.5 – 0 |

На рисунке 3.8 приведены меры динамической активности показателей напряженно-деформированного состояния: напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_i . (рисунок 3.8, а, с, е) и деформаций e_{xx} , e_{yy} , E_{Dil} . (рисунок 3.8, b, d, f).

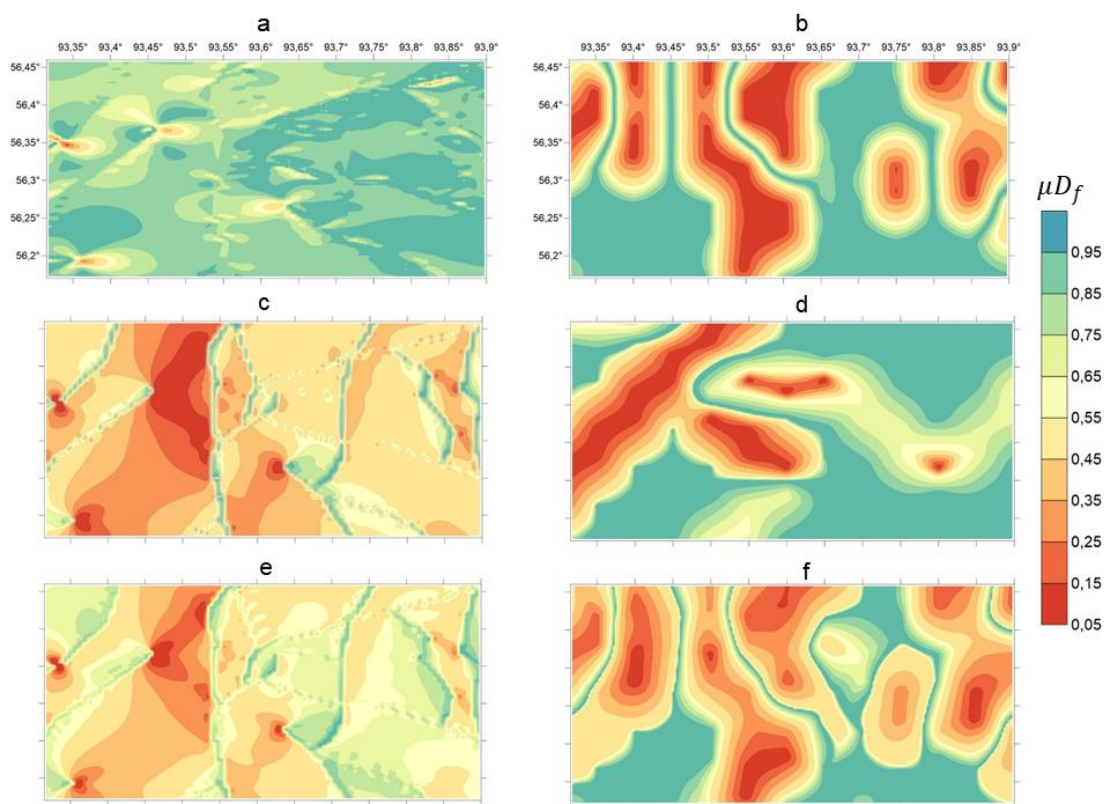


Рисунок 3.8 – Меры динамической активности показателей напряженно-деформированного состояния. а – мера компоненты тензора напряжений $\mu\sigma_{xx}(w)$; б – мера деформации $\mu e_{xx}(w)$; с – мера компоненты тензора напряжений $\mu\sigma_{yy}(w)$; д – мера деформации $\mu e_{yy}(w)$; е – мера интенсивности напряжений $\mu\sigma_i(w)$; ф – мера деформации дилатации $\mu E_{Dil}(w)$

На рисунке 3.9 показаны карты интегральных мер геодинамической безопасности и графики распределения их значений по интервалам, внутри следующих групп: геоморфологической изменчивости $S_{Re}(w)$, плотности тектонических нарушений $S_{\rho}(w)$, напряженно-деформированного состояния $S_{SSS}(w)$, аномалий магнитного поля $S_{Mag}(w)$. Они вычислялись по следующим формулам:

$$S_{Re}(w) = 1 - \frac{\mu L_{Re}^1(w) + \mu L_{Re}^2(w) + \mu \nabla_{Re}(w)}{3} \quad (3.21)$$

$$S_{\rho}(w) = 1 - \frac{\mu \rho_{\rho}(w) + \mu \rho(\Pi, \mathcal{P})}{2} \quad (3.22)$$

$$S_{SSS}(w) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\mu \sigma_{xx}(w) + \mu \sigma_{yy}(w) + \mu \sigma_{int}(w)}{3} + \frac{\mu e_{xx}(w) + \mu e_{yy}(w) + \mu E_{Dil}(w)}{3} \right) \quad (3.23)$$

$$S_{Mag}(w) = 1 - \frac{\mu L_{Mag}^2(w) + \mu \nabla_{Mag}(w)}{2} \quad (3.24)$$

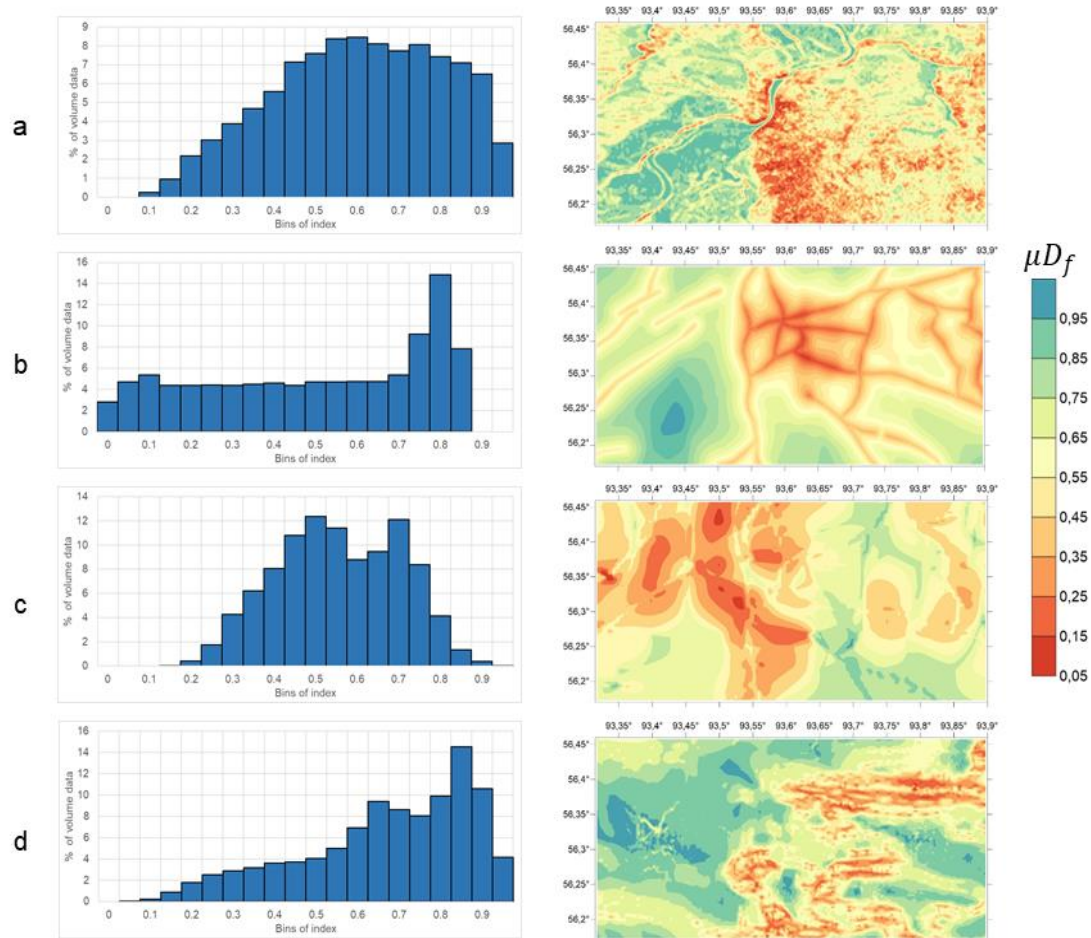


Рисунок 3.9 – Интегральные меры геодинамической безопасности графики распределения их значений по группам: а – мера безопасности по геоморфологической изменчивости, $S_{Re}(w)$; б – мера безопасности по плотности тектонических нарушений, $S_p(w)$; в – мера безопасности по напряженно-деформированному состоянию, $S_{SSS}(w)$; д – мера безопасности по аномальному магнитному полю, $S_{Mag}(w)$

Распределения интегральных мер $S_i(w)$ внутри групп существенно отличаются друг от друга. Для интегральной меры геоморфологической изменчивости $S_{Re}(w)$ характерно равномерное распределение данных в интервале от 0.45 до 0.9 (рисунок 3.9а). Большое количество площади района относится к равнинным территориям с малыми перепадами высот (рисунок 3.9а). Интегральная мера плотности тектонических разломов $S_p(w)$ имеет

однородное распределение значений в интервале от 0 до 0.75. При этом около 31% всех данных приходится на интервал 0.75–0.9 (рисунок 3.9b). Интегральная мера напряженно-деформированного состояния $S_{SSS}(w)$ имеет распределение близкое к нормальному, и около 85% всех данных попадает в интервал значений 0.25–0.75 (рисунок 3.9c). Интегральная мера изменчивости аномалий магнитного поля $S_{Mag}(w)$ распределена по интервалам не равномерно. На интервал 0.75–1 приходится до 47% всех данных, на интервал 0.25–0.75 около 50% всех данных и около 3% на интервал 0–0.25.

3.5 Корреляционный анализ мер активности динамических показателей

Для вычисленных динамических показателей D_f и мер их активности μD_f были рассчитаны матрицы корреляций и пороги силы корреляционной связи. Корреляционная матрица — это таблица, заголовками строк и столбцов которой являются обрабатываемые переменные, а на пересечении строк и столбцов выводятся коэффициенты корреляции для соответствующей пары признаков. Коэффициент корреляции - это математическая мера зависимости двух случайных величин. В случае, если изменение одной случайной величины не ведёт к закономерному изменению другой случайной величины, но приводит к изменению другой статистической характеристики данной случайной величины, то подобная связь не считается корреляционной, хотя и является статистической. Если коэффициент ближе к 0, то отсутствует связь между переменными.

В матрице представлен коэффициент парной корреляции Пирсона, представляющий число от -1 до 1, характеризующее тесноту линейной корреляционной связи между зависимой случайной величиной и независимой случайной величиной:

$$r = \frac{\sum((x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum((x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2)}} . \quad (3.25)$$

Нижний порог наличия корреляционной связи определялся при помощи критерия Стьюдента, а интервалы силы корреляционной связи по формуле (3.26):

$$r_0 = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}} \quad (3.26)$$

$$r_{int} = \frac{1 - r_0}{3} \quad (3.27)$$

Таким образом, для используемого набора данных (по 27495 строк в каждом из показателей и уровне значимости 0.95) были определены интервалы силы корреляционной связи:

- слабая связь в интервале r_{xy} 0.012–0.341;
- средняя связь в интервале r_{xy} 0.341–0.671;
- сильная связь в интервале r_{xy} 0.671–1.

В таблице 3.6 приведена корреляция интегральных геодинамической безопасности по группам (сила корреляционной связи была представлена в виде дискретной цветовой шкалы): мера безопасности по геоморфологической изменчивости, $S_{Re}(w)$; мера безопасности по плотности тектонических нарушений, $S_p(w)$; мера безопасности по напряженно-деформированному состоянию, $S_{SSS}(w)$; мера безопасности по аномалиям магнитного поля, $S_{Mag}(w)$.

Таблица 3.6 – Матрица корреляций интегральных мер геодинамической безопасности

| | $S_{Re}(w)$ | $S_p(w)$ | $S_{sss}(w)$ | $S_{Mag}(w)$ |
|---------------|-------------|----------|--------------|--------------|
| $S_{Re}(w)$ | 1 | 0.13 | -0.03 | 0.28 |
| $S_p(w);$ | 0.13 | 1 | 0.04 | 0.16 |
| $S_{sss}(w);$ | -0.03 | 0.04 | 1 | -0.28 |
| $S_{Mag}(w)$ | 0.28 | 0.16 | -0.28 | 1 |

На рисунке 3.10 приведена рассчитанная корреляционная матрица мер активности (или аномальности) для 13 динамических показателей μD_f , используемых при построении карт устойчивости.

Установлено, что 65 из 78 значений корреляции мер активности динамических показателей μD_f имеют слабую корреляционную связь. Это достаточно хороший показатель с точки зрения анализа данных, т.к. признаки должны быть не коллинеарными, иначе из-за высокой дисперсии данных снижается обобщающая способность интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Средние и сильные корреляционные связи обнаруживаются внутри групп показателей μD_f . В группе рельефа показатели геоморфологической изменчивости $\mu L_{Re}^1(w)$ и $\mu L_{Re}^2(w)$ имеют сильную корреляционную связь с показателем градиента рельефа $\mu \nabla_{Re}(w)$. Между собой показатели $\mu L_{Re}^1(w)$ и $\mu L_{Re}^2(w)$ имеют среднюю корреляционную связь.

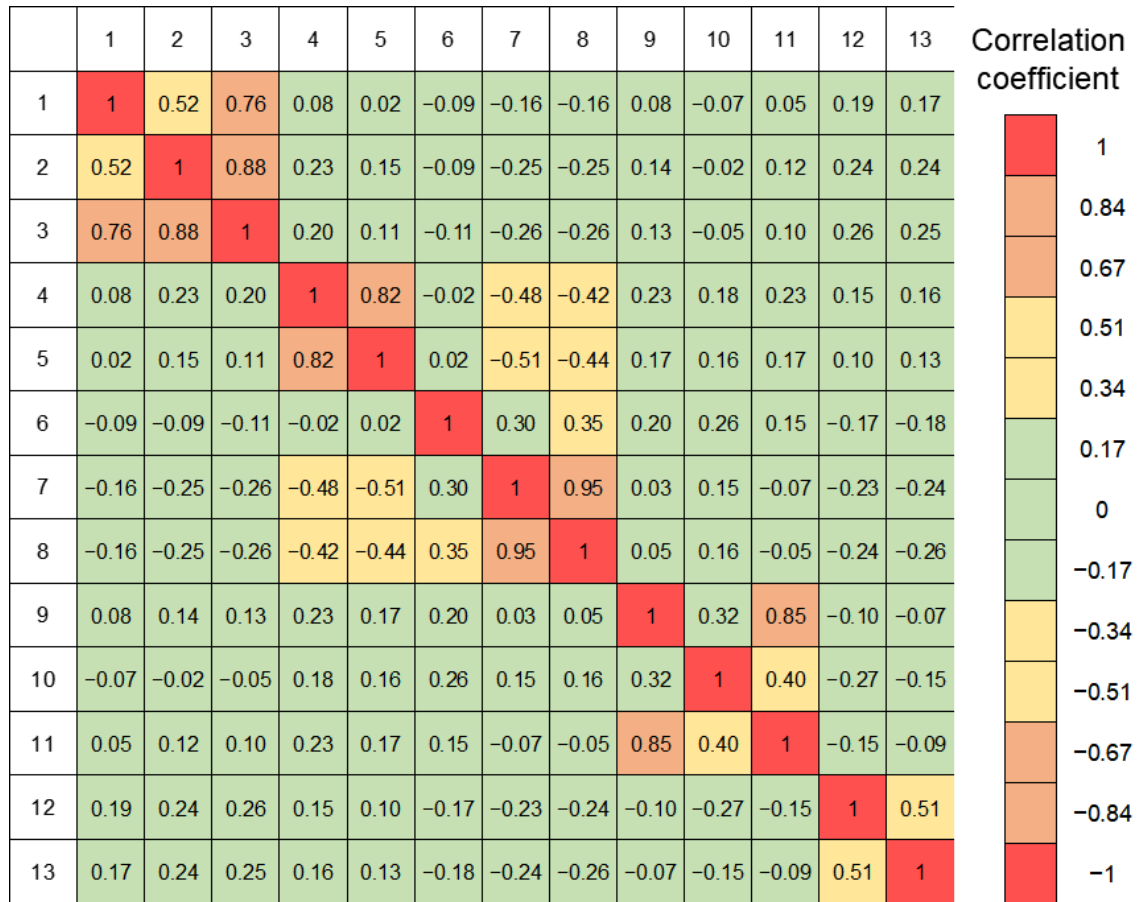


Рис. 3.10. Коэффициенты матрицы корреляции мер активности динамических показателей μD_f : 1 – мера рельефа, $\mu L_{Re}^1(w)$; 2 – мера рельефа, $\mu L_{Re}^2(w)$; 3 – мера рельефа, $\mu \nabla_{Re}(w)$; 4 – мера кратчайшего расстояния до разлома, $\mu \rho(w, \mathcal{P})$; 5 – мера плотности разломов, $\mu \rho(w)$; 6 – мера напряжения $\mu \sigma_{xx}(w)$; 7 – мера напряжения $\mu \sigma_{yy}(w)$; 8 – мера интенсивности напряжений $\mu \sigma_{int}(w)$; 9 – мера деформации $\mu e_{xx}(w)$; 10 – мера деформации $\mu e_{yy}(w)$; 11 – мера дилатации деформации $\mu E_{Dil}(w)$; 12 – мера аномалии магнитного поля, $\mu L_{Mag}^2(w)$; 13 – мера аномалии магнитного поля, $\mu \nabla_{Mag}(w)$

Из корреляционной матрицы видно, что меры кратчайшего расстояния до разломов $\mu \rho(w, \mathcal{P})$ и плотности разломов $\mu \rho(w)$ имеют сильную корреляционную связь, т.к. показатели показывают высокое пространственное соответствие (рисунок 3.9). И при этом меры группы разломов имеют среднюю

силу корреляционной связи с мерами напряжений $\mu\sigma_{yy}(w)$, $\mu\sigma_i(w)$. Данное обстоятельство объясняется в первую очередь математической моделью расчета напряженного состояния [Морозов и др., 2016], в которой учитывается разломная тектоника района. В группе напряжений сильную корреляционную связь имеют показатели $\mu\sigma_{yy}(w)$, $\mu\sigma_i(w)$, т.к. напряжения σ_{yy} оказывают наибольший вклад в формирование интенсивности напряжений σ_i . Меры активности компонент тензора деформации $\mu e_{xx}(w)$, $\mu e_{yy}(w)$, определенные по результатам ГНСС-наблюдений имеют слабую корреляционную связь.

Мера активности дилатации деформации $\mu E_{Dil}(w)$ имеет сильную корреляционную связь с мерой $\mu e_{xx}(w)$, и среднюю корреляционную связь с мерой $\mu e_{yy}(w)$, (рисунок 3.10). Это объясняется формулой расчета дилатации деформации, куда входят компоненты тензора деформации e_{xx} и e_{yy} . Средняя сила корреляционной связи выявлена между мерой изменчивости аномалий магнитного поля $\mu L_{Mag}^2(w)$ и градиентом изменения аномалий магнитного поля $\mu \nabla_{Mag}(w)$. Внутренняя корреляция групп признаков обусловлена либо взаимозависимыми формулами получения исходных свойств динамических показателей D_f , либо одинаковым набором исходных данных признака F (как в случае рельефа или аномалий магнитного поля).

Таким образом, представленные выше результаты свидетельствуют о наличии слабой корреляционной связи, либо ее отсутствия. Это говорит о том, что большинство показателей, отражающих различные свойства геологической среды, являются независимыми наборами данных.

3.6 Выводы

1. Для обоснования безопасности захоронения высокоактивных РАО разработана новая методика геодинамического районирования, отличающаяся

тем, что для выявления неустойчивых зон используются методы и алгоритмы системного анализа. Они позволяют по неочевидным признакам выявлять потенциально неустойчивые зоны, которые могут стать каналами инфильтрации радионуклидов с подземными водами из санитарной зоны ПГЗРО.

2. Выявление геодинамических активных структур в границах площадки ПИЛ и на прилегающих территориях осуществляется на основе системного анализа комплекса геолого-геофизических параметров, являющихся признаками активности структурных тектонических блоков. Для анализа функций изменчивости состояния среды, разработана методика и алгоритм *GP 1.0* [Маневич и др., 2018], позволяющий выбрать оптимальную комбинацию оценочных значений, данных для процедуры нормирования.

3. Для каждого геолого-геофизического параметра вычисляется динамический показатель, являющийся количественной оценкой устойчивости. Разработаны алгоритм и программные модули расчета активности динамических показателей по шкале $[0, 1]$, которые в сумме представляют собой меру оценки геодинамической устойчивости структурных блоков.

4. Для динамических показателей и мер их активности рассчитаны матрицы корреляций и пороги силы корреляционной связи. Установлено, что большинство имеет слабую корреляционную связь, что свидетельствует о низкой дисперсии и достаточности обобщающей способности оценки устойчивости на основе интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Это говорит о том, что показатели, отражающие различные свойства геологической среды, являются независимыми наборами данных.

5. Тестирование методики для нескольких слоев данных по северной части Нижнеканского массива показал ее практическую ценность для решения

задач геодинамического районирования. Новизна заключается в системном иерархическом анализе разноплановых, разномасштабных и разноформатных слоев геолого-геофизической информации и, прежде всего геоморфологических и кинематических (определяемых по данным геодезических наблюдений) характеристик среды.

По результатам исследования сформулировано **второе научное положение** диссертации, выносимое на защиту:

Районирование территории по степени опасности при захоронении радиоактивных отходов базируется на алгоритмах дискретного математического анализа динамических показателей, характеризующих длительную устойчивость структурно-тектонических блоков.

ГЛАВА 4. ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРИТОРИЙ (НИЖНЕКАНСКИЙ МАССИВ)

4.1 Блоковые структуры ближнего района, дальней и ближней зон ПГЗРО

Ориентируясь на изложенную выше методику вначале при геодинамическом районировании были построены *схемы блоковых структур ближнего района ПИЛ (радиус до 15 км), дальней зоны (радиус до 5 км) и ближней зоны (радиус до 1,5 км)*. Схемы приведены на рисунках 4.1 - 4.2. Основным материалом для их разработки послужили - карта активных тектонических разломов, разработанная геологами ФГУП «ГХК» [Андерсон, 2011], и неотектоническая схема Р.М. Лобацкой [Лобацкая, 2005] (см. рисунки 2.7 и 2.9).

В соответствии рекомендациями нормативных документов (таблица 3.1) самой крупной структурой 4 ранга, является Приенисейский разлом. Его положение не вызывает сомнений, он выделяется геологами по многим признакам. Разлом является контактом Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы и делит район по р. Енисей на две части – правобережную и левобережную. Площадка ПИЛ располагается в правобережной части.

С конца плиоцена ($1,5 \pm 0,5$ млн. лет) правобережная часть, представленная здесь частью Енисейского кряжа, испытывает медленное с слабым устойчивым трендом воздымание. Суммарная амплитуда поднятия Атамановского отрога Енисейского кряжа за этот период оценивается в 400–500 м [Андерсон, 2011]. Средняя скорость воздымания по геологическим данным составляет до 0,3 мм/год. Эта тенденция подтверждается и данными геодезических измерений скоростей СДЗК средствами ГНСС [Татаринов и

др., 2018a]. Экстраполяция инструментально измеренных скоростей СДЗК с использованием ГНСС $v_{гор\ max} = 3 - 8$ мм/год для периода осреднения 1,6 млн. лет с учетом масштабного временного эффекта [Gvishiani et al., 2020, 2021] дает сопоставимые результаты с геологическими данными.

На схеме блокового строения ближнего района показано расположение двух блоков 4-го ранга 4А и 4В, а также 22 структурных блоков 6 и 7-го рангов (см. таблицу 3.1). Их границы показаны на рисунке 4.1 синим пунктиром. На рисунке 4.2 приведена схема блоковых структур в дальней зоне ПГЗРО для радиуса до 5 км. Здесь блоки 6-го ранга включают в себя мелкие блоки 8-го ранга. Безусловно, это деление несколько условно, так как размеры разломов варьируют в достаточно большом пределе.

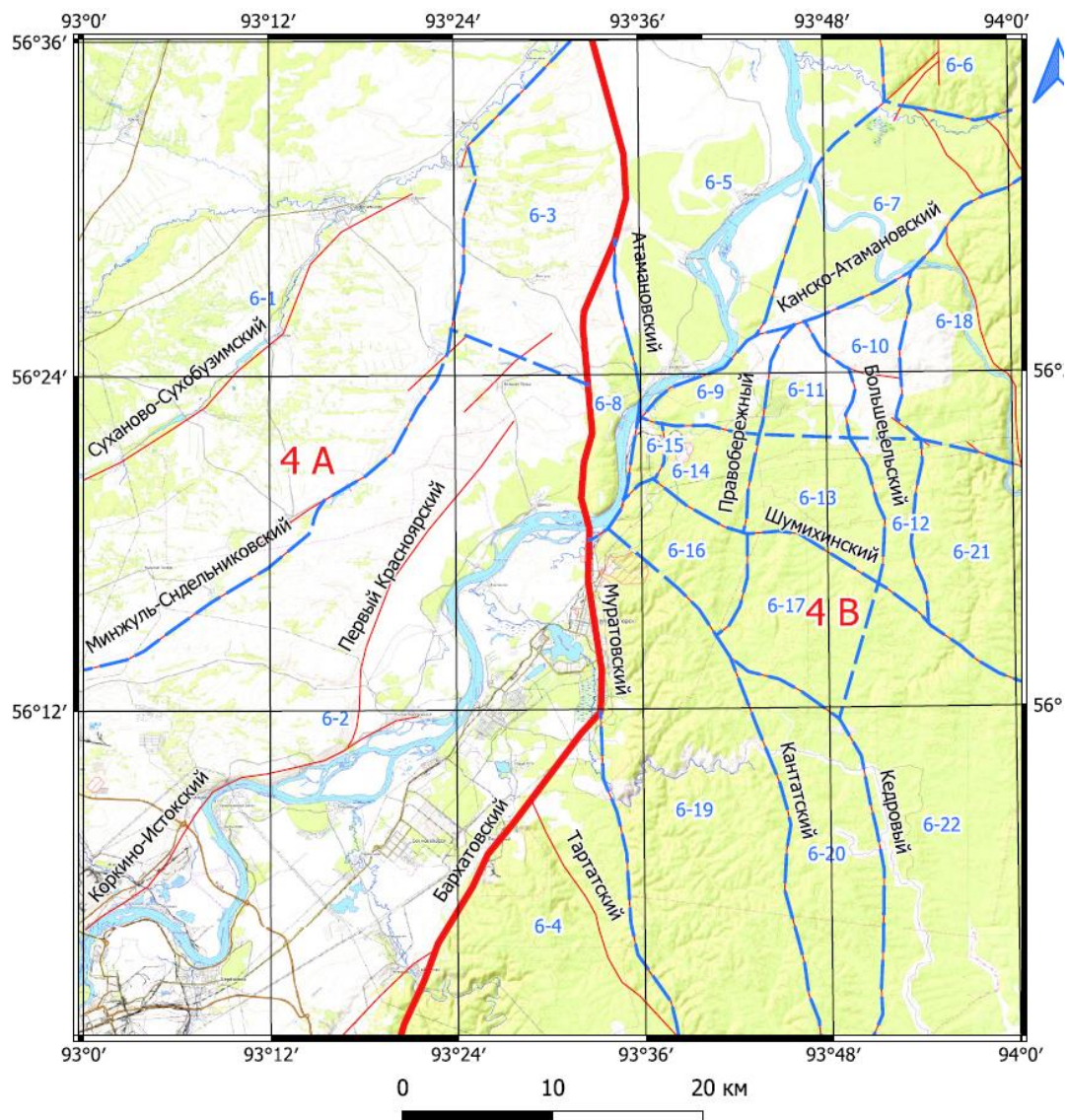


Рисунок 4.1 - Схема блоковых структур дальней зоне ПГЗРО. Красным цветом показаны структуры наивысшего 4-го ранга для данного района, а синим цветом - структуры 6-7 рангов

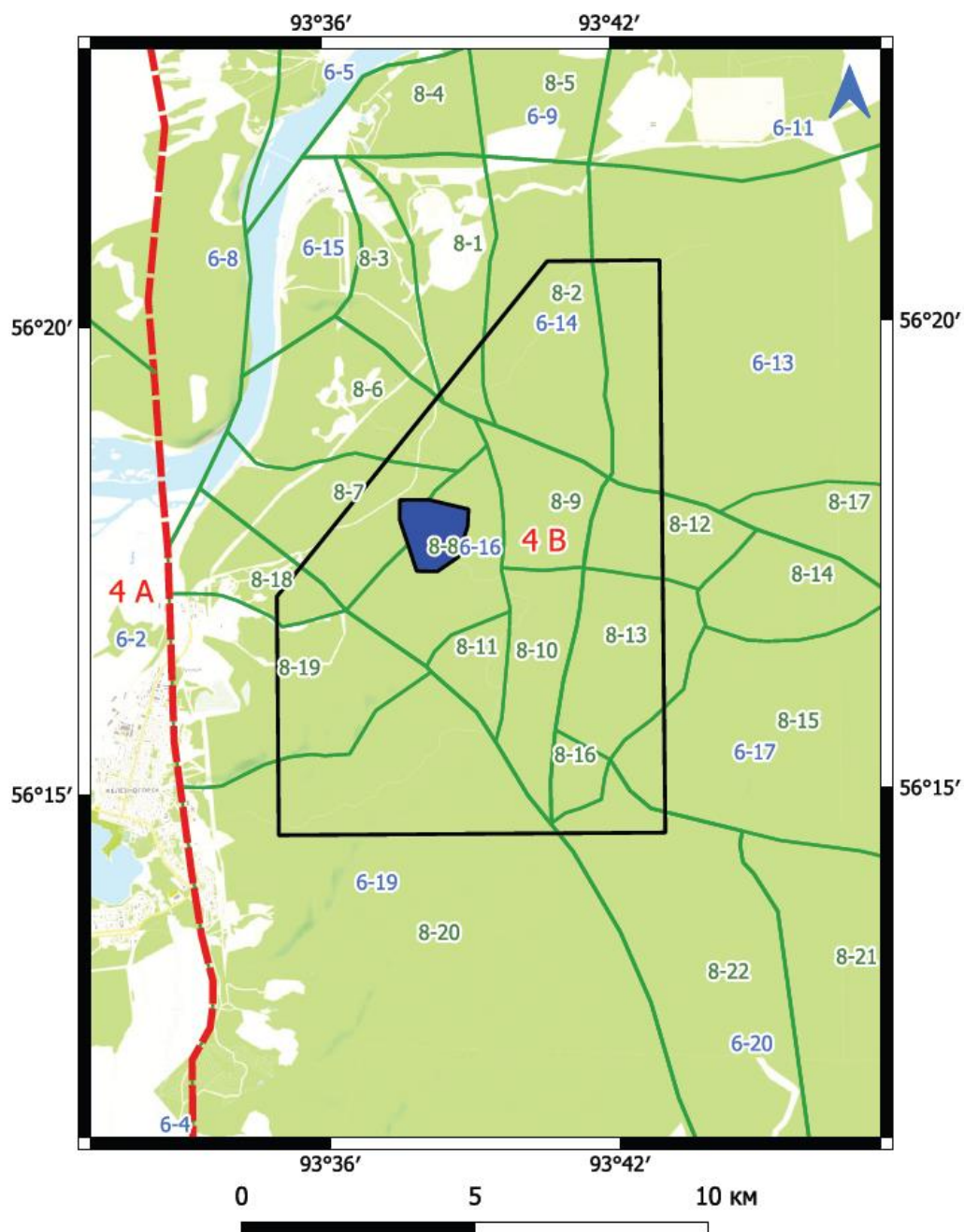


Рисунок 4.2 – Схема блоковых структур ближнего района ПГЗРО. Красным цветом показаны структуры наивысшего 4-го ранга для данного района, а зеленым цветом – 8 ранга

4.2 Геодинамическое районирование по напряженно-деформированному состоянию структурных блоков

Для иерархически устроенной системы тектонических блоков, выделенных в предыдущем разделе, было проведено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния [Морозов и др., 2008а]. Анализ велся путем расчета для каждого блока средних значений следующих параметров НДС:

1. *Интенсивность напряжений* (σ_i) – это величина, пропорциональная квадратному корню из второго инварианта девиатора напряжений со знаком «минус» и рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_i = (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx} \times \sigma_{yy} + 3 \times \tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.1)$$

где σ_{xx} и σ_{yy} - горизонтальные компоненты тензора напряжений; τ_{xy} - касательное напряжение.

Интенсивность напряжений характеризует энергонасыщенность СТБ, и связана с потенциальной энергией формоизменения зависимостью:

$$U_\phi = \frac{1 + \bar{\nu}}{3 \times \bar{E}} \times \sigma_i^2 \Delta V, \quad (4.2)$$

где \bar{E} и $\bar{\nu}$ – средние модули упругости, ΔV – объем.

Области высокой интенсивности напряжений обычно возникают в окончаниях тектонических разломов. Можно предположить, что чем выше плотность накопленной энергии и объем аномальной зоны, тем выше вероятность возникновения разрыва.

2. *Горизонтальные компоненты тензора напряжений* σ_{xx} и σ_{yy} .
Если давление литостатическое, то

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\nu\gamma H}{1 - \nu}, \quad (4.3)$$

где ν - коэффициент Пуассона; γ - плотность; H – глубина.

Если район тектонически активный, то горизонтальные компоненты могут превышать вертикальную в несколько раз.

3. *Соотношение главных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} .* Считается, что концентрация тектонических напряжений в локальных зонах приводит к образованию разрыва, зарождающегося в области отношения главных напряжений $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} > 6$.

4. Касательные напряжения - τ_{xy} . Касательные напряжения служат мерой оценки одной части пород смещаться (или скользить) относительно другой его части.

В настоящем разделе представлен расчет НДС по «классической» методике. В расчетах задавались эффективные сжимающие напряжения $\sigma_{max} = 30$ МПа, $\sigma_{min} = 10$ МПа, осредненные по результатам измерений напряжений в верхней части земной коры в различных районах земного шара [Гзовский, 1975; Grown and Hoek, 1978, Зубков, 2016]. Значение упругого модуля $E = 5 \times 10^4$ МПа, материала разломов на два порядка ниже, $E = 5 \times 10^2$ МПа, коэффициента Пуассона $\nu = 0.25$

Моделирование НДС выполнено для двух типов граничных условий, заданных:

- а) по геологическим данным;
- б) по результатам ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры.

На рисунках 4.3-4.8 показаны результаты моделирования полей НДС. Приведены средние значения для 3-х характеристик:

- касательные напряжения τ_{xy} ;
- интенсивность напряжений σ_i ;
- соотношения главных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} для ближнего района и дальней зоны ПГЗРО.

Значения рассчитанных величин τ_{xy} , σ_i и σ_{yy}/σ_{xx} для каждого блока на рисунках 4.3-4.8 указаны через слеш.

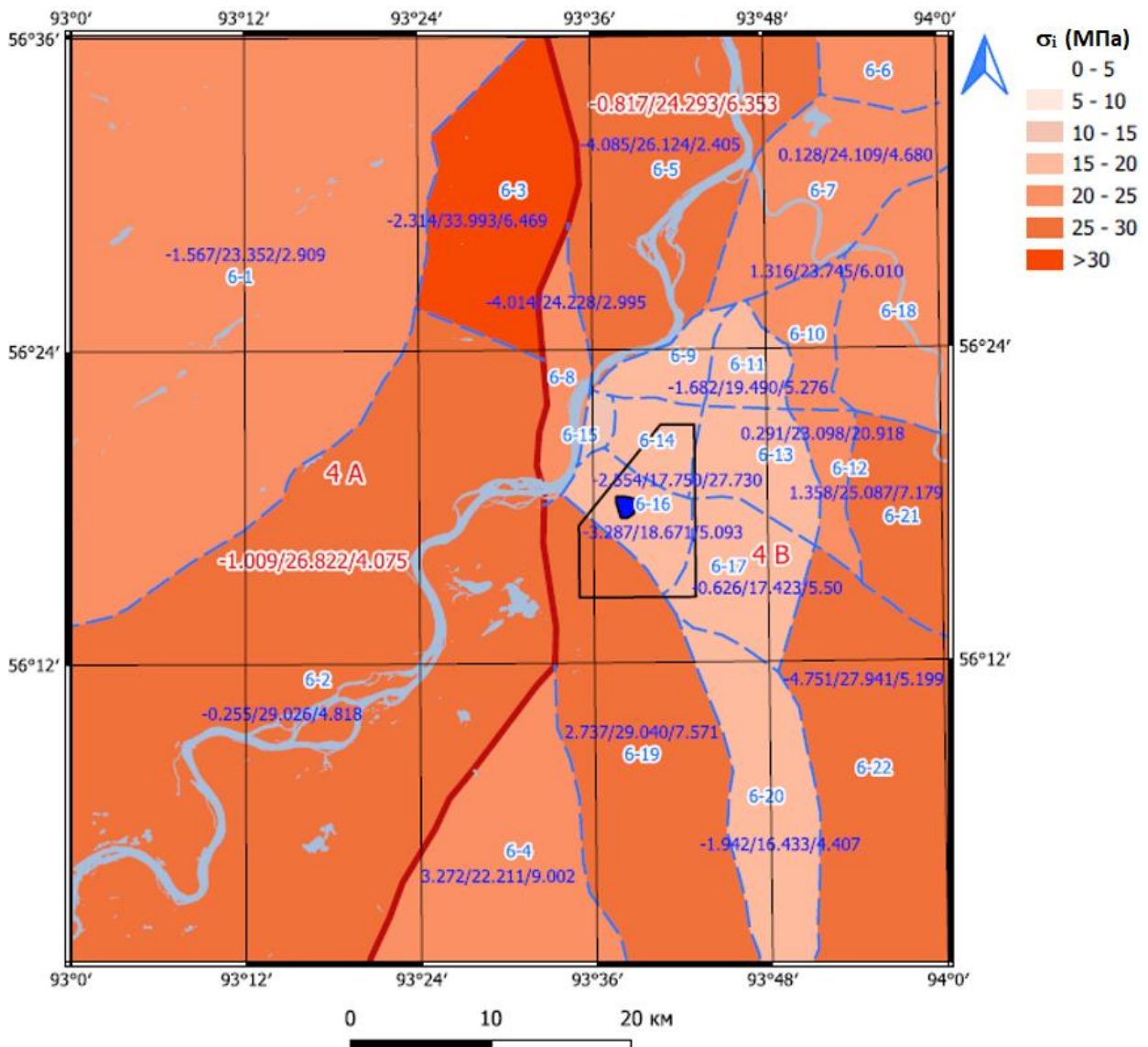


Рисунок 4.3 – Значения интенсивности напряжений σ_i в структурных блоках ближнего района ПГЗРО (радиус от ПИЛ до 15 км)

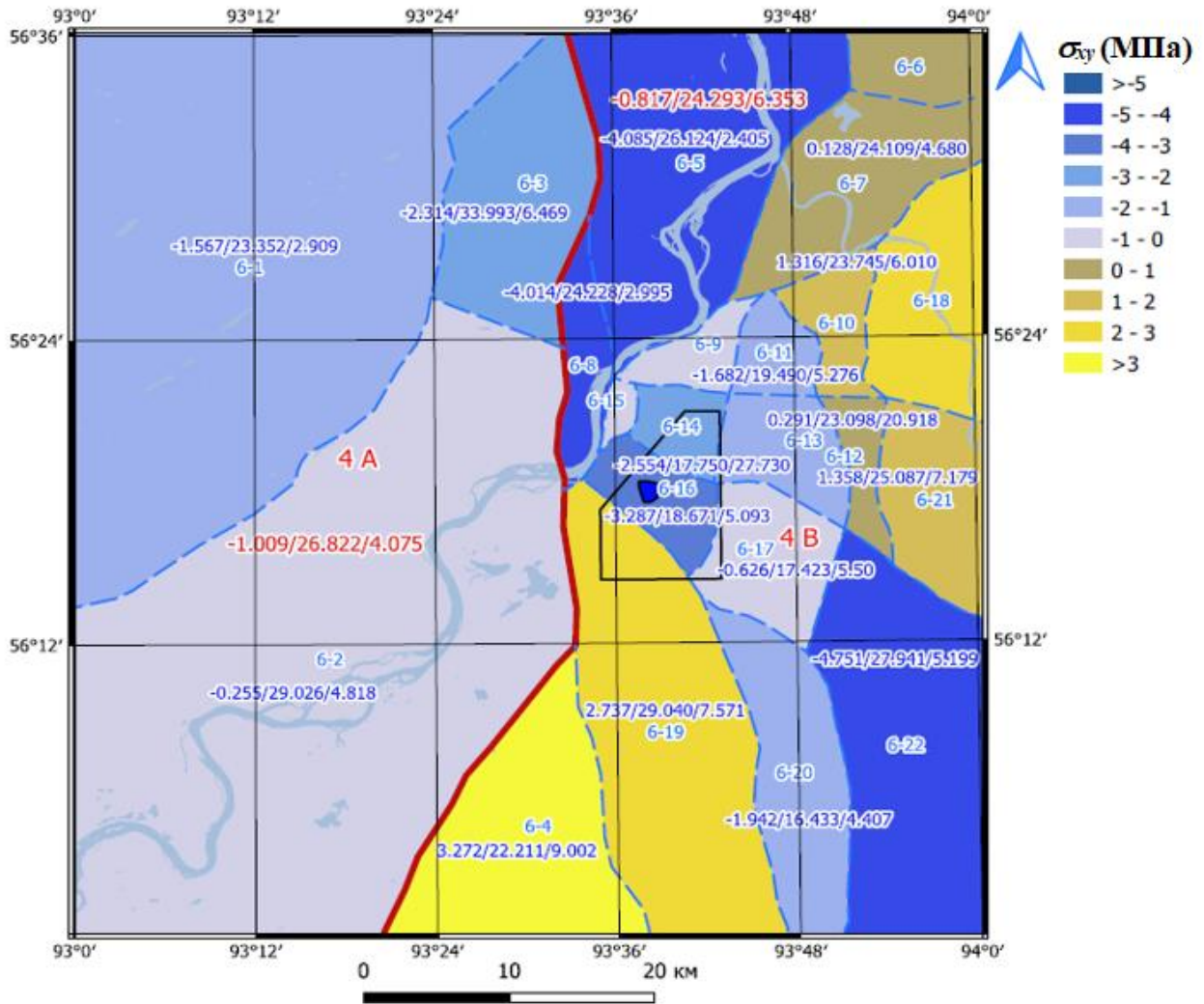


Рисунок 4.4 – Значения касательных напряжений τ_{xy} в структурных блоках ближнего района ПЗРО (радиус от ПИЛ до 15 км)

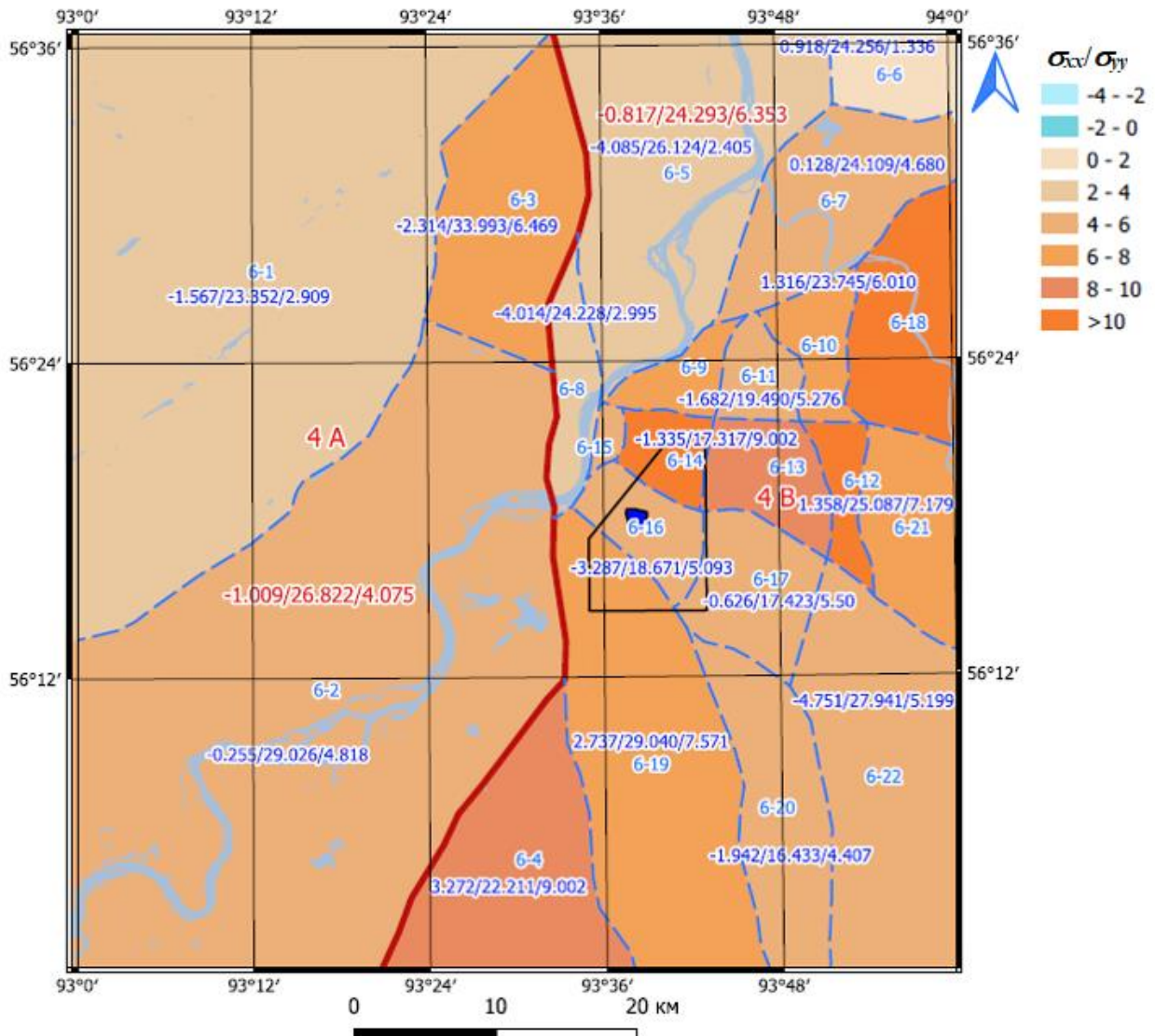


Рисунок 4.5 – Значения соотношения σ_{yy}/σ_{xx} в структурных блоках ближнего района ПГЗРО (радиус от ПИЛ до 15 км)

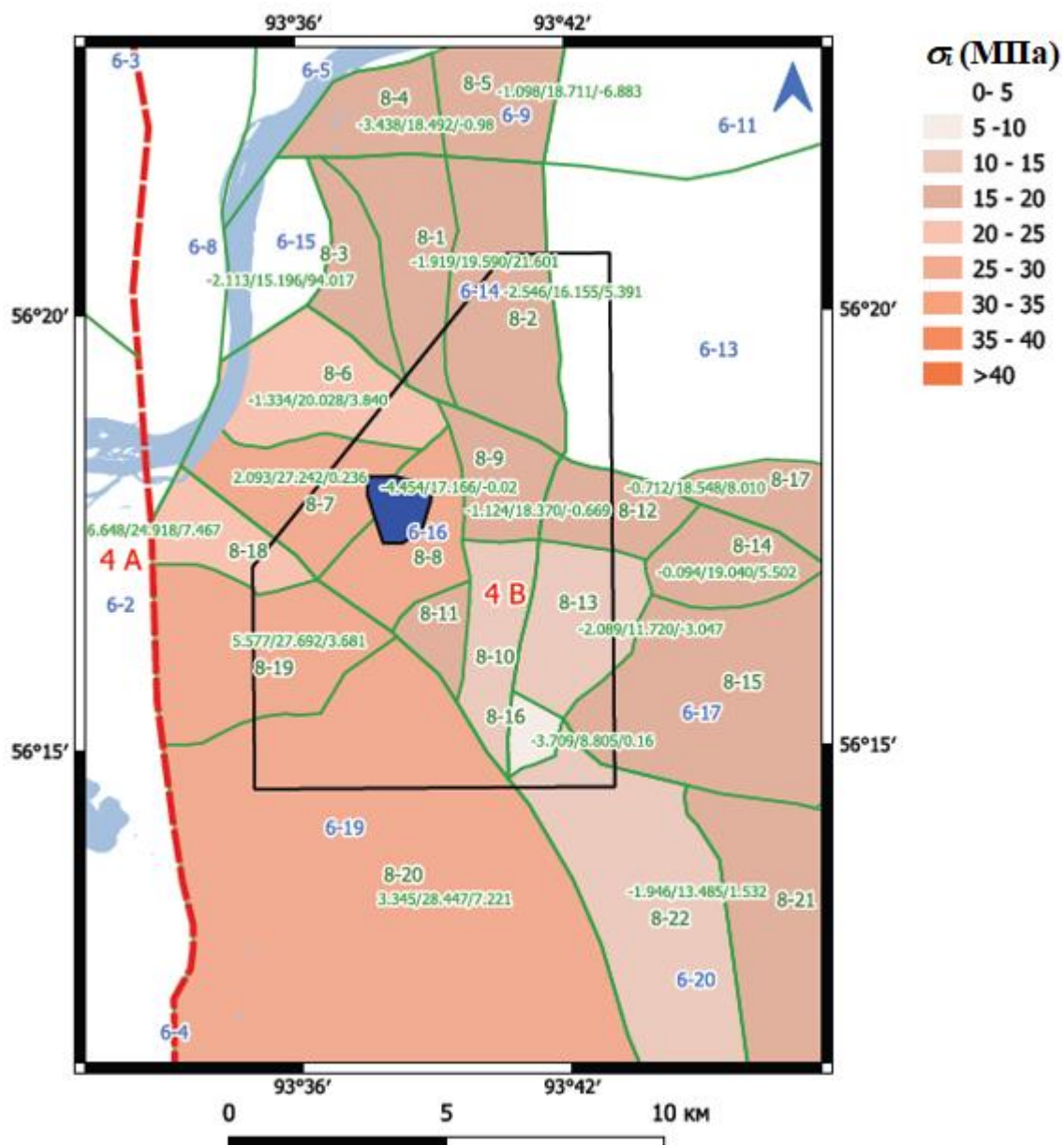


Рисунок 4.6 – Значения интенсивности напряжений σ_i в структурных блоках в ближней зоне ПГЗРО (радиус от ПИЛ до 5 км)

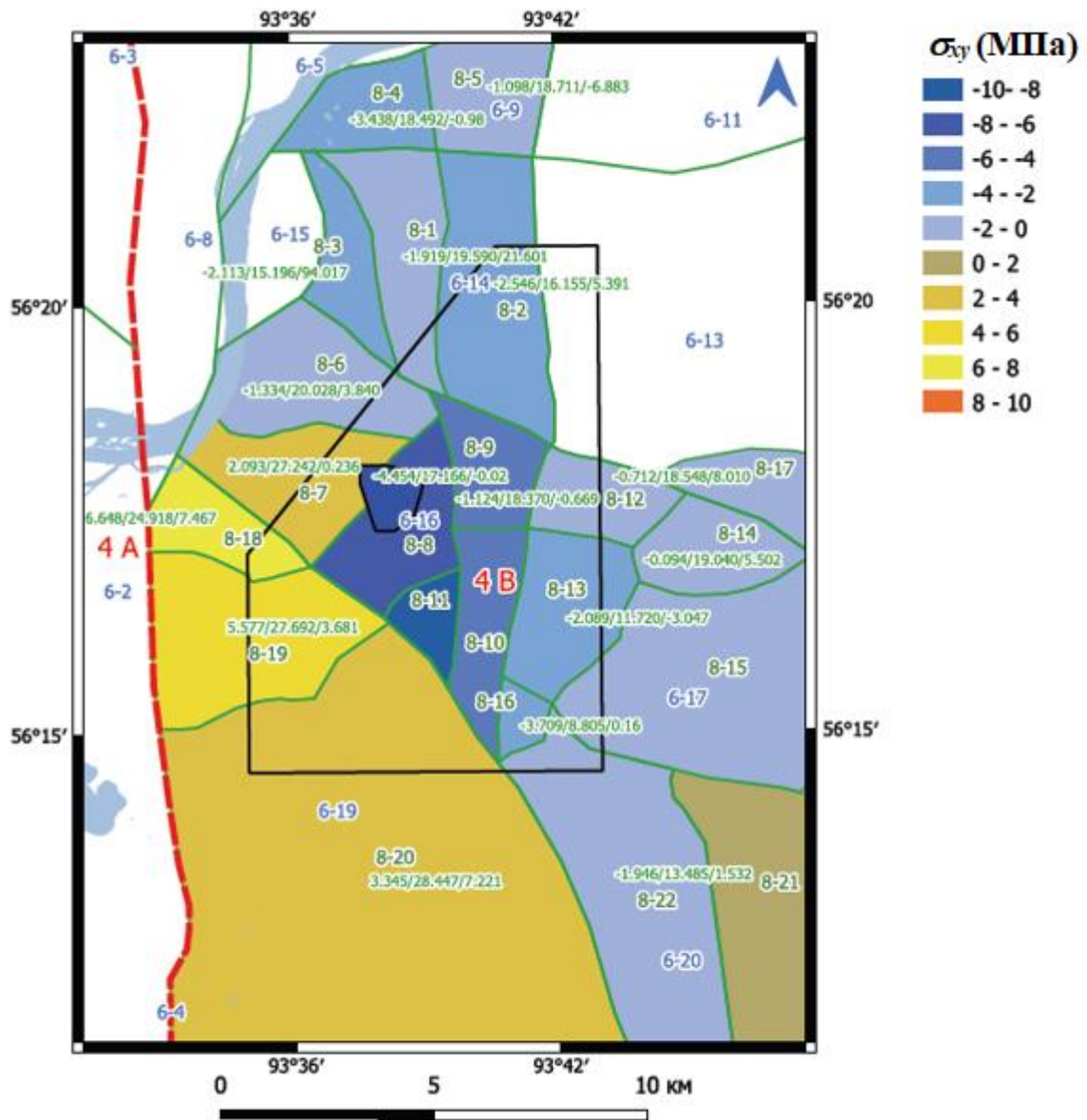


Рисунок 4.7 – Значения, касательных напряжений τ_{xy} в структурных блоках в ближней зоне ПГЗРО (радиус от ПИЛ до 5 км)

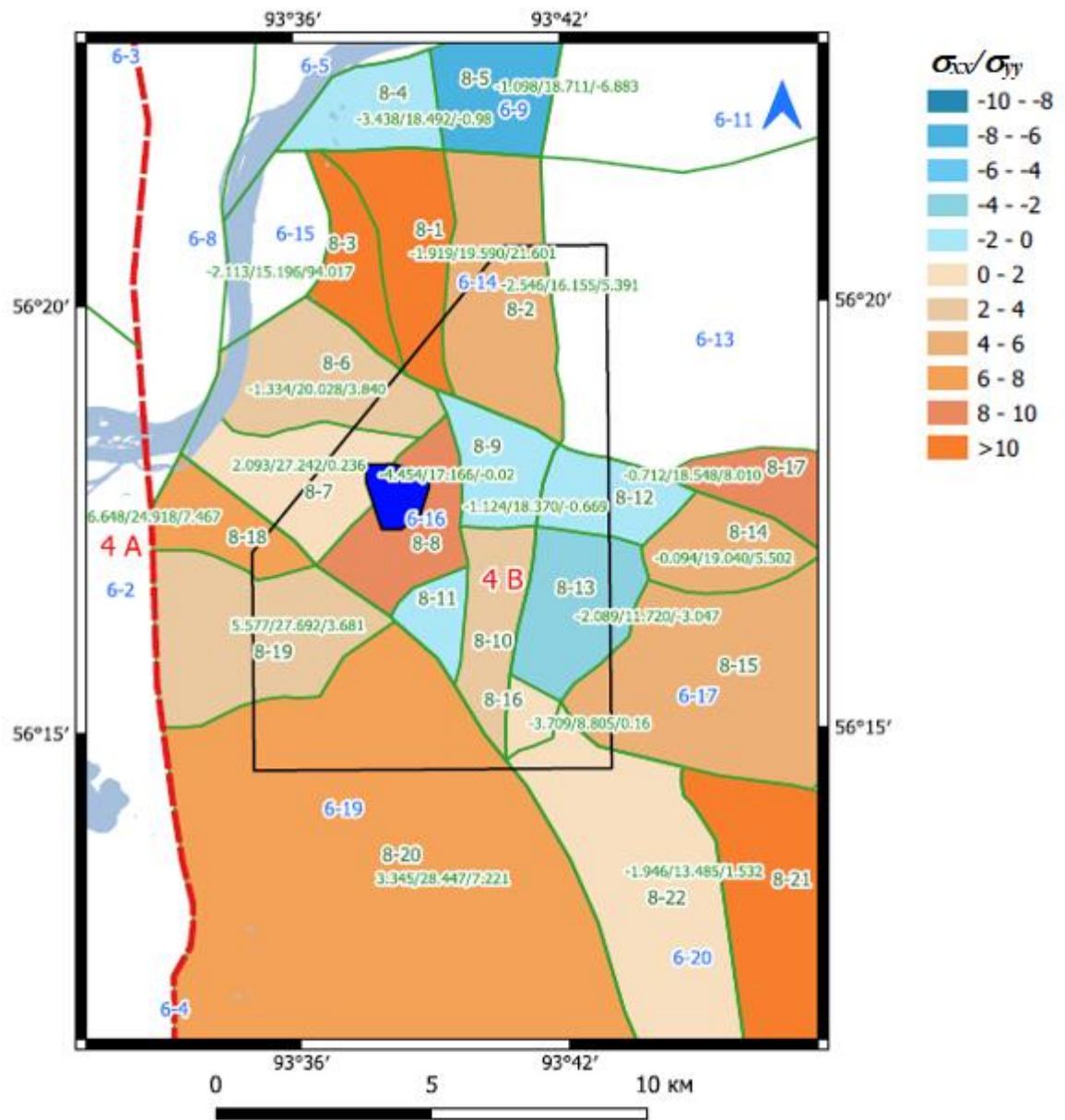


Рисунок 4.8 – Значения соотношения σ_{yy}/σ_{xx} в структурных блоках в ближней зоне ПГЗРО (радиус от ПИЛ до 5 км)

4.3 Геодинамическое районирование на основе изучения современной кинематики структурных блоков

Анализ велся путем расчета для каждого блока средних значений следующих параметров:

1. σ_{xx} , σ_{yy} – главные горизонтальные напряжения;
2. τ_{xy} – касательные напряжения;
3. σ_i – интенсивность напряжения;
4. γ – чистый сдвиг;
5. Δ - деформация дилатации;
6. σ_{yy}/σ_{xx} – отношение главных напряжений;
7. U_ϕ - потенциальная энергия;
8. Ro_U - потенциальная энергия формоизменения;

На рисунке 4.9 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению σ_{xx} . В пределах района исследования преобладают блоки с накопленными напряжениями растяжения по компоненте σ_{xx} . Со стороны Западно-Сибирской платформы большую площадь занимают блоки № 9, 21, 23, 35, накапливающие в себе напряжения сжатия до -5 кПа для блоков №21, 23 и до -20 кПа для блока №35. С северной части, блок №22, наоборот, испытывает напряжения растяжения с величинами до 15 кПа. Блок №2 ограничен двумя региональными тектоническими структурами и имеет тенденцию к накоплению напряжений сжатия до -1 кПа. Такие низкие, околонулевые значения можно объяснить пульсационной динамикой разломной структуры, что приводит к сбросу напряжений.

Блоки №7, 8, 17 к северу от Канско-Атаманоского разлома склонны накапливать напряжения растяжения с малыми величина, до 4 кПа. В то же время к югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», блоки №3-6, 15, 33-34 также накапливают напряжения

растяжения, но наоборот с аномально высокими значениями, более 30 кПа. В пределах участка происходит неравномерное накопление напряжений. Так, блоки №26-27, 32, 39-40 накапливают напряжения сжатия в пределах до 10 ÷ 20 кПа, а блоки №29-28 являются нейтральными зонами с напряжениями σ_{xx} , близкими к нулю. Блоки восточной части полигона №10-14, 16, 37, 42-43, приуроченные к группе разломов Тельского быка испытывают растяжение с значениями до 10 кПа.

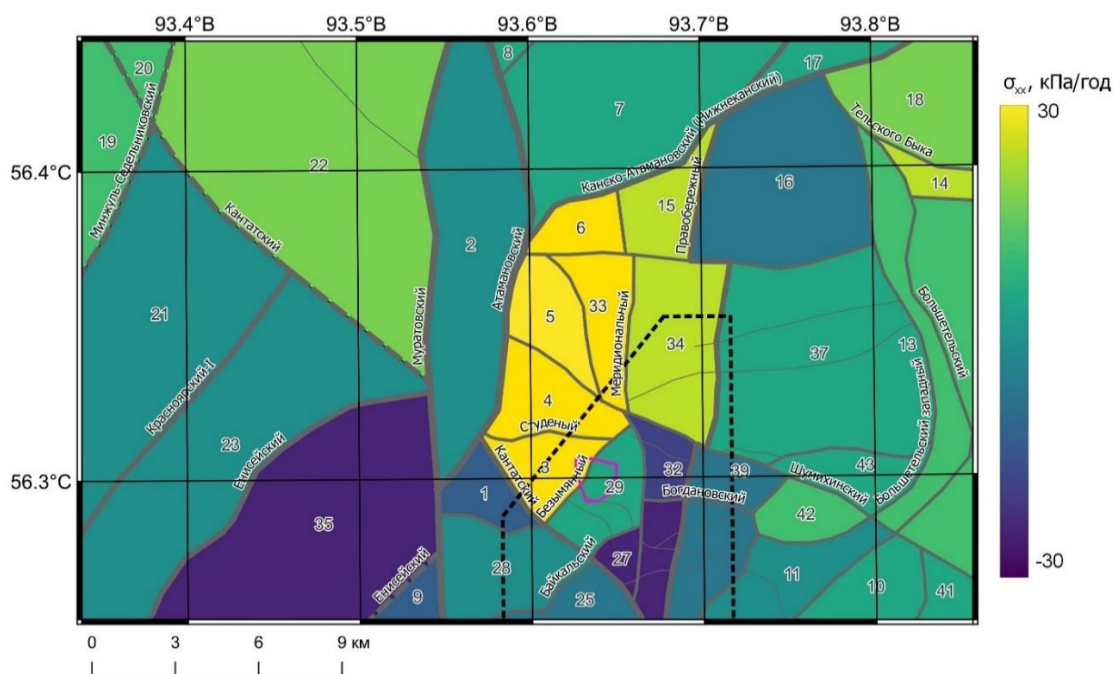


Рисунок 4.9 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению компоненты напряжений σ_{xx} по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На рисунке 4.10 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению компоненты напряжений σ_{yy} . В пределах района исследования преобладают блоки с накопленными напряжениями растяжения по компоненте σ_{yy} . Все блоки со стороны Западно-Сибирской платформы разделились на северные блоки №9, 23, 35, накапливающие в себе напряжения сжатия до -7 кПа для блоков №9, 23 и до -15 кПа для блока №35;

и на южные блоки №19, 20, 22, испытывающие напряжения растяжения с величинами от 15 кПа до 23 кПа. Блок №21, расположенный между зонами сжатия и растяжения, можно отнести к зоне со значениями (0,5 кПа).

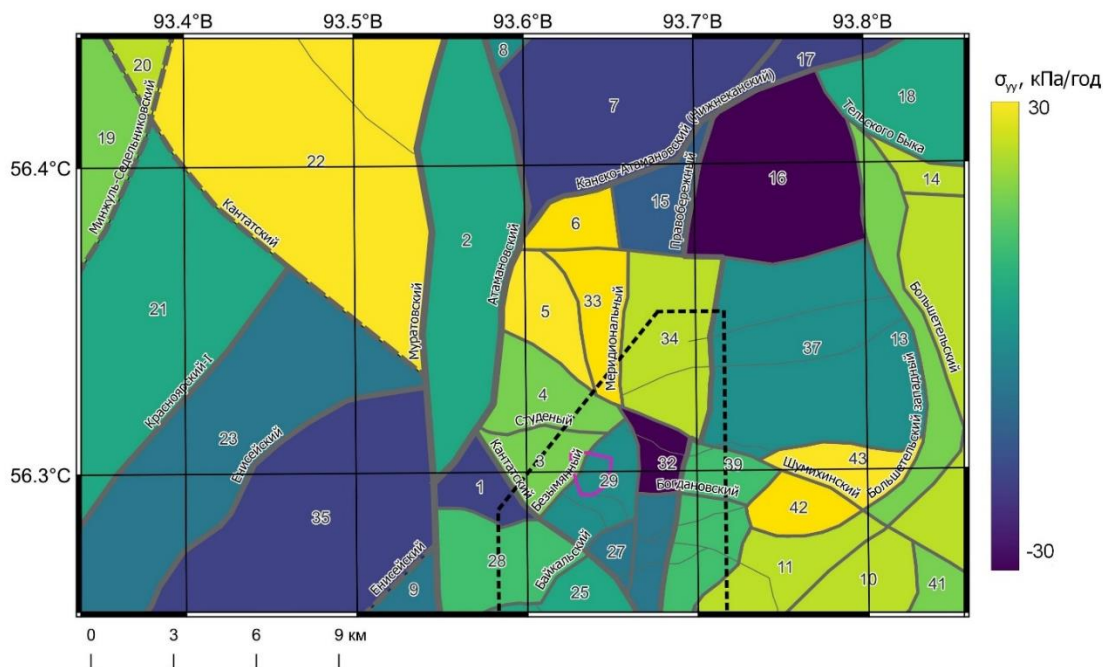


Рисунок 4.10 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению компоненты напряжений σ_{yy} по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

Блок №2 ограничен двумя региональными тектоническими структурами и имеет тенденцию к накоплению напряжений растяжения до 2 кПа. Блоки №7, 8, 15-17 к северу от участка «Енисейский» вблизи Канско-Атамановского разлома склонны накапливать напряжения сжатия, блок №8 с малой величиной до -4 кПа, блоки №7, 15-17 с большими величинами от -18 кПа до -30 кПа и ниже. К югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», блоки №3-6, 33-34 накапливают напряжения растяжения от 12 кПа до более 30 кПа. Но, чем южнее от Канско-Атамановского разлома, тем напряжения становятся ниже. Так в пределах участка в блоках №27, 29 накапливаются напряжения сжатия от -1 кПа до -9 кПа. Блоки восточной части

полигона №10-12, 42-43, приуроченные к группе разломов Тельского быка, испытывают большое растяжение со значениями от 18 кПа до 30 кПа.

На рисунке 4.11 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению компоненты напряжений τ_{xy} . В пределах района исследования преобладают блоки с накопленными напряжениями растяжения по компоненте τ_{xy} . Большинство блоков со стороны Западно-Сибирской платформы №9, 19-22 имеют накопленные напряжения растяжения от 1 кПа до 4 кПа. Оставшиеся блоки №23, 35 склонны к накапливанию в себе напряжения сжатия до -1 кПа. Блок №2 на сочленение двух тектонических структур имеет тенденцию к накоплению напряжений растяжения до 4 кПа. В пределах северной части участка около Канско-Атамановского разлома происходит неравномерное накопление напряжений. Блоки №6-8 склонны накапливать напряжения растяжения, блоки №7-8 величиной до 5 кПа, блок №6 до 9 кПа. В то же время блоки №15, 16, 17 склонны накапливать напряжения сжатия, с величинами, соответственно, -1 кПа, -1 кПа и -6 кПа.

Непосредственно южнее, по направлению на участок «Енисейский», так же происходит неравномерное накопление напряжений τ_{xy} преимущественно с растяжением. Блоки №1, 5, 27-29, 32, 24 имеют накопленные напряжения растяжения от 2 кПа до 10 кПа. Блоки №3, 4, 33 испытывают напряжение сжатия от -2 кПа до -13 кПа, причём блок №4 имеет аномальное значение -13 кПа. Блоки восточной части полигона №10-12, 42-43 приуроченные к группе разломов Тельского быка, имеют диапазон величин от -2 кПа до 2 кПа. Блоки №10, 11, 42 относятся к блокам, испытывающим растяжение, блоки №12, 43 – испытывающим сжатие.

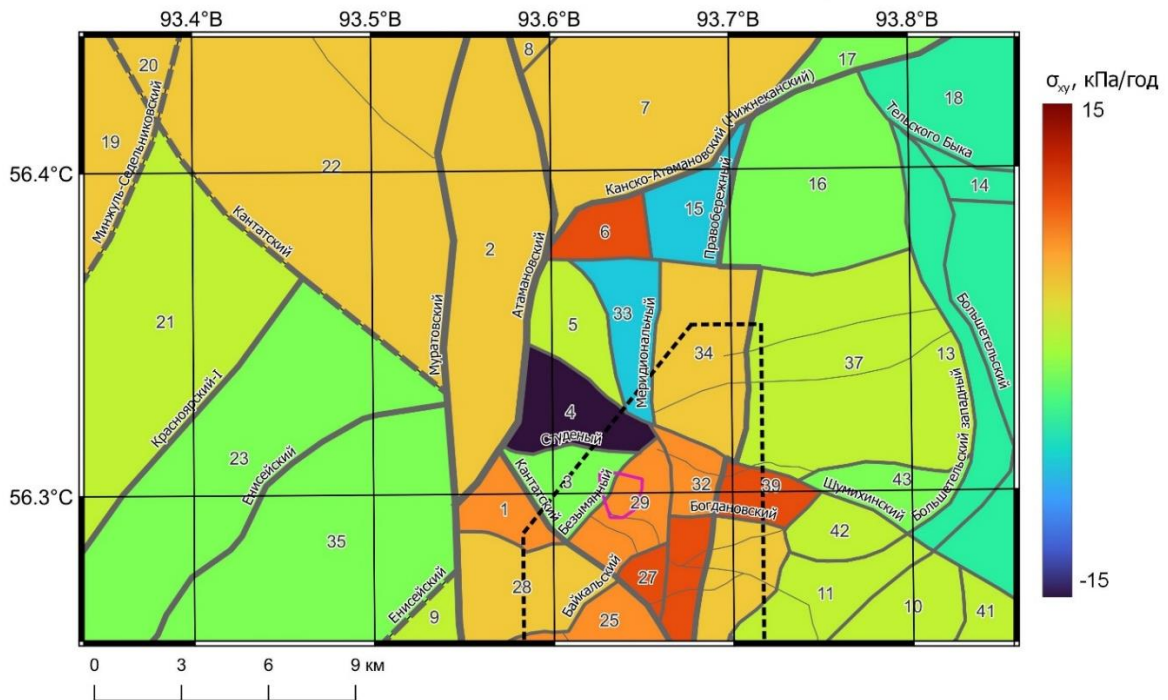


Рисунок 4.11 – Районирование структурно-тектонических блоков по скорости изменения компоненты напряжений τ_{xy} по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На рисунке 4.12 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению интенсивности напряжений σ_i . В пределах района исследования преобладают блоки с малой накопленной интенсивностью напряжений σ_i . Большинство блоков со стороны Западно-Сибирской платформы №19-23 имеют малую интенсивность напряжений от 19 кПа до 33 кПа. Оставшийся блок №9 относится к повышенной интенсивности напряжений и составляет 40 кПа. Блок №2 на сочленение двух тектонических структур имеет малую накопленную энергию 32 кПа.

В блоках №6-8, 15-17 распределяется интенсивность напряжений от малой до высокой (малая-повышенная-высокая), в блоке №8 21 кПа, в блоке №7 46 кПа, в блоках №6 и №15 71 кПа, что как раз этому соответствует. К югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», в блоках №1, 3-5, 27, 29, 33-34, наоборот, начинается уменьшаться

интенсивность напряжений в направлении с севера на юг (блок №33 имеет интенсивность напряжений 63 кПа, блок №4 48 кПа, блок №29 43 кПа, блок №27 34 кПа. Блоки восточной части полигона №10-14, 42-43, приуроченные к группе разломов Тельского быка, имеют ещё меньшее значение интенсивности напряжения в широтной ориентации на восток от 29 кПа до 24 кПа.

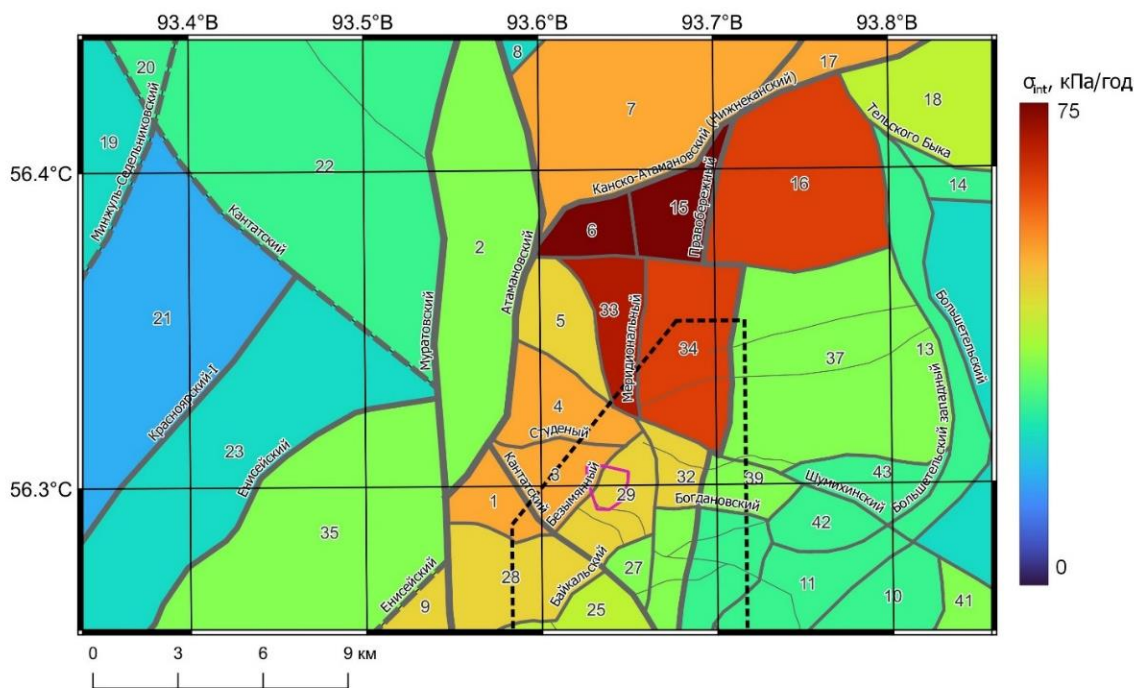


Рисунок 4.12 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению интенсивности напряжений σ_i по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На рисунке 4.13 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению отношений главных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} . В пределах района исследования преобладают блоки с положительным отношением компонентов σ_{yy}/σ_{xx} . Со стороны Западно-Сибирской платформы большую площадь занимают блоки №20, 22, 23, 35, имеют отрицательные отношения напряжений -5. С западной части, блоки №19, 21, наоборот, имеют положительные отношения напряжений до 1. Такие низкие, околонулевые отношения напряжений, указывают, на высокие значения

компоненты σ_{yy}/σ_{xx} . Блок №2 ограничен двумя региональными тектоническими структурами и имеет такую же тенденцию, как соседние блоки №22, 35, с отношением $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = -4$.

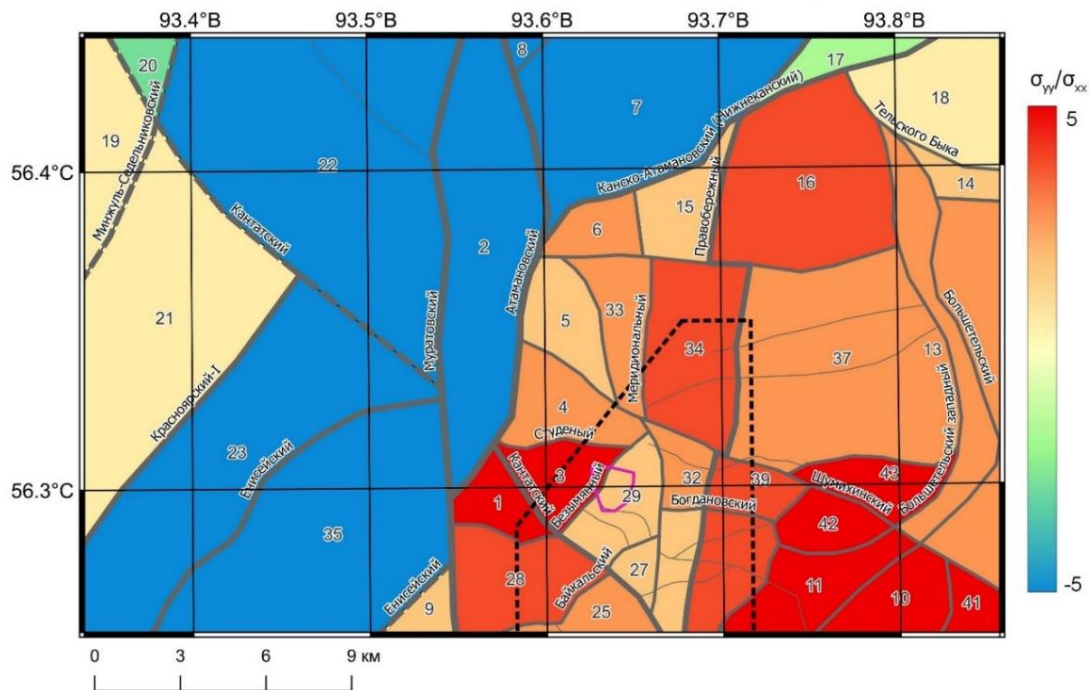


Рисунок 4.13 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению отношений главных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

Блоки №7, 8, 17 к северу от Канско-Атаманского разлома склонны к отрицательным отношениям напряжений от -2 до -5. В то же время к югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», блоки №5, 6, 15, 16, 33-34, наоборот, имеют положительные отношения напряжений со значениями до 4. В пределах участка имеется равномерное распределение отношений напряжений, а именно положительное. Блоки №1, 3 имеют положительные отношения напряжений 5. А блоки №4, 27, 29, 32 также имеют положительные отношения напряжений, но с меньшей величиной, чем у предыдущих - 3.

На рисунке 4.14 приведена схема районирования структурно-тектонических блоков по изменению потенциальной энергии формоизменения U_{ϕ} , которая зависит от площади (объема) и интенсивности напряжений, соответственно, чем больше объем структурно-тектонического блока, тем больше он может накопить потенциальной энергии формоизменения.

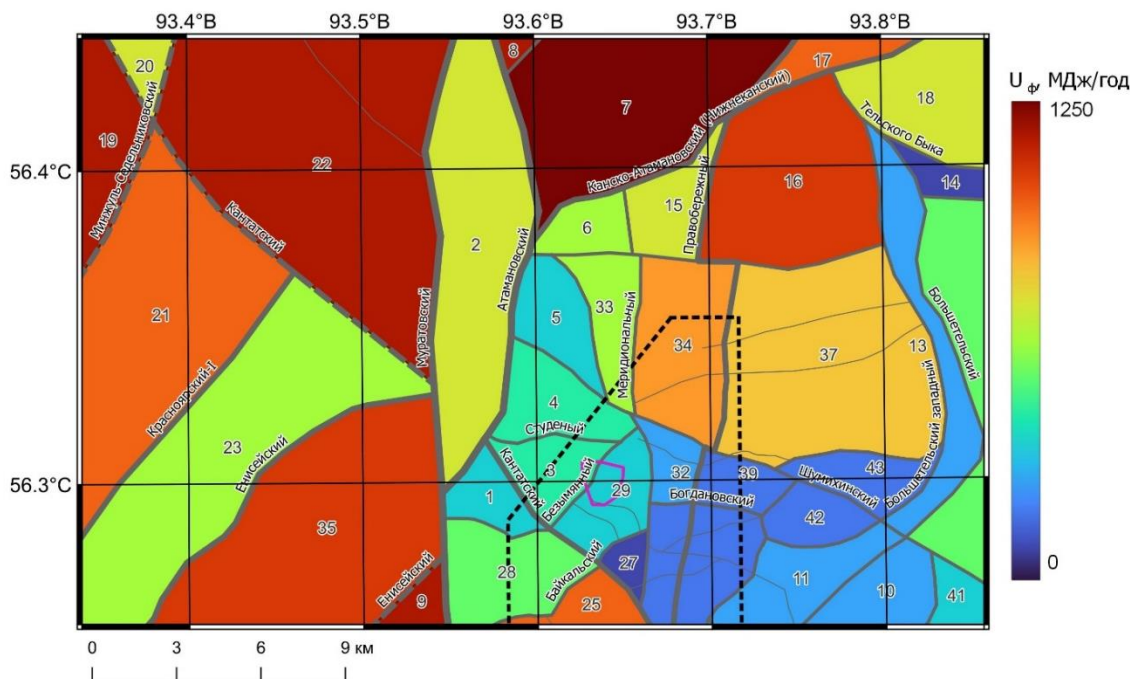


Рисунок 4.14 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению потенциальной энергии U_{ϕ} (см.4.2) по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

В пределах района исследования преобладают блоки с небольшой потенциальной энергией U_{ϕ} , так как имеется ветвистая система разломов, особенно около участка «Енисейский». Со стороны Западно-Сибирской платформы присутствуют большие по площади блоки (№9, 19, 21, 22, 35), которые имеют потенциальную энергию от 400 МДж до 800 МДж. Блок №2, ограниченный Муратовском и Атамановским разломами, имеет небольшие размеры и потенциальную энергию порядка 250 МДж. Блоки №7, 8, 17 к северу от Канско-Атамановского разлома склонны накапливать большую

потенциальную энергию, от 800 до 1250 МДж для блоков №7, 8 и до 550 МДж для блока №17. В то же время к югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», блоки №4-6,15, 33 имеют меньшие размеры, а значит накопление потенциальной энергии меньше, от 80 МДж до 180 МДж. В пределах участка такая же ситуация. Так, блоки №1, 3, 26-27, 29, 32, 39-40 имеют потенциальную энергию в пределах до 20-100 МДж.

На рисунке 4.15 приведена карта районирования структурно-тектонических блоков по плотности изменения потенциальной энергии формоизменения R_{oU} . В пределах района исследования преобладают блоки с небольшой плотностью потенциальной энергии около 6 Дж/м². Со стороны Западно-Сибирской платформы блоки №9, 19-23, 35 имеют небольшую плотностью потенциальной энергии от 2 Дж/м² до 6 Дж/м². Блок №2, ограниченный двумя региональными тектоническими структурами, имеет также малую плотность потенциальной энергии равную 4 Дж/м². Блоки №7, 17, к северу от Канско-Атамановского разлома склонны к повышенной плотности потенциальной энергии до 12 Дж/м². К югу от Канско-Атамановского разлома, в направлении на участок «Енисейский», в блоках №6, 15, 33 замечена самая большая плотность потенциальной энергии равная 27 Дж/м². Объясняется это тем, что большая потенциальная энергия U_f распределена на малом участке (блоке). Блоки восточной части полигона №10-14, 37, 39, 42-43, приуроченные к группе разломов Тельского быка, имеют плотность потенциальной энергии до 4 Дж/м².

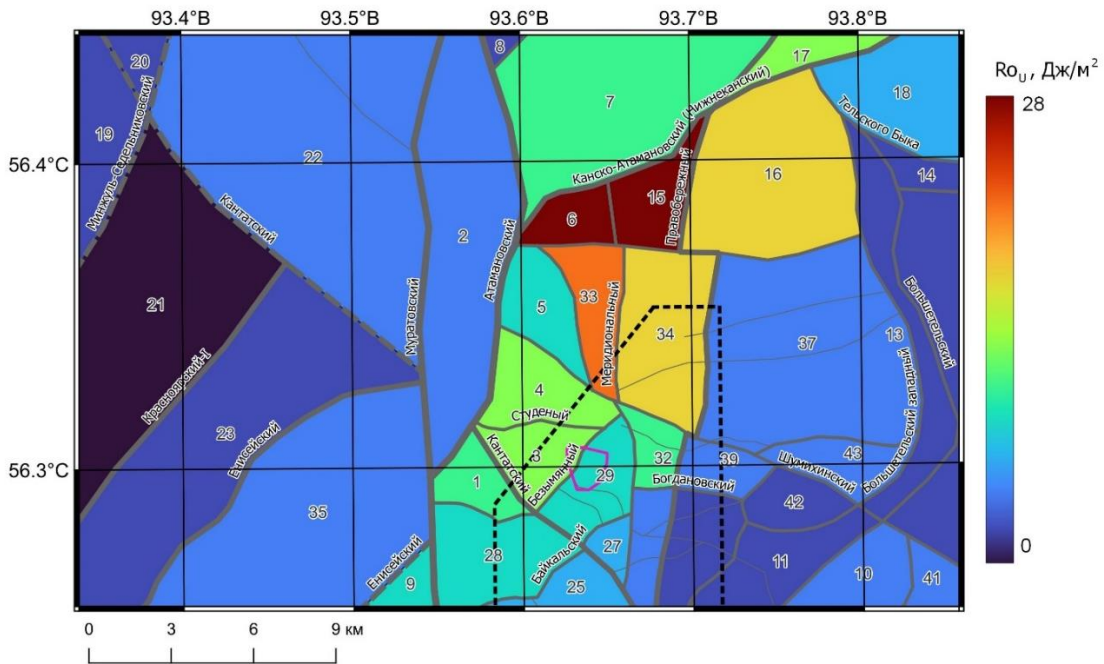


Рисунок 4.15 – Районирование структурно-тектонических блоков по плотности изменения потенциальной энергии формоизменения R_{OU} по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На рисунке 4.16 приведена карта районирования структурно-тектонических блоков изменению деформации дилатации Δ . В пределах района исследования преобладают блоки с накопленной отрицательной деформации дилатации. Со стороны Западно-Сибирской платформы занимают блоки №9, 19-23, 35. Северная часть, блоки №19-22 имеют положительную дилатацию: в блоке №21 до 21×10^{-9} , а в блоках №19, 20, 22 до 700×10^{-9} . С южной части, блоки №9, 23, 35, наоборот, испытывают отрицательную дилатацию: в блоке №9 -40×10^{-9} , а в блоках №23, 35 до -400×10^{-9} . Блок №2 ограничен двумя региональными тектоническими структурами и имеет тенденцию к накоплению положительной дилатации $60 \cdot 10^{-9}$. Такие низкие, околонулевые значения можно объяснить пульсационной динамикой разломной структуры, что приводит к сбросу дилатации. В пределах северной части участка около Канско-Атаманского разлома расположились блоки №7,

8, 15, 17 с отрицательной дилатацией от -100×10^{-9} до -650×10^{-9} . Южнее Канско-Атаманоского разлома блоки №5, 6, 33, 34, наоборот, имеют положительную дилатацию от 300×10^{-9} до 600×10^{-9} . Непосредственно на юге участка, по направлению на участок «Енисейский», происходит неравномерное накопление дилатации с малыми значениями, но разнознаковые. Так, блоки №1, 4, 27 имеют положительную дилатацию $10 \div 50 \times 10^{-9}$. А блоки №3, 29, 32 имеют отрицательную дилатацию до $-8 \div -32 \times 10^{-9}$. Что может характеризовать эту территорию как возможную зону разгрузки, с активными деформациями земной поверхности.

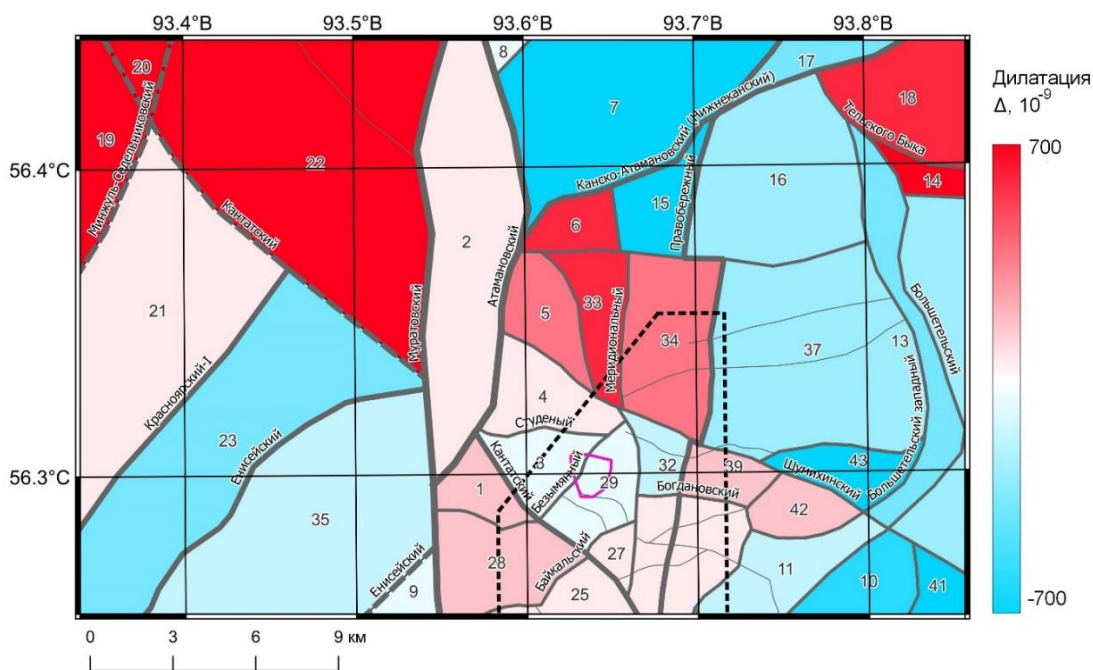


Рисунок 4.16 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению деформации дилатации Δ , по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На рисунке 4.17 приведена карта районирования структурно-тектонических блоков по изменению чистого сдвига γ . В пределах района исследования преобладают блоки с высокими значениями сдвига. Со стороны Западно-Сибирской платформы занимают блоки №9, 19-23, 35. Большинство

блоков, а именно блоки №19-23, имеют аномально высокие значения сдвига от 850×10^{-9} до 1250×10^{-9} . Оставшиеся два блока №9, 35 испытывают слабые сдвиговые деформации $250 \div 320 \times 10^{-9}$. Блок №2 является сочленением двух тектонических структур и имеет тенденцию к малым сдвиговым деформациям до 500×10^{-9} . Блоки №6-8, 15-17 к северу от участка «Енисейский» вблизи Канско-Атаманоского разлома склонны к аномальным значениям сдвига от 1100×10^{-9} до 1650×10^{-9} . В то же время к югу от Канско-Атаманоского разлома, в направлении на участок «Енисейский», блоки №4, 5, 33, 34 имеют уже значительно ниже фоновые значения сдвига $350 \div 700 \times 10^{-9}$, максимум. В пределах участка происходит неравномерное накопление напряжений. Так, блоки №1, 3, 25-29, 32 испытывают низкие сдвиговые деформации $80 \div 220 \times 10^{-9}$. Блоки восточной части полигона №10, 12-14, 16, 37, 42-43, приуроченные к группе разломов Тельского быка, испытывают высокие значения сдвиговых деформаций до 1700×10^{-9} .

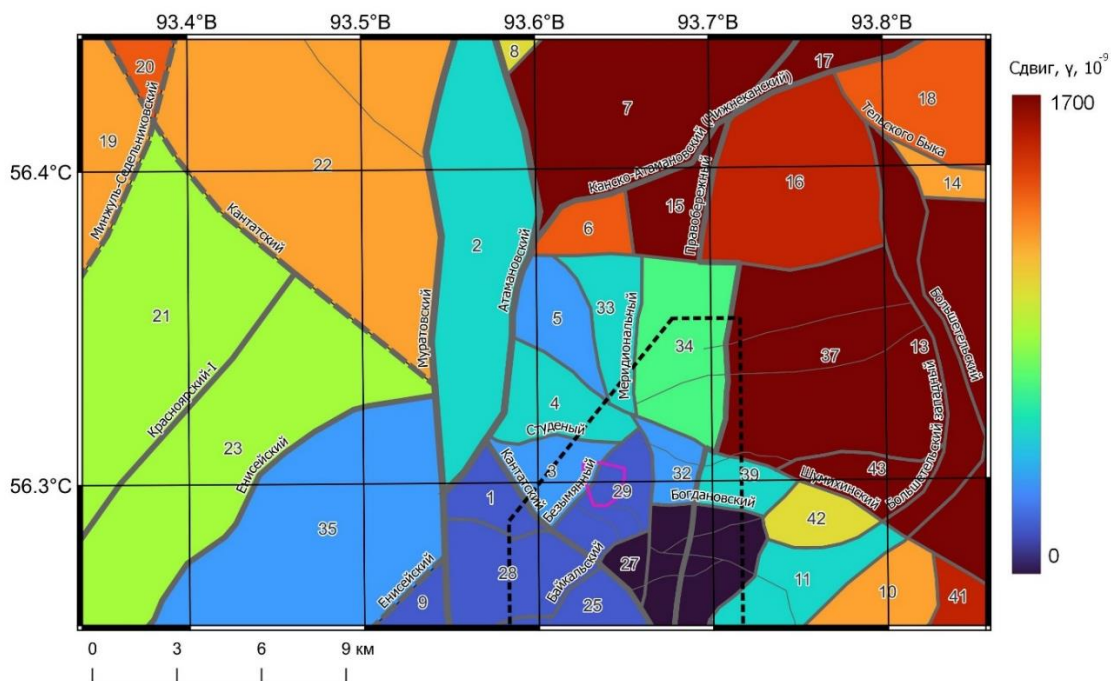


Рисунок 4.17 – Районирование структурно-тектонических блоков по изменению чистого сдвига γ , по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

На картах видно, что между границами блоковых структур, средним уровнем напряжений и, главное, инструментально установленными характеристиками современных движений земной коры имеется четкая взаимосвязь и корреляция. На настоящий момент она носит качественный характер, однако в дальнейшем будут проводиться работы по ее количественной оценке.

Прежде всего, контрастно выделяется Атамановский отрог Енисейского кряжа, где отмечаются растягивающие деформации земной поверхности, свидетельствующие о современных положительных вертикальных движениях. Зона контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы также четко выделяется по направленности современных движений и осей деформаций. Это хорошо видно и на картах дилатации и деформации полного сдвига [Manevich et al., 2021]. Зоны, которые отличаются по своим деформационным параметрам и направлениям осей сжатия и растяжения, ориентированы в субмеридиональном направлении и «чередуются» в увязке с границами блоков и простиранием основных разломов в районе исследования.

Вероятно, наиболее масштабными для геодинамики данного района являются движения по зоне контакта, сдвигового или надвигового характера и положительные вертикальные движения в районе Атамановского отрога Енисейского кряжа. Видно, что участок «Енисейский» по характеру напряженного состояния находится в относительно благоприятных условиях (среднее значение напряжений находится на уровне фоновых). Однако, по кинематическим характеристикам его положение сложнее. Во-первых, на западной и южной его границах располагаются зоны, где получены максимальные значения дилатации расширения (подъем земной поверхности) и максимальные сдвиговые деформации. Во-вторых, сам участок «Енисейский» и площадка ПГЗРО находятся в условиях действия сжимающих

сил, оси деформаций сжатия ориентированы с северо-востока на юго-запад. Но при этом юго-западная часть отличается по кинематическим характеристикам от остальной части и находится в зоне растяжения [Manevich et al., 2021]. И, в-третьих, возможно силовое воздействие на структурный блок, вмещающий ПГЗРО, как со стороны блоков, находящихся к восточным крыльям Муратовского и Атамановского разломов, так и со стороны боков, граничащих с Правобережным и Большетельским разломами.

В целом на картах, представленных на рисунках 4.9-4.17, видно, что имеется мозаичная картина распределения кинематических характеристик, по которым весьма затруднительно провести общую оценку устойчивости территории. Поэтому все карты были сведены в единую на основе расчета интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ в шкале [0, 1].

Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$, полученная по результатам моделирования, граничные условия которого заданы по данным ГНСС-наблюдений за 2012-2022 годы, показана на рисунке 4.18. На ней видно, что площадка ПИЛ располагается в относительно устойчивой зоне в пределах значений $S_F(w)$, 0,5-1.0. В тоже время разлом Безымянный делит площадку на две части сильно отличающиеся по устойчивости. Наименее устойчивым оказался район в пределах Канско-Атамановского и Правобережного разломов. В тоже время несколько неожиданным и противоречивым результатам геодинамического районирования, приведенных в предыдущем разделе, оказалось то, что вдоль зоны контакта двух крупных структур Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы по Атамановскому разлому получены результаты, свидетельствующие о устойчивом состоянии (зеленый цвет на рисунке 4.18). Однако этот результат требует дополнительных исследований для подтверждения долгосрочной стабильности.

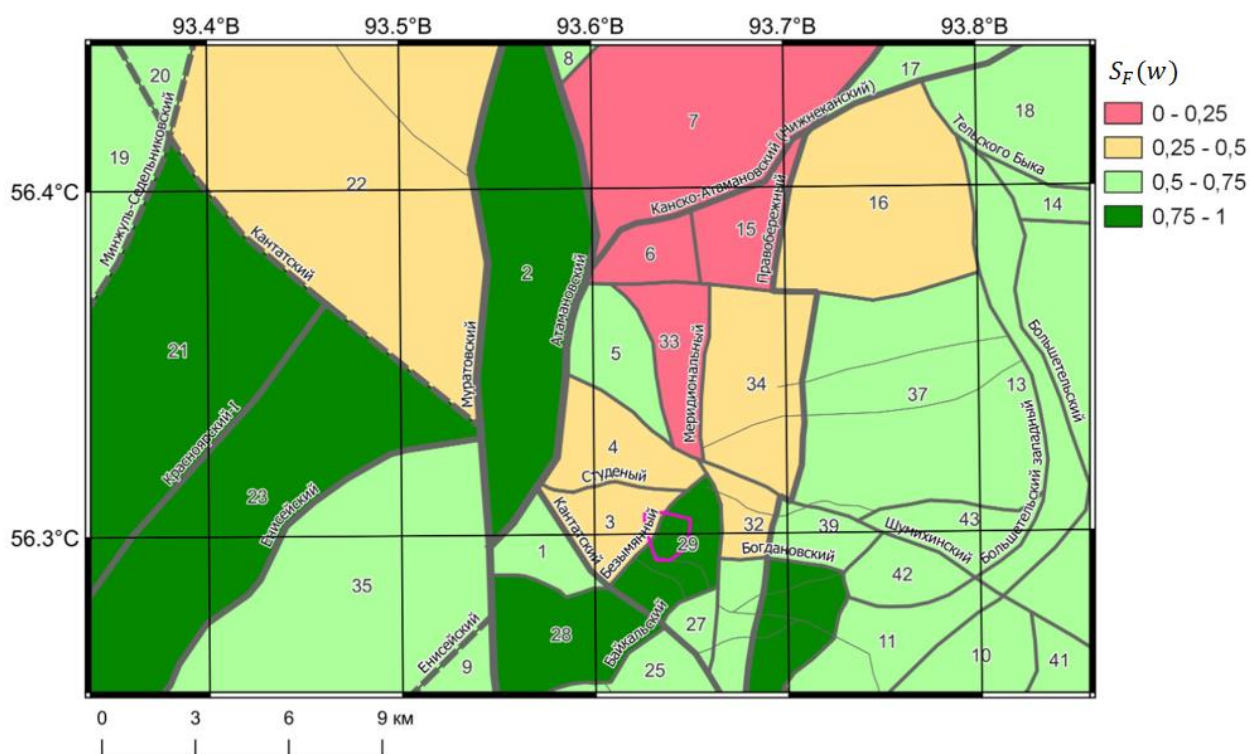


Рисунок 4.18 – Карта интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ по результатам кинематического геодинамического районирования с использованием данных ГНСС-наблюдений за 2012-2022 годы

4.4 Геодинамическое районирование на основе алгоритмов системного анализа

Представленные выше результаты геодинамического районирования с использованием «классического» и «кинематического» подходов были дополнены вычислением интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ по комплексу геолого-геофизических данных (описание методики см. в главе 2). Общая характеристика устойчивости вычислялась путем соединения четырех групп мер, описывающих: а) особенности цифровой карты рельефа; б) параметры разломов; в) напряжено-деформированное состояние; г) геофизические поля. Ее расчет проводился по формуле:

$$S_F(w) = \frac{S_{Re}(w) + S_{\rho}(w) + S_{SSS}(w) + S_{Mag}(w)}{4}. \quad (4.4)$$

Пространственное распределение интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ приведено на рисунке 4.19.

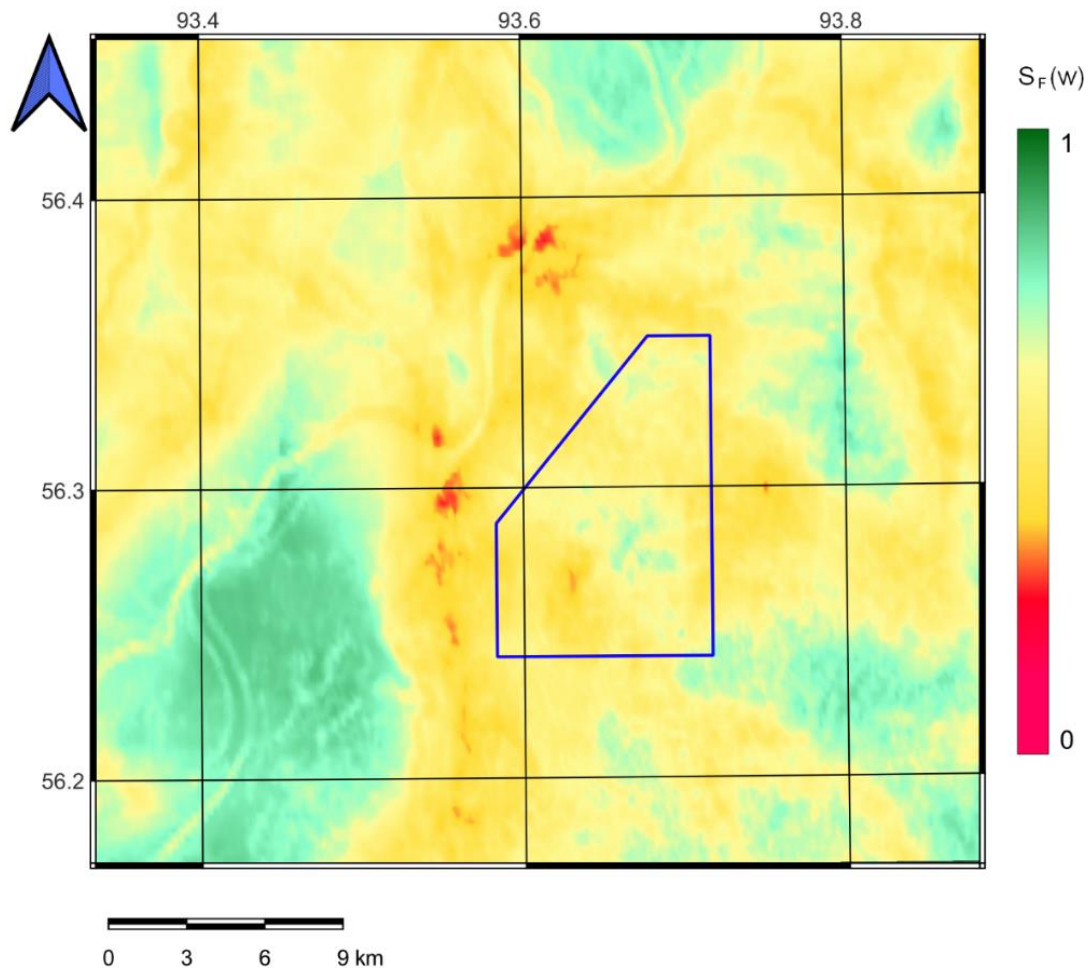


Рисунок 4.19 – Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Шкала: безопасные ($S_F(w) \geq 0.65$), нейтральные или переходные ($0.45 < S_F(w) < 0.65$), опасные ($S_F(w) \leq 0.45$)

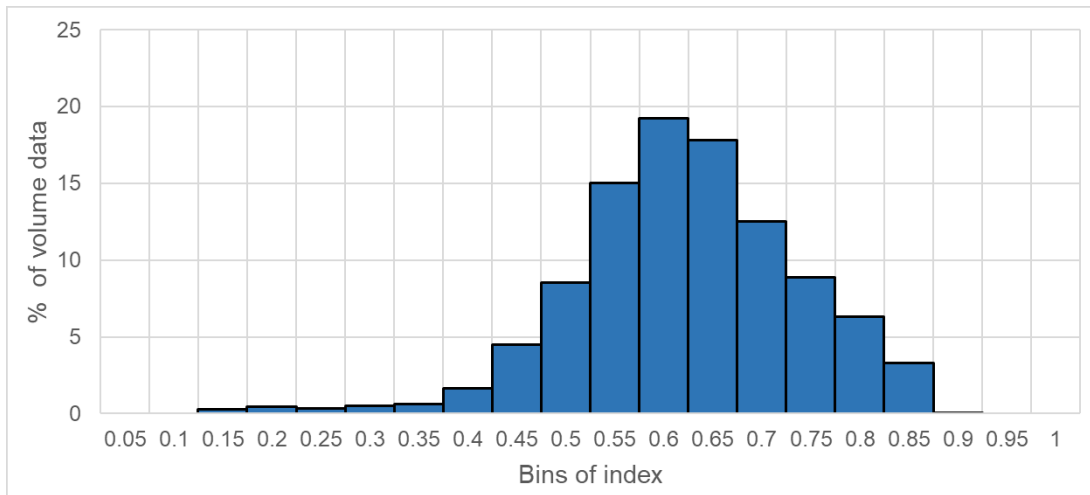


Рисунок 4.20 – Гистограмма интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$

Для этого распределения была построена гистограмма распределения по площади $S_F(w)$ (рисунок 4.20). И, на ее основе, была скорректирована шкала районирования территории по степени устойчивости относительно среднего значения. Шкала разделена на 3 части: условно безопасные ($S_F \geq 0,65$), нейтральные ($0,45 < S_F < 0,65$), опасные ($S_F \leq 0,45$) [Agayan et al., 2022]. Зеленый цвет на рисунке 4.19 соответствует наиболее устойчивому состоянию, красный – наименее устойчивому, а желтый – переходным зонам. Здесь следует подчеркнуть, что это относительная характеристика, «наименее устойчивая» зона не является синонимом термина «опасная зона».

На карте участки соответствующие наименее устойчивому состоянию с $S_F(w) \leq 0,45$ занимают площадь $\sim 21 \text{ км}^2$ и преимущественно относятся к областям сочленения тектонических структур и резкого изменения градиента высот, которые выражаются в аномальных значениях всех мер активности динамических показателей μD_f . По отношению ко всей площади исследований, доля наименее устойчивых участков составляет около 9.1 %. Наибольшая площадь наименее устойчивых участков располагается в зоне контакта Сибирской плиты и Западно-Сибирской платформы и в зонах крупных

разломов (Правобережный, Большетельский), которые считаются активными. Это вполне закономерно. Территория участка «Енисейский» располагается в интервале $S_F(w) = 0.57 - 0.62$, который является переходной, близким к безопасным.

Узлы относительной геодинамической устойчивости $S_F(w) \geq 0.65$ в основном соответствуют равнинным участкам рельефа и центрам основных структурно-тектонических блоков, равноудаленных от тектонических нарушений. Относительно устойчивые участки занимают площадь около 34.2%.

Участки переходных зон $S_F(w) \in (0.45; 0.65)$ распределены неравномерно. Основная площадь приурочена к областям взаимодействия местных тектонических структур, областям умеренной изменчивости рельефа, напряженному состоянию в пределах немного выше фоновых значений. Участки переходных зон занимают наибольшую площадь района исследования в размере приблизительно 56.7%.

4.6 Выводы

1. Для проведения геодинамического районирования построены схемы блоковых структур для трех иерархических уровней: ближнего района ПИЛ (радиус до 15 км), дальней зоны ПИЛ (радиус до 5 км) и ближней зоны ПИЛ (радиус до 1,5 км). Выделены тектонические структуры 4-9 рангов и ограниченные ими структурные блоки, согласно рекомендациям нормативного документа, в области обращения с радиоактивными отходами РБ-019-18.

2. Для системы тектонических блоков двух первых иерархических уровней выполнена оценка напряженно-деформированного состояния и вычислены средние значения напряжений для каждого структурного блока. Граничные условия задавались по геологическим данным. Построены карты

распределения интенсивности напряжений, главных горизонтальных напряжений, их соотношений и касательных напряжений, по ним выполнен анализ устойчивости структурных блоков.

3. Проведено геодинамическое районирование по 13 параметрам, в том числе по полученным на основе измерений современных движений земной коры средствами ГНСС и цифровой карты рельефа. Разноформатные характеристики приведены к единой шкале [0, 1], блоки ранжированы по степени устойчивости в интервалах 0-0,25, 0,25-0,75, 0,75-1 этой шкалы.

4. Построена интегральная карта геодинамической безопасности района. Участок «Енисейский» по характеру напряженного состояния находится в относительно благоприятных условиях (среднее значение напряжений находится на уровне фоновых). Однако, по кинематическим характеристикам его положение сложнее, т.к. на западной и южной его границах находятся зоны, где получены максимальные значения деформаций.

5. Сравнение трех вариантов геодинамического районирования территории по условно «классической», «кинематической» и «системно-аналитической» методикам показало достаточно близкое совпадение. При этом результаты применения разработанной методики более близки к геологическим данным.

6. Наиболее неустойчивые участки выявлены с использованием разработанной методики для зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы в центральной его части. На востоке района исследования относительно неустойчивый участок находится в зоне влияния Правобережного и Тельского разломов. Это не противоречит общей картине тектонической эволюции данной территории и является подтверждением эффективности разработанной методики для решения задач оценки устойчивости структурных тектонических блоков земной коры, вмещающих

подземные объекты с сверхдлинными сроками эксплуатации.

По результатам выполненных исследований сформулировано **третье научное положение.**

Ранжирование участка «Енисейский» и прилегающей территории на основе интегральной меры геодинамической безопасности позволило выполнить оценку долговременной устойчивости пункта размещения глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, на основе выполненных автором исследований решена актуальная научная задача разработки методики геодинамического районирования по степени геодинамической устойчивости на основе системного анализа геолого-геофизических данных, имеющая важное значение для обеспечения геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в гранитогнейсовых породах участка «Енисейский» Нижнеканского массива.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ опыта исследований по оценке геодинамической устойчивости геологической среды, в том числе в районах длительного хранения и захоронения РАО в геологических формациях. В условиях недостаточности и неопределённости исходной информации о геодинамическом режиме территории наибольшая эффективность пространственного анализа координатно-привязанных геолого-геофизических данных достигается путем использования методов дискретного математического анализа;

2. Установлено, что устойчивость структурных тектонических блоков земной коры в районе захоронения высокоактивных РАО связана с пространственными особенностями и закономерностями распределения геолого-геофизических параметров, отражающих тектоническую эволюцию земной коры и являющихся прогностическими признаками ее длительной геодинамической стабильности.

3. Разработана классификация горно-геологических факторов, обуславливающих устойчивость структурных тектонических блоков земной коры на длительные периоды времени, в течении которых сохраняется радиобиологическая опасность РАО, и на ее основе создана ГИС-ориентированная база геолого-геофизических данных по району исследования;

4. Разработана методика геодинамического районирования с использованием новых алгоритмов системного анализа, позволяющая по классифицированным и нормализованным геолого-геофизическим признакам выполнять оценку устойчивости структурных тектонических блоков земной коры в районах захоронения высокоактивных РАО. Эффективность использования алгоритмов нормализации данных при анализе функций изменчивости состояния геологической среды доказана методом корреляционного анализа;

5. Интегральная мера геодинамической устойчивости участка «Енисейский», объединяющая меры активности динамических показателей, рассчитанных с использованием разработанных алгоритмов ДМА, показал, что площадка строительства ПИЛ находится в геодинамических условиях, подтверждающих геоэкологическую безопасность захоронения высокоактивных РАО.

6. Результаты исследования позволили получить новые фундаментальные знания об устойчивости геологической среды, необходимые для оценки возможности геологического захоронения РАО на участке «Енисейский». Выявлены важные особенности распределения параметров, характеризующих устойчивость геологической среды. Проведено геодинамическое районирование по 10 параметрам. Построена интегральная карта геодинамической безопасности района. Участок «Енисейский» по

характеру напряженного состояния находится в относительно благоприятных условиях (среднее значение напряжений находится на уровне фоновых).

7. Разработанная методика прошла апробацию и внедрена в проектные разработки организаций Госкорпорации «Росатом» при планировании геомеханических и геодинамических исследований в подземной исследовательской лаборатории (Красноярский край) на 2022 – 2026 гг. Результаты работы использованы в рамках выполнения документа «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждена Генеральным директором ГК «Росатом» А.Е. Лихачевым 28.03.2018 г.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев В.К., Батугин А.С., Батугина И.М., Гаранькин Н.В., Калинин А.М., Петухов И.М., Челпан П.И. Геодинамическое районирование территории Московской области (.) «СМТ», 2003. 126 с.
2. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. 592 с.
3. Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Мысль, 1988. 288 с.
4. Арманд А.Д. Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий // Устойчивость геосистем. М.: Недра, 1983. С. 14-31.
5. Батугин А.С. К оценке геодинамического риска // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 9. С. 44-52/
6. Батугин А.С. Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности // Методика и техника ведения маркшейдерских и геологических работ на шахтах и разрезах. ВНИМИ, С-Пб., 1997. С. 206-213.
7. Батугина И.М. Геодинамическое районирование месторождений при строительстве и эксплуатации рудников /- М.: Недра. 1988. – 166 с.
8. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
9. Бондарик Г.К. Системный подход при инженерно-геологических прогнозах. Доклад 27-го Международного геол. конгресса. Инж. – геол. секц. С-17, т.17. Москва. Наука. 1984.
10. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 1. С.98–105.

11. Борняков С. А. Динамические критерии самоорганизации систем разрывов в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420, № 6, июнь. С. 822-824.
12. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Мн.: Дизайн ПРО, 1998. 336 с.
13. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Связь линеаментов космических снимков и эпицентров землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 219–230.
14. В.М. Колямкин, Н.Ф. Сержантов и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). М.: ВСЕГЕИ, 2015.
15. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Лосев И.В., Татаринов В.Н. Методика оценки геодинамической опасности структурного блока, вмещающего объект подземной изоляции РАО // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021а. № 12. С. 5-18. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_5
16. Гвишиани А.Д., Белов С..В, Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р. Методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. № 2. 2008. С.3-14.
17. Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А., Татаринов В.Н., Маневич А.И. Системный анализ в горных науках и уменьшении природного ущерба // Материалы международной конференции, посвященной памяти академика А.В. Кряжимского «Системный анализ: моделирование и управление». Математический институт им. В.А. Стеклова РАН. Москва. 2018. С. 43 – 45.
18. Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика

- Земли. №1. С. 42-60. 2019а. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>.
19. Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н. Системная оценка факторов, определяющих устойчивость геологической среды при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов // Вестник НЯЦ РК. Выпуск 2 (78). Июнь 2019. С. 44-50
 20. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Исследование систем действительных функций на двумерных сетках с использованием нечетких множеств // Чебышевский сборник. 2019б. Т. 20. Вып. 1. С. 94–111. DOI: [10.22405/2226-8383-2019-20-1-94-111](https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1-94-111).
 21. Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Агаян С.М., Лосев И.В., Маневич А.И. ГИС-ориентированная база данных для системного анализа и прогноза геодинамической устойчивости Нижне-Канского массива // Исследование Земли из космоса. 2021б. № 1.
 22. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.
 23. Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов. М., Недра. 1981.
 24. Дашкевич З.В. К проблеме устойчивости геосистем // Известия ВГО. 1984. Т116. Вып. 3. С. 211-218.
 25. Дзедобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Агаян С.М., Татаринов В.Н., Барыкина Ю.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: Алтай-Саяны-Прибайкалье. M≥6.0 // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47. DOI: [10.31857/S0002-33372019433-47](https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47).
 26. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности

- сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. - 2017. - №1. - С.33-42.
27. Зубков А.В. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры // Литосфера. 2016. № 5. С. 146–151.
28. Ильин А.В. О геоморфологическом аспекте захоронения радиоактивных отходов на дне океана. Ст. 2. Основы новой технологии захоронения РАО // Геоморфология. 2008. № 1. С. 3-15.
29. Казикаев Д.М., Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Иофис М.А. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2016. 490 с.
30. Квейд Э. Анализ сложных систем / Под ред. И. И. Андреева, И. М. Верещагина. – М.: Советское радио, 1969. 520 с.
31. Королев В.А., Николаева С.К. Геоэкологическая оценка зон влияния инженерных сооружений на геологическую среду // Геоэкология. 1994. № 5. С. 25-37.
32. Косыгин Ю.А., Соловьев В.А. Статические, динамические и ретроспективные системы в геологических исследованиях // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1969. – № 6. – С. 9–17.
33. Кофф Г.Л., Кожевина Л.С., Жигалин А.Д. Общие принципы оценки устойчивости городской экосистемы // Геоэкология. Вып.4.1997. С.54-63.
34. Кочкин Б.Т. Проблемы управления риском при выборе места для захоронения высокорadioактивных отходов // Геоэкология. 1998. № 5. С. 35-45.
35. Кочкин Б.Т., Петров В.А. Долгосрочный прогноз сейсмической опасности в связи с проблемой изоляции радиоактивных отходов. Геология и геофизика, 2015, т.56, №7, с.1369-1390.

36. Лобацкая Р.М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т.46. №2. С. 141-151.
37. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М., Недра, 1987. 129 с.
38. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л., Недра. 1977. 280 с.
39. Лосев И.В. Геодинамическое районирование на основе системного анализа геолого-геофизических данных для обеспечения геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. №1 (специальный выпуск №2). с. 17-28. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_2_17.
40. Лосев И.В., Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Маневич А.И. База данных по геодинамике Нижне-Канского массива (Geodynamic DataBase). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622380 от 23 ноября 2020 г.
41. Лосев И.В., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Акматов Д.Ж., Татаринов В.Н. База данных по геодинамике Нижне-Канского массива v.2.0 (Geodynamics DataBase НКМ v.2.0). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625328 от 19.11.2024 г.
42. Лосев И.В., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Татаринов В.Н. «База данных напряженно-деформированного состояния Нижне-Канского массива». Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2022622919 от 24 ноября 2022 г.
43. Лукина Н.В., Трифонов В.Г., Макаров В.И. Корреляция тектонических событий новейшего этапа как метод изучения неотектонических процессов / Современная геодинамика и глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1990.

44. Макаров В.И., Щукин Ю.К. Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–109.
45. Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Лосев И.В. «Программа для моделирования ориентаций действующих напряжений на основе структурных данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024688017 от 25.11.2024 г.
46. Маневич А.И., Лосев И.В. «Программа расчета распределения скоростей деформаций земной коры SEtools 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617368 от 06 июня 2019 г.
47. Маневич А.И., Лосев И.В., Белов И.О., Татаринев В.Н. «Программа нормирования шкал значений инженерно-геологических параметров GP 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662379 от 11.09.2018.
48. Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В. «Программа для расчета компонент деформаций по данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665069 от 17.09.2021.
49. Милюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Шевченко В.И., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры Осетинской части Большого Кавказа по GPS-измерениям // Физика Земли, 2015, № 4, с. 68-80. DOI:10.7868/S0002333715040079.
50. Морозов В.Н., Батугин А.С., Колесников И.Ю., Татаринев В.Н., Каган А.И., Татаринова Т.А. Прогнозирование геодинамической устойчивости геологической среды при подземной изоляции РАО. ГИАБ. №7. 2016. С. 251-262.

51. Морозов В.Н., Белов С.В., Колесников М.Ю., Татаринцов В.Н., Татаринцова Т.А. Возможности геодинамического районирования при выборе мест подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов на примере Нижнеканского массива // Инженерная экология. №5. 2008. С. 17-25.
52. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринцов В.Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008а. №3.
53. Морозов В.Н., Татаринцов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // Геоэкология. 1996. № 6. С. 109-120.
54. Морозов В.Н., Татаринцов В.Н., Камнев Е.Н. Геодинамические аспекты захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (Нижне-Канский массив) // Горный журнал. №3. 2021. с. 108-112. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05
55. Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край). Радиоактивные отходы № 4 (9), 2019. С.46-62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
56. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М., Наука, 2004. 780 с.
57. Нестеренко М.Ю. Геодинамический мониторинг территории Байтуганского месторождения нефти и газа. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2021. №3. 13с. DOI: 10.24411/2304-9081-2021-13005
58. Нестеренко М.Ю., Капустина О.А., Антонова О.В. Методика уточнения тектонических разломов путем интеллектуального анализа сейсмических данных на примере районов добычи углеводородов Южного Предуралья // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2023. Т. 67. №5. С. 98–106. DOI:10.30533/GiA-2023-021.

59. Николаев В.А. Методика геодинамического районирования на основе факторного и кластерного анализа (На примере Восточно-Европейской платформы, Паннонского бассейна и Северной Евразии в целом). Дис. ... д-ра геол.-минерал. Наук. М., 2005. 318 с.
60. Николаев Н.И., 1988. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М., Недра, 490 с.
61. Ноулер Л., Хауэлл Д., Голд Б. и др. Статистические методы контроля качества продукции. Пер. с англ. 1989. М. Изд-во стандартизации.
62. НП-016-05 «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ)» от 2 декабря 2005 г.
63. НП-032-19 «Площадка атомной станции. Требования безопасности» от 9 июля 2019 г.
64. НП-050-03 «Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. основные критерии и требования по обеспечению безопасности» от 31 декабря 2003 г.
65. НП-064-05 «Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии» от 20 декабря 2005 г.
66. НП-100-17 «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» от 23 июня 2017 г.
67. Овчинникова Т. И., Серянина А. В., Соколова А. А., Тертычная С. В. Оценка геоэкологических рисков как элемент управления экологической безопасностью на металлургических предприятиях // Черные металлы. – 2024. – № 8. – С. 71-76. – DOI 10.17580/chm.2024.08.08.
68. Олова А.В. Блоковая структура и рельеф. М.: Недра, 1975. 322 с.

69. Петров О. В., Мовчан И. Б. Диссипативное структурирование земной коры и мантии как отражение волновых процессов // Регион. геология и металлогения. 2003. № 17. С. 53–65.
70. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. - М.: Недра, 1983.
71. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. М.: М.: Изд-во Московского гос. горного университета, 1999. 287 с.
72. Петухов И.М., Егоров П.В., Винокур Б.Ш. Предотвращение горных ударов на рудниках. М.: Недра. 1989.
73. Петухова И.М., Батугиной И.М. Геодинамическое районирование недр. Методические указания / - Л., ВНИМИ, 1990. – 129 с.
74. Потылицына Е.Н., Липинский Л.В., Сугак Е.В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач // Современные проблемы науки и образования. - 2013. - № 4.
75. Пузаченко Ю.Г. Инвариантность геосистем и их компонентов. Устойчивость геосистем. М.: Недра, 1983. С.32-41.
76. Рагозин А.Л. Теория и практика оценки геологических рисков: автореф. дис. ... докт. геол.-мин.: 04.00.07. М.: ПНИИИС, 1997. 60 с.
77. Рац М.Ф., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватости горных пород. М., Недра, 1970. 242 с.
78. РБ-019-01 «Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных» от 28 декабря 2001 г.
79. РБ-019-18 «Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях» от 2 марта 2018 г.

80. РБ-142-18 «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно и радиационно опасных объектов» от 27 ноября 2018 г.
81. Руководство по геодинамическому районированию шахтных полей. С.-П. ВНИМИ. 2012. 116с.
82. Садовский М. А. О значении и смысле дискретности в геофизике // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 3–14.
83. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
84. Семенов С.С. Основные положения системного анализа при оценке технического уровня сложных систем с применением экспертного метода. Надежность и качество сложных систем. Вып. 4. 2013. С.45-53.
85. Сергеев Е.М. Проблемы инженерной геологии в связи с охраной и рациональным использованием геологической среды // М., Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1987. № 5. С. 77-86.
86. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Изв. вузов. «Геол. и разв.», 1991. № 10. С. 3–22.
87. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. К.: МАУП, 2003. 368 с.
88. Татаринов В.Н. Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в России. Бюллетень №1 (85). 2006. С.46-51.
89. Татаринов В.Н. Геологическая среда и проблемы геоэкологической безопасности объектов ядерно-топливного цикла // Environment, Technology, Resources. Proceeding of the 3rd International Conference. Rezekne. 2001. С.197-203.

90. Татаринov В.Н., Кафтан В. И., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Забродин С.М. Подземная исследовательская лаборатория: результаты 12-летних наблюдений за современными движениями земной коры средствами ГНСС // Радиоактивные отходы. 2022. №4 (21). с. 58-69. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-58-69.
91. Татаринov В.Н., Маневич А.И., Лосев И.В. Системный подход к геодинамическому районированию на основе искусственных нейронных сетей // Горные науки и технологии. №3. 2018б. С.14-25. DOI: 10.17073/2500-2018-14-25
92. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по данным ГНСС наблюдений // Геофизические исследования. 2018а, том 19, № 4. С.64-79. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-5>.
93. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринova Т.А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019а. №1(6). С. 77-89. РИНЦ.
94. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Каган А.И. Кинематический метод геодинамического районирования при проектировании отработки месторождений подземным способом // Безопасность жизнедеятельности. 2014б. №7. С 7-11.
95. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Каган А.И., Татаринova Т.А. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014а. №1(24). С. 25-29.
96. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринova Т.А. Подземная исследовательская лаборатория: к программе геомеханических исследований // Радиоактивные отходы. 2019б. №2(7). С. 101-118.

97. Трифонов В.Г. Живые разломы земной коры. М., СОЖ, 2001, № 7, с. 66–74.
98. Трифонов В.Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С.16-26.
99. Трофимов В.Т., Герасимова Н.С., Красилова Н.С. Устойчивость геологической среды и факторы, ее определяющие // Геоэкология. 1994. № 2. С. 18-28.
100. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967. 632 с.
101. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
102. Холодов В.Н. Системный анализ в геолого-литологических исследованиях // Литология и полезные ископаемые. 2015. №2. С.103-112.
103. Чернышев В.Н., Чернышев А.В. Теория систем и системный анализ. Тамбов. Из-во ТГТУ. 2008. 96 с.
104. Ческидов В.В. Разработка метода построения сетей инженерно-геологических исследований техногенных массивов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук. М. Московский государственный горный университет (МГГУ). – 2012. – 168 с.
105. Шитиков В.К., Мастицкий С.Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. Тольятти: ИЭВБ РАН. 2017. 351 с.
106. Agayan S. M., Tatarinov V. N., Gvishiani A. D., Bogoutdinov Sh. R. and Belov I. O. (2020). FDPS algorithm in stability assessment of the Earth's crust structural tectonic blocks. *Russ. J. Earth Sci.*, 20, <https://doi.org/10.2205/2020ES000752>.
107. Agayan, Sergei M., Ilya V. Losev, Ivan O. Belov, Victor N. Tatarinov, Alexander I. Manevich, and Maksim A. Pasishnichenko. 2022. Dynamic Activity Index for Feature Engineering of Geodynamic Data for Safe Underground Isolation of High-Level Radioactive Waste. *Applied Sciences* 12, no. 4: 2010. <https://doi.org/10.3390/app12042010>.

108. Agayan, Sergey, Shamil Bogoutdinov, Dmitriy Kamaev, Vladimir Kaftan, Maxim Osipov, and Victor Tatarinov. 2021. Theoretical Framework for Determination of Linear Structures in Multidimensional Geodynamic Data Arrays. *Applied Sciences* 11, no. 24: 11606. <https://doi.org/10.3390/app112411606>.
109. Batugina I.M., Petukhov I.M. Geodynamic zoning of deposits in the design and operation of mines. Nedra, 1988.
110. Gitis V. G., Ermakov B. V. Fundamentals of space-time forecasting in Geoinformatics". Fizmatlit. M. 2004. 256p.
111. Grown E.T., Hoek E. Trends in relations between measured in situ stresses with depth // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. 1978. V.15. Issue 4. P. 211– 215.
112. Gvishiani A.D., Belov S.V., Agayan S.M., Rodkin M.V., Morozov V.N., Tatarinov V.N., Bogoutdinov S.R. Artificial intelligence methods in assessing the tectonic stability of the nizhnekansk massif. *Engineering Ecology*. 2008, 2, 3-14.
113. Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Dzeboev B.A., Losev I.V. The velocities of modern horizontal movements of earth crust in the south sector of Yenisei ridge according to GNNS observations. // *Doklady Earth Sciences*. 2020. T. 493. № 1. C. 544-547. DOI:10.1134/S1028334X20070077
114. Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Kaftan V.I. Geodynamic interpretation of modern geodynamic movements in the Sourhern part of the Yenisei ridge (in application to the problem of underground isolation of radioactive waste) // *Eurasian Mining*. 2021. №2. Pp.7-11. DOI: 10.17580/em.2021.02.02
115. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>
116. Jia R., Lv Y., Wang G., Carranza E., Chen Y., Wei C., Zhang Z. A stacking methodology of machine learning for 3D geological modeling with geological-

- geophysical datasets, Laochang Sn camp, Gejiu (China). *Computers & Geosciences*, 2021, 151.
117. Jiang L., Zhao Y., Golsanami N., Chen L., Yan W. A novel type of neural networks for feature engineering of geological data: case studies of coal and gas hydrate-bearing sediments. *Geoscience Frontiers*. 2020, 11, 1511-1531
118. Jing L., Tsang C.-F., Stephansson O. DECOVALEX—an international cooperative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(5), 389–398.
119. Kagan A. I., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Database on geological environment of the nizhnekansky massif (Krasnoyarsk territory)"Database on geological environment NKM". Auth.reduction. No. 2014621299 from 15.09.2014.
120. Manevich A.I., Kaftan V. I., Losev I. V., and Shevchuk R. V. Improvement of the Deformation GNSS Monitoring Network of the Nizhne-Kansk Massif Underground Research Laboratory Site. // *Seismic Instruments 2021* Vol. 57, No. 5, pp. 587–599.
121. Morozov V.N., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Losev I.V. Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive waste. *Russian Journal of Earth Science*. 2019. № 19.
122. Nino-Adan I., Manjarres D., Landa-Torres I., Portillo E. Feature weighting methods: A review. *Expert Systems with Applications*, 2021, 184, 1-16
123. Oshchenko A.A., Sidorov R.V., Soloviev A.A., Solovieva E.N. Overview of anomaly measure application for estimating geomagnetic activity. *Geophysical Research*, 2020, T.21, 4, 51-69.
124. Pérez-Aguirre X.J., Chávez-Cabello G., Ramírez-Peña C.F., Méndez-Delgado S., Romero-de la Cruz O.M. Geophysical modeling of the crustal boundary between

the Central and Oaxaquia terranes in northern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 110.

125. Singh, B. Investigating the impact of data normalization on classification performance / B. Singh // *Applied Soft Computing J.* 2020. Vol. 97. P. 105524.
126. Sobel I. and Feldman G. A 3x3 Isotropic Gradient Operator for Image Processing. / *Pattern Classification and Scene Analysis*, 1973, pp. 271-272.
127. Soloviev An. A., Soloviev Al. A., Gvishiani A.D., Nikolova Yu. I., Nikolov B. P. GIS-oriented database on seismic hazard assessment for the Caucasus and Crimea regions // *Earth observation and remote sensing* 2018 no. 5. Pp. 52-64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.
128. Viktor Tatarinov, Vladimir Kaftan, Vladislav Morozov, Eugenie Kamnev, Tatiana Tatarinova. Reduction of the geodynamic risk in the disposal of radioactive waste in geological formations // 18 International multidisciplinary conference SGEM 2018. Section Nuclear Technologies. Vol.18. Issue 4.3. Vienna. 2018. P.11-21. DOI: 10.5593/sgem2018V/4.3/S04.002

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГЦ РАН)

Молодежная ул., д. 3, Москва, 119296
Тел.: +7 (495) 930-05-46; факс: +7 (495) 930-05-06
e-mail: gcras@gcras.ru; http://gcras.ru
ОКПО 02699240; ОГРН 1037739048489;
ИНН/КПП 7736053773/773601001

«31» марта 2025 г.

СПРАВКА

В рамках научно-исследовательских работ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) были апробированы результаты диссертационного исследования Лосева Ильи Владимировича на тему «Геодинамическое районирование территории строительства подземной исследовательской лаборатории на основе системного анализа геолого-геофизической информации». Материалом для данной работы послужили результаты, полученные автором в рамках работ по теме Государственного задания ГЦ РАН №: 122080300206-4: «Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей», утвержденного Минобрнауки России; результаты совместных работ с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» и Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Проведенные Лосевым И.В. исследования позволили выполнить геодинамическое районирование участка «Енисейский» и прилегающих районов. В результате изучаемая территория дифференцирована по степени геодинамической устойчивости для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях Нижне-Канского массива. Разработанный метод прошел апробацию и внедрен в проектные разработки при планировании геомеханических и геодинамических исследований в подземной исследовательской лаборатории (Красноярский край) на 2022 – 2026 гг. Результаты работы использованы в рамках выполнения документа «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждена Генеральным директором ГК «Росатом» А.Е. Лихачевым 28.03.2018 г.).



Заместитель директора по науке ГЦ
РАН, д.ф.-м.н.
(должность)

(подпись)

Дзебоев Б.А.
(ФИО)