МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

Лосев Илья Владимирович

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

Специальность: 1.6.21
«Геоэкология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность научной работы. На территории России накоплен огромный объем неперабатываемых радиоактивных отходов (РАО), представляющих серьезную экологическую опасность для населения и окружающей среды. Наиболее опасными являются тепловыделяющие РАО высокой степени активности[1], содержащие продукты деления, актиниды и трансурановые отходы с периодом полураспада более 10 тыс. лет. В 90-х годах прошлого столетия в России начались исследования по поиску площадок для их захоронения в глубокие геологические формации. Сравнение альтернативных участков проводилось с учетом множества геологических, гидрогеологических, тектонических и др. факторов. В итоге изысканий для строительства пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) был выбран участок «Енисейский», расположенный на границе Нижнеканского гранитоидного массива (Красноярский край). Для создания ПГЗРО разработана и утверждена Генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачевым «Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО». Она построена на обязательствах Российской Федерации по исполнению «Объединенной конвенции по безопасности обращения с отходами ядерного топлива (ОЯТ) и РАО» и международных подходах к созданию подобных объектов. В соответствии со Стратегией в 2023 году на участке «Енисейский» начато строительство шахтных стволов подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Согласно международным и отечественным нормативам ПИЛ необходима для детального изучения геологических условий и принятия окончательного решения о пригодности породного массива для захоронения высокоактивных РАО.

Однако оказалось, что имеющиеся данные о геодинамической стабильности участка «Енисейский» характеризуются фрагментарностью и неопределенностью. Прямое использование традиционных методов геодинамического районирования невозможно в связи с уникальными особенностями объекта, требующих выявления тенденций эволюции геологической среды на длительные периоды времени. Для оценки устойчивости геологической среды и ее прогноза на период более 10 тыс. лет в мировой научной практике широко используется подход, основанный на многоэтапном системном анализе массива геолого-геофизических данных. Он позволяет оценить качество данных, выявить неопределенности, наметить оптимальные пути их преодоления и на основе

[1] К высокоактивным относят РАО, в которых удельная активность бета-, гамма излучающих нуклидов более 10^7 кБк/кг, а трансурановых радионуклидов более 10^5 Бк/г

фундаментальных геологических и геодинамических закономерностей спрогнозировать возможную эволюцию геологической среды при ограниченном объеме геолого-геофизической информации.

В этой связи, развитие метода геодинамического районирования на основе системного подхода является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить достоверность обоснования геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных РАО на участке «Енисейский» Нижнеканского массива.

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 длительную 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 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.

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 пространственных геолого-геофизических данных, 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 мер активности динамических показателей с результатами натурных геологических, геофизических и геоморфологических исследований;

– статистически значимыми оценками корреляции используемых признаков;

– соответствием и непротиворечивостью между собой расчетов, результатов математического моделирования, данных комплексных инструментальных наблюдений и сходимостью результатов геодинамического районирования по трем независимым методикам.

Практическое значение и реализация результатов работы определяются исключительным значением создания пункта глубинного захоронения высокоактивных РАО в Красноярском крае для обеспечения безопасности населения страны и развития атомной отрасли. Методика оценки геодинамической безопасности входит в Программу геодинамических исследований в ПИЛ, реализуемой в настоящее время ГК «Росатом» в рамках обоснования долговременной безопасности (ОДБ) подземной изоляции высокоактивных РАО. Результаты работы могут использоваться также на горнорудных, проектных, строительных и инвестиционных организациях.

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 по Нижнеканскому массиву и разработана методика дифференциации территорий по степени геодинамической устойчивости. Им созданы необходимые алгоритмы и программные пакеты, защищенные РИДами, 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. По теме диссертации опубликовано 8 статей, 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 литературных источников 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. Татаринову, 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. Дзебоеву 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»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приводится общая характеристика диссертационной работы, раскрыта степень её научной разработанности, сформулированы цель, основная идея, задачи, а также научные положения, выносимые на

защиту, обоснована её научная новизна и практическая значимость, приведены сведения о степени достоверности и об апробации работы.

В первой главе приведены сведения о проблеме, связанной с захоронением высокоактивных РАО в геологических формациях, выполнен анализ международного и отечественного опыта изучения геологической среды при выборе мест для захоронения РАО, а также опыта геодинамического районирования мест размещения горнорудных предприятий для выявления активных тектонических блоковых структур.

Метод геодинамического районирования был создан Батугиной И.М. и Петуховым И.М. в конце 1970-х годов. Изначально, его главной задачей было предотвращение горных ударов во время добычи полезных ископаемых. В основу концепции были заложены представления о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов при ведении горных работ. Принято, что естественное напряженное состояние земной коры в районе месторождения формируется за счет взаимодействия иерархически упорядоченных активных блоков земной коры. Всего предполагалось выявлять блоки четырех иерархических уровней с использованием топоматериалов масштаба от 1:25 000 до 1:1 000 000. Блоки I ранга были наиболее крупными и состояли из блоков II ранга, те, в свою очередь, состояли из блоков III ранга и те из блоков IV ранга. Позже этот метод был развит в работах Батугина А.С., Николаева В.А., Попова А.Л., Татаринова В.Н., Шабарова А.Н., Нестеренко М. Ю., Овчинникова Т. И. и др. и стал широко применяться при строительстве газо- и нефтепроводов, транспортных объектов, гидростанций, объектов ядерного топливного цикла. Оценка динамики взаимодействия тектонических блоков, определение параметров их смещений и деформаций являются важными составляющими метода, на основе которых проводится ранжирование участков земной коры по уровням опасности.

Сложившаяся практика оценки состояния геологической среды в районах размещения объектов ядерного топливного цикла опирается на регламенты Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и Руководств по безопасности (НП-100-17; НП-064-05; РБ-019-18 и др.), а также на требования МАГАТЭ. Фундаментальное отличие ПГЗРО от других подземных объектов заключается в сверхдлительном сроке эксплуатации, обусловленным временем радиобиологической опасности радионуклидов, содержащихся в РАО. Если для горнорудных предприятий или АЭС срок эксплуатации составляет около 50-100 лет, то для ПГЗРО он превышает 10 тыс. лет. Это предъявляет расширенные требования к перечню и объему геолого-геофизических характеристик, классификации и методам их анализа и т.д. В качестве интегральной

характеристики геологической среды и геодинамического режима широко используется понятие устойчивость. В приложении к решаемой задаче под устойчивостью структурно-тектонического блока понимается его способность при природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свойства и состояние в таком диапазоне, который не приведет к потере изоляционных свойств пород и выходу радионуклидов за пределы санитарно-защитной зоны на весь период опасности РАО.

Пути решения проблемы безопасного захоронения РАО отражены в работах Н.П. Лаверова, Н.Н. Мельникова, Н.С Булычева, В.С. Юдинцева, Е.Б. Андерсона, В.А. Петрова, Б.Т. Кочкина, С.А. Несмеянова, В.Т. Трофимова, Ю.О. Кузьмина, В.Н. Морозова, В.Н. Татаринова, И.Ю. Шишица и др. Однако, окончательно задача оценки длительной устойчивости геологической среды на длительный период времени в настоящее время не решена. Оконтуривание зон тектонической неустойчивости, включая геодинамические зоны, которые могут быть в т.ч. и зонами возможных очагов землетрясений, одна из наиболее сложных и до конца не решенных проблем наук о Земле.

Мировой опыт показывает, что решение этой задачи возможно на основе системного подхода к анализу пространственного распределения данных, связанных с эволюцией земной коры как в геологическое время (по крайней мере четвертичный период): рельеф, схема разломов, геофизические поля и др., так и на современном этапе развития. Большой прогресс в применении математических методов системного анализа для различных задач, связанных с районированием территорий, был достигнут учеными научной школы акад. А.Д. Гвишиани. Ими разработан оригинальный системно-аналитический подход, когда экспериментальные геолого-геофизические данные и результаты моделирования трансформируются в нечеткие структуры и рассчитывается единый интегрированный формализованный показатель геодинамической устойчивости тектонических блоков земной коры.

В этой связи, появилась объективная необходимость использования формализованного математического подхода для совершенствования методики геодинамического районирования, с последующим ее применением для оценки геодинамической устойчивости структурно-тектонических блоков при захоронении РАО в геологических формациях. На основании результатов выполненного анализа и обобщения опыта применения метода геодинамического районирования была сформулированы цель, идея и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны теоретические основы метода системного подхода к анализу геопространственных данных, охарактеризованы исходные геолого-геофизические

данные по району исследования, структурированные в ГИС-ориентированную базу данных, а также представлена разработанная классификация инженерно-геологических явлений и процессов, влияющих на устойчивость структурно-тектонического блока, вмещающего ПГЗРО.

Системный подход заключается в том, что объект исследования рассматривается как самостоятельная природно-техногенная система, обладающая своими особенностями функционирования и развития. Он представляет объект как открытую систему, характеризующуюся: элементным составом; структурой как формой взаимосвязи элементов; функциями элементов; единством внутренней и внешней среды; законами эволюции ее составляющих.

Первый шаг при выполнении геодинамического районирования заключался в сборе геолого-геофизических данных о районе исследований и их первичной организации в информационные слои на основе ГИС. Многообразие геологических процессов и явлений и специфика решаемой задачи обусловили необходимость их классификации. С методологической точки зрения, это распределение множества процессов и явлений на классы и подклассы по определенному признаку в виде иерархических таблиц.

На основе анализа различных инженерно-геологических классификаций, а также научной и нормативно-правовой литературы и с учетом задач настоящего исследования была разработана такая классификация. Ее цель заключалась в выделении из весьма объемного списка геолого-геофизических данных именно тех, которые непосредственно связаны с устойчивостью структурно-тектонического блока на длительные периоды времени. Классификация включает в себя два класса (более подробно можно ознакомиться в тексте диссертации):

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

б) геологические условия возникновения и активизации опасных геологических явлений и процессов.

Геологические процессы - процессы, протекающие в земной коре, вызывающие движение и деформации, изменяющие их состояние, строение, состав, свойства, создающие новые формы рельефа. *Геологические явления* – это результат геологических процессов, приводящих к изменению свойств пород. Например, тектонические движения – процесс, а разлом – явление.

Следующий этап исследований заключался в формализации разноформатных геолого-геофизических данных о районе исследования в соответствии с разработанной классификацией. Данные были интегрированы в единый ArcGIS-проект, содержащий

модули системного анализа на языке Python. Программные модули разработаны для многовариантного анализа и визуализации геоинформационных слоев, созданных как на основе оригинальных алгоритмов ДМА, так и на базе классических подходов.

База данных, зарегистрированная в виде РИДа, состоит из следующих слоев:

1. Географическая основа района;
2. Спутниковые снимки района;
3. Цифровая модель рельефа по данным радарной интерферометрической съемки поверхности Земли, SRTM-4;
4. Карта линеаментов масштаба 1:200 000;
5. Схема неотектонических структур зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты;
6. Схемы тектонических разломов, масштаб 1:50 000;
7. Геологическая карта Нижнеканского массива, масштаб 1:200 000;
8. Геологическая карта участка «Енисейский», масштаб 1:10 000;
9. Каталог эпицентров землетрясений, масштаб 1:200 000;
10. Кинематическая модель современных горизонтальных движений и скоростей деформаций земной коры по ГНСС-данным;
11. Карты полей напряжений Нижнеканского массива по результатам численного моделирования;
12. Карты аномального магнитного и гравитационного полей.

Третья глава посвящена разработке методики и алгоритма оценки геодинамической безопасности, отличающаяся тем, что для выявления неустойчивых зон используются метод ДМА, позволяющий по слабым признакам выявлять потенциально неустойчивые зоны, которые могут стать впоследствии каналами инфильтрации радионуклидов с подземными водами в окружающую среду.

Для приведения разных масштабов и единиц измерения данных к единому виду использован подход, основанный на нормализации данных. Нормализация позволяет сравнивать данные между собой и использовать для оценки признаков и их комбинаций. Преобразование значений геологических факторов определяется соотношением:

$$\bar{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\lambda_j}, \quad (1)$$

где $\bar{x}_j$ – преобразованное (нормализованное) значение; x_j – натуральное значение фактора; x_{jo} – 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*.

Для выбора комбинации оценочных параметров выборки был разработан алгоритм *RaGeP*, оформленный в виде РИДа. В табл. 1 приведены использованные формулы расчета оценочных значений выборок геологических параметров.

Табл. 1- 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	$\lvert x_{max} - x_{min} \rvert$	Модуль разницы максимального и минимального значения
4	$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_j$, где n – количество значений в выборке x_j – натуральное значение выборки	Среднее арифметическое значение выборки
5	$x_{j0} = x_{geom} = \sqrt[n]{(x_1 \cdot x_2 \cdot \ldots \cdot x_j)}$, где n – количество значений в выборке; x_j – натуральное значение выборки	Среднее геометрическое значение выборки
6	Отметка в выборке данных, такая, что половина исходных данных меньше этой отметки, а половина – больше	Медиана выборки
7	$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n}\left(x_j - x_{\text{ср}}\right)^2}$, где n – количество значений в выборке; x_j – натуральное значение выборки; $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение	Среднеквадратичное отклонение выборки от среднего арифметического
8	$\lambda_i = \sqrt{\frac{1}{n}\left(\sum_{j=1}^{n} x_j\right)^2}$, где n – количество значений в выборке; x_j – натуральное значение выборки	Среднеквадратичное значение выборки

Постановка задачи.

Пусть в районе ПГЗРО 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 $\vec{F}_i = \left[f(x_1),\ldots, f(x_m)\right]$. Считаем, что на координатной плоскости $\mathbb{R}^2(x_1, x_2)$ имеется некоторая область $\Pi = \{a \le x_1 \le b; c \le x_2 \le d\}$. Требуется оценить устойчивость области П по комплексу параметров F:

$$F = \{f_1, \dots, f_m\},$$
$$f_i: \Pi \to \mathbb{R}; i = 1, \dots, m \quad (2)$$

Ставится задача разбить область П на относительно неустойчивые (условно опасные) и устойчивые (условно безопасные) элементы. В области П задается регулярная сетка $W = W(h_1, h_2)$ с узлами w:

$$W = \left\{ w = (a + ih_1; c + jh_2) \middle| \begin{matrix} i = 0, \dots, N;\ h_1 = \frac{b-a}{N} \\ j = 0, \dots, M;\ h_2 = \frac{d-c}{M} \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

На координатной сетке W необходимо проанализировать распределение функций F в окрестностях узла w.

Для этого определим нечеткую меру активности $\mu(w)$ в интервале [0, 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 определяем 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 показателя D_f. Мера активности μD_f рассчитывается из динамического показателя D_f в рамках методологии ДМА. Переход $D_f \to \mu D_f$ переводит анализ измерения f на язык нечёткой логики: меры активности μD_f для разных динамических показателей D_f являются нечеткими структурами на сетке W и могут соединяться с помощью операций нечеткой логики и усреднений.

Правило 3. *Вычисление интегральной меры активности* μ_F.

Здесь выполняется соединение всех мер активности μD_f в единый интегральный показатель μ_F. Формула соединения представляет собой среднее арифметическое всех мер активности μD_f. Применяются весовые коэффициенты для мер активности. Для отражения меры геодинамической безопасности используется величина обратная интегральной мере

активности:

$$S_F = 1 - \mu_F \tag{4}$$

В терминах геодинамического районирования критерии оценки величины S_F по системе признаков F определяются по табл. 2. Такой подход к ранжированию является адекватным, т.к., если некоторая интегральная мера выражена в интервале [0, 1], то условия $S_F \leq 0.25$ и $S_F \geq 0.75$ означают ее отсутствие или наличие безопасности (аномальности). Попадание в интервал $(0.25; 0.75)$ говорит о неопределенности и необходимости дополнительных исследований.

Табл. 2 – 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

Расчет суммарной меры безопасности проводился по алгоритму, схема которого для 4-х слоев приведена на рис 1.

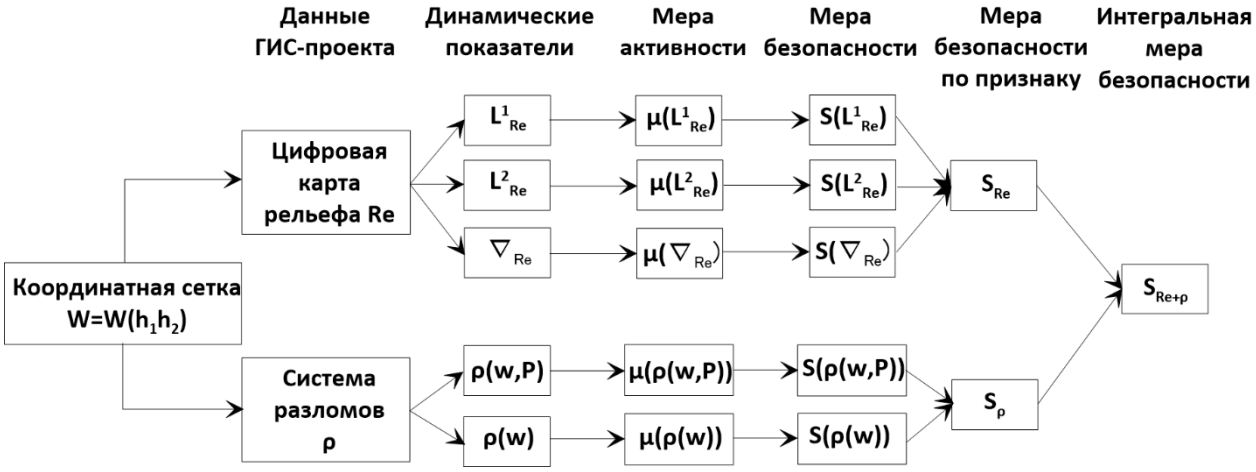


Рис.1. Схема расчета интегральной меры безопасности

Для реализации были разработаны программные модули на основе расчета морфометрических показателей и нормализации геолого-физических параметров, характеризующих особенности рельефа $L^1_{Re}(w)$, $L^2_{Re}(w)$, $|\nabla_{Re}|(w)$; близость $\wp(w, \mathcal{P})$ к активным разломам, их плотность $\wp(w, \rho)$, компоненты тензора напряжений $\sigma_{xx}(w)$ $\sigma_{yy}(w)$ и интенсивность напряжений $\sigma_{int}(w)$, компоненты тензора деформации $E_{xx}(w)$ $E_{yy}(w)$ и параметр деформации – дилатация $dil(w)$, аномалии магнитного поля $L^2_{Mag}(w)$, $|\nabla_{Mag}|(w)$.

Первые два показателя характеризуют геоморфологическую изменчивость, а третий $|\nabla_{Re}|$ – градиент рельефа:

$$L_{Re}^{1}(w) = \frac{\sum_{\overline{w} \in C(w)} |Re(\overline{w}) - Re(w)|}{4} \quad (5)$$

$$L_{Re}^{2}(w) = \frac{2 + \cos\theta_{\text{г}} + \cos\theta_{\text{в}}}{2} \quad (6)$$

$$\cos\theta_{\text{г}} = \frac{-1 + \big(Re(w_4) - Re(w)\big) \times \big(Re(w_6) - Re(w)\big)}{\sqrt{1 + \big(Re(w_4) - Re(w)\big)^2} \times \sqrt{1 + \big(Re(w_6) - Re(w)\big)^2}} \quad (7)$$

$$\cos\theta_{\text{в}} = \frac{-1 + \big(Re(w_2) - Re(w)\big) \times \big(Re(w_8) - Re(w)\big)}{\sqrt{1 + \big(Re(w_2) - Re(w)\big)^2} \times \sqrt{1 + \big(Re(w_8) - Re(w)\big)^2}} \quad (8)$$

Показатель перепада рельефа - модуль градиента $|\nabla_{Re}(w)|$, отвечает за максимальное изменение рельефа в узле w и вычисляется с помощью оператора Собеля:

$$|\nabla_{Re}(w)| = |\nabla_{Re}^{\text{г}}(w)| + |\nabla_{Re}^{\text{в}}(w)| \quad (9)$$

$$\nabla_{Re}^{\text{г}}(w) = \big(Re(w_7) + 2Re(w_8) + Re(w_9)\big) - \big(Re(w_1) + 2Re(w_2) + Re(w_3)\big) \quad (10)$$

$$\nabla_{Re}^{\text{в}}(w) = \big(Re(w_3) + 2Re(w_6) + Re(w_9)\big) - \big(Re(w_1) + 2Re(w_4) + Re(w_7)\big) \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} \mu L_{Re}^{1}(w) &= \frac{L_{Re}^{1}(w)}{L_{Re}^{1}(w) + \overline{L_{Re}^{1}}} \\ \mu L_{Re}^{2}(w) &= \frac{L_{Re}^{2}(w)}{L_{Re}^{2}(w) + \overline{L_{Re}^{2}}} \\ \mu \nabla_{Re}(w) &= \frac{\nabla_{Re}(w)}{\nabla_{Re}(w) + \overline{\nabla_{Re}}} \end{aligned} \quad (12)$$

Далее вычисляется интегральная мера геодинамической безопасности геоморфологической изменчивости $S_{Re}(w)$ по формуле:

$$S_{Re}(w) = 1 - \frac{\mu L_{Re}^{1}(w) + \mu L_{Re}^{2}(w) + \mu \nabla_{Re}(w)}{3} \quad (13)$$

При изучении устойчивости структурно-тектонического блока ключевым вопросом является макроскопическое проявление геодинамического процесса. В земной коре это макроскопическое проявление чаще всего представлено относительным смещением частей массива относительно друг друга. Поэтому были добавлены показатели, которые описывают структурные нарушения в виде разломов. Это $\rho(\text{п}, \mathcal{P})$, который характеризует близость к тектоническим разломам и ещё один признак $\rho(w)$, характеризующий плотность разломов.

Расчёт $\rho(\text{п}, \mathcal{P})$ от некоторой ячейки п до разлома $\mathcal{P}$ получается с помощью критерия Колмогорова среднего с отрицательным показателем:

$$\rho(\text{п}, \mathcal{P}) = \begin{cases} 0, \text{если п} \in \mathcal{P} \\ M_q(\rho(\text{п}, P_k)|_1^N) \end{cases}, \quad (14)$$

где

$$q < 0$$

$$M_q(\rho(\text{п}, P_k)|_1^N) = \left(\frac{\sum_{k=1}^{N} \rho(\text{п}, P_k)^q}{N}\right)^{1/q}$$

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

$$\mu\rho(\text{п}, \mathcal{P}) = \frac{\rho(\text{п}, \mathcal{P})}{\rho(\text{п}, \mathcal{P}) + \overline{\rho(\text{п}, \mathcal{P})}} \quad (15)$$

Показатель индекса динамической активности плотности разломов был определен с использованием линейной плотности, которая получена в круговой окрестности внутри каждой ячейки сетки. Длина сегмента каждой линии, пересекаемой окружностью круга, умножается на весовой коэффициент линии. Затем все значения длины суммируются и делятся на площадь окружности. Этот процесс повторяется для всех ячеек сетки.

После этого вычисляется интегральная мера геодинамической безопасности тектонических нарушений $S_\rho(w)$ по следующей формуле:

$$S_\rho(w) = 1 - \frac{\mu\rho_\rho(w) + \mu\rho(\text{п}, \mathcal{P})}{2} \quad (16)$$

Следующие динамические показатели активности относятся к напряженно-деформированному состоянию (НДС) среды. Рассчитывались динамические показатели активности - компонент тензора напряжений σ_{xx} σ_{yy} и интенсивности напряжений σ_{int}, которые были получены из результатов расчета НДС. Также определялись динамические показатели активности деформаций земной поверхности по результатам ГНСС-измерений.

Использовались компоненты тензора деформации e_{xx}, e_{yy} и деформация дилатации E_{Dil}. Преобразование параметров НДС выполнялось путем перевода в градиентную шкалу в интервале [0, 1]. Для этого определяются показатели a, b, c, d, которые соответствуют следующим значениям динамической меры активности в табл. 3: a – максимальное значение напряжений/деформаций; b – значение напряжений/деформаций на положительной части шкалы; c – значение напряжений/деформаций на отрицательной части шкалы; d - минимальное значение напряжений/деформаций.

$$x_i \in \begin{matrix} [a;b] \\ \left[b;\frac{b+c}{2}\right] \\ \left[\frac{b+c}{2};c\right] \\ [c;d] \end{matrix} \rightarrow \begin{cases} 0.5 \times \frac{x-a}{b-a} \\ 0.5 + \frac{x-b}{c-b} \\ 1.5 - \frac{x-b}{c-b} \\ 0.5 \times \frac{d-x}{d-c} \end{cases} \quad (17)$$

Табл. 3 – Интервалы меры динамической активности на основе нормирований напряжений и деформаций.

№	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

Далее вычисляется интегральная мера геодинамической безопасности НДС:

$$S_{SSS}(w) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\mu\sigma_{xx}(w) + \mu\sigma_{yy}(w) + \mu\sigma_{int}(w)}{3} + \frac{\mu e_{xx}(w) + \mu e_{yy}(w) + \mu E_{Dil}(w)}{3} \right) \quad (18)$$

Показатель изменчивости аномалии магнитного поля $L^2_{Mag}(w)$ и градиент изменения аномалии магнитного поля $|\nabla_{Mag}|(w)$ были посчитаны по аналогичным формулам.

Интегральное значение меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ производилось на основе соединения четырех мер:

$$S_F(w) = \frac{S_{Re}(w) + S_{\rho}(w) + S_{SSS}(w) + S_{Mag}(w)}{4} \quad (19)$$

Все расчёты интегральных мер геодинамической безопасности были опробованы на синтетических моделях и дали адекватный результат.

На рис. 2 показаны карты мер геодинамической безопасности и гистограммы распределения их значений.

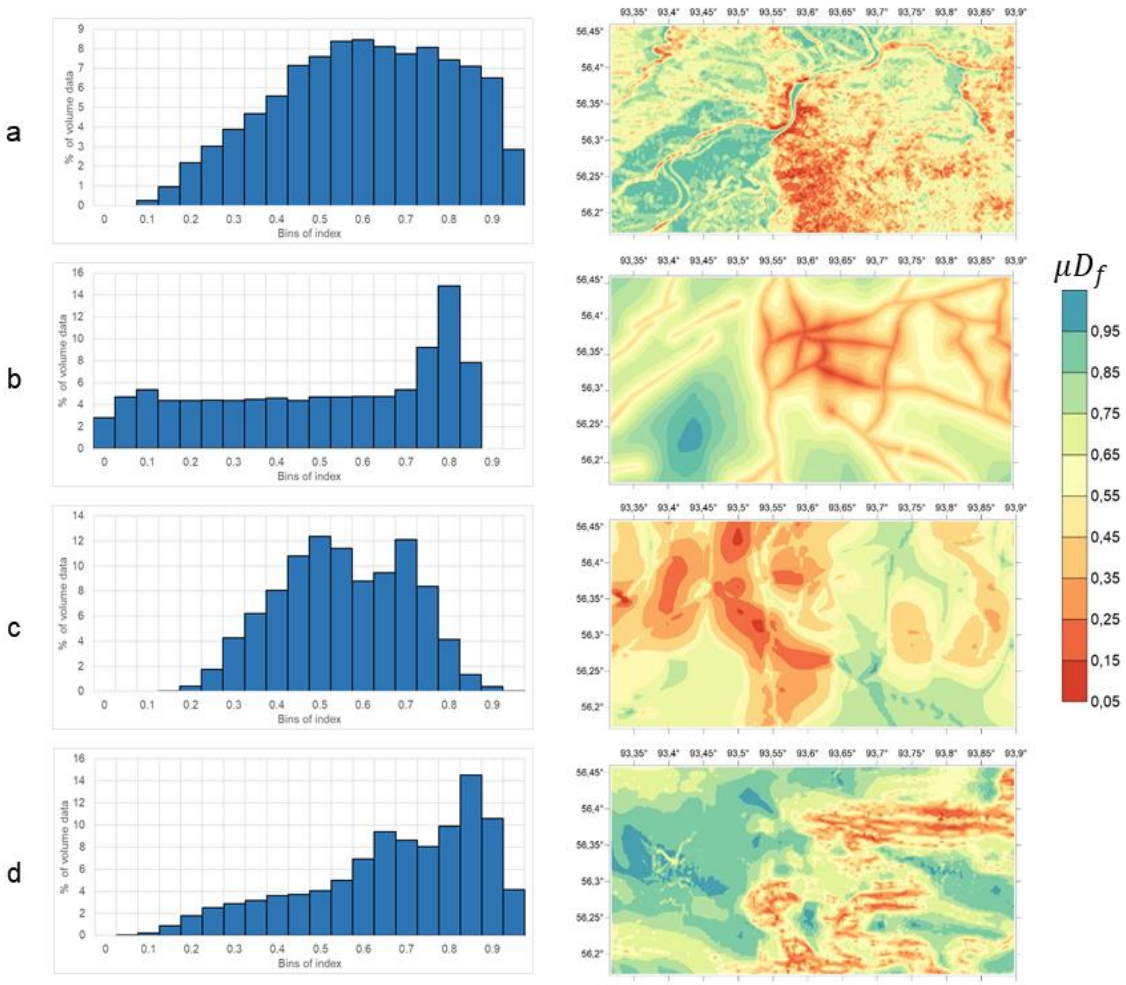


Рис. 2. Меры геодинамической безопасности и гистограммы распределения: a – мера безопасности по геоморфологической изменчивости, $S_{Re}(w)$; b – мера безопасности по плотности тектонических нарушений, $S_{\rho}(w)$; c – мера безопасности по напряженно-деформированному состоянию, $S_{SSS}(w)$; d – мера безопасности по аномальному магнитному полю, $S_{Mag}(w)$

Для мер динамических показателей и мер их активности были рассчитаны матрицы корреляций и пороги силы корреляционной связи. В матрице представлен коэффициент парной корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum((x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum((x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (20)$$

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

$$r_0 = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}} \quad (21)$$

$$r_{int} = \frac{1 - r_0}{3} \tag{22}$$

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 0.012–0.341, средняя связь в интервале 0.341–0.671, сильная связь в интервале 0.671–1.

После этого был выполнен анализ корреляционной матрицы мер активности динамических показателей μD_f (рис. 3). 65 из 78 значений корреляции мер активности динамических показателей μD_f имеют слабую корреляционную связь. Средние и сильные корреляционные связи обнаруживаются внутри групп показателей μD_f. В группе рельефа показатели геоморфологической изменчивости $\mu L^1_{Re}(w)$ и $\mu L^2_{Re}(w)$ имеют сильную корреляционную связь с показателем градиента рельефа $\mu \nabla_{Re}(w)$. Между собой показатели $\mu L^1_{Re}(w)$ и $\mu L^2_{Re}(w)$ имеют среднюю корреляционную связь. 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 на полученных картах. Меры группы разломов имеют среднюю силу корреляционной связи с мерами напряжений $\mu\sigma_{\mathrm{yy}}(w)$, $\mu\sigma_{\mathrm{int}}(w)$. В группе напряжений сильную корреляционную связь имеют показатели $\mu\sigma_{yy}(w)$, $\mu\sigma_{\mathrm{int}}(w)$, т.к. напряжения σ_{yy} оказывают наибольший вклад в формирование интенсивности напряжений σ_{int}. 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 $\mu e_{yy}(w)$, так между ними есть пространственное соответствие в полученных картах. 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 $\mu L^2_{Mag}(w)$ и градиентом изменения аномалий магнитного поля $\mu \nabla_{Mag}(w)$.

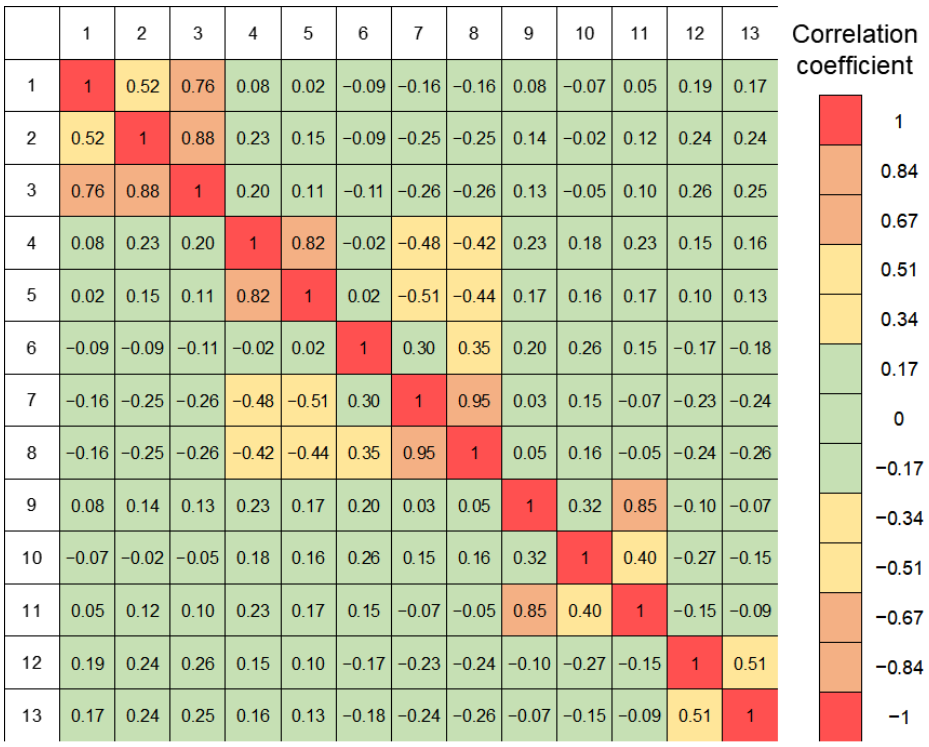


Рис. 3. Коэффициенты матрицы корреляции мер активности динамических показателей μD_f: 1 – мера рельефа, $\mu L^1_{Re}(w)$; 2 – мера рельефа, $\mu L^2_{Re}(w)$; 3 – мера рельефа, $\mu \nabla_{Re}(w)$; 4 – мера кратчайшего расстояния до разлома, $\mu \rho(w, \mathcal{P})$; 5 – мера плотности разломов, $\mu \rho(w)$; 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, $\mu L^2_{Mag}(w)$; 13 – мера аномалии магнитного поля, $\mu \nabla_{Mag}(w)$

Установлено, что большинство мер активностей имеет слабую корреляционную связь, что свидетельствует о низкой дисперсии и достаточности обобщающей способности оценки устойчивости на основе интегральной меры геодинамической безопасности. Это говорит о том, что показатели, отражающие различные свойства геологической среды, являются относительно независимыми наборами данных.

В четвертой главе приведены результаты применения разработанной методики для геодинамического районирования участка «Енисейский» и анализ его геодинамической безопасности по полученным картам.

В начале 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) и выделены тектонические блоки. На рис. 4 для примера показана схема блоковых структур ближнего района (а) и в дальней зоне ПГЗРО (б).

а) б)

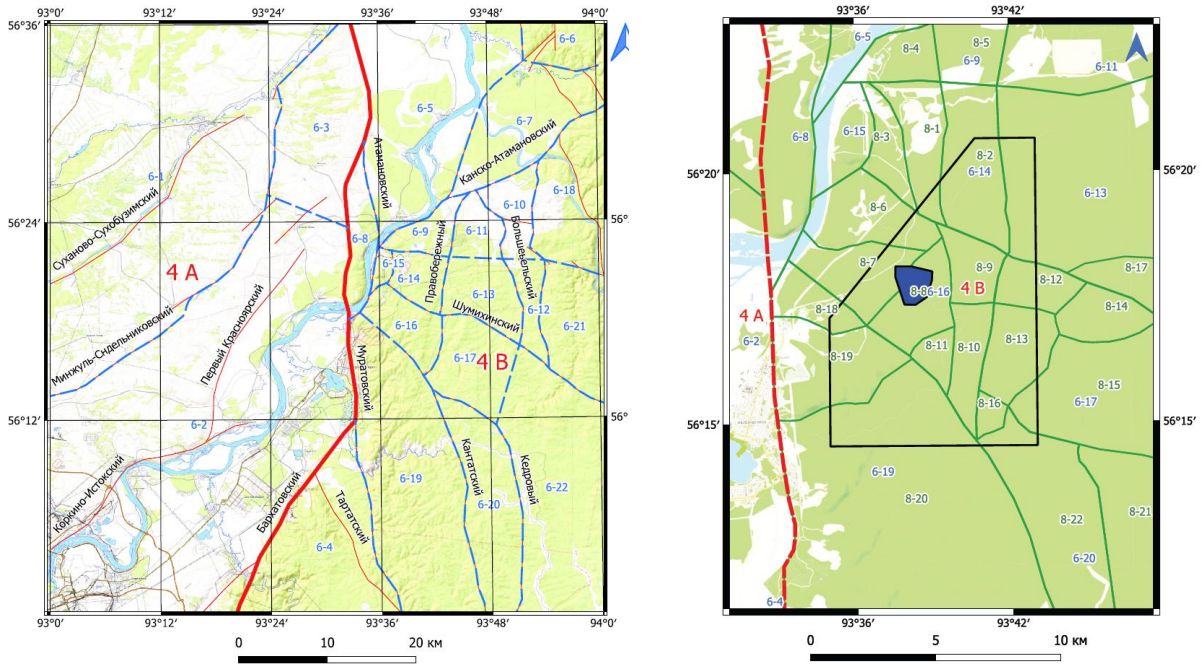


Рис. 4. Схема блоковых структур ближнего района (а) и в дальней зоне ПГЗРО (б). Красным цветом показаны структуры наивысшего ранга для данного района, а синим структуры низших рангов

После этого для иерархической системы тектонических блоков, было проведено конечно-элементное моделирование НДС. На рис. 5 показан результат моделирования полей НДС, показаны средние значения для, интенсивности напряжений σ_i, и соотношения главных напряжений σ_{yy}/σ_{xx} для ближнего района и дальней зоны ПГЗРО.

а) б)

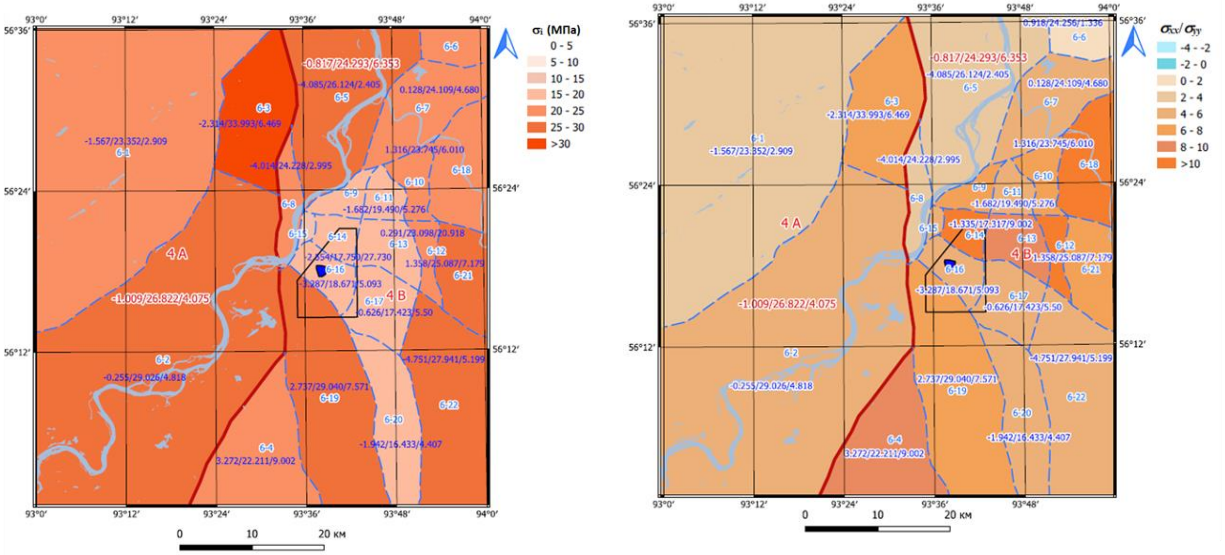


Рис. 5. Значения интенсивности напряжений σ_i (а) и соотношения σ_{yy}/σ_{xx} (б) в структурных блоках ближнего района ПГЗРО (радиус до 15 км)

Было отдельно выполнено районирование по результатам расчетов НДС по данным измеренных скоростей смещений пунктов ГНСС-наблюдений за 2012-2021 гг. На рис. 6 приведена карта районирования структурно-тектонических блоков по изменению деформации дилатации, на рис. 7 - карта районирования по изменению величины сдвига γ.

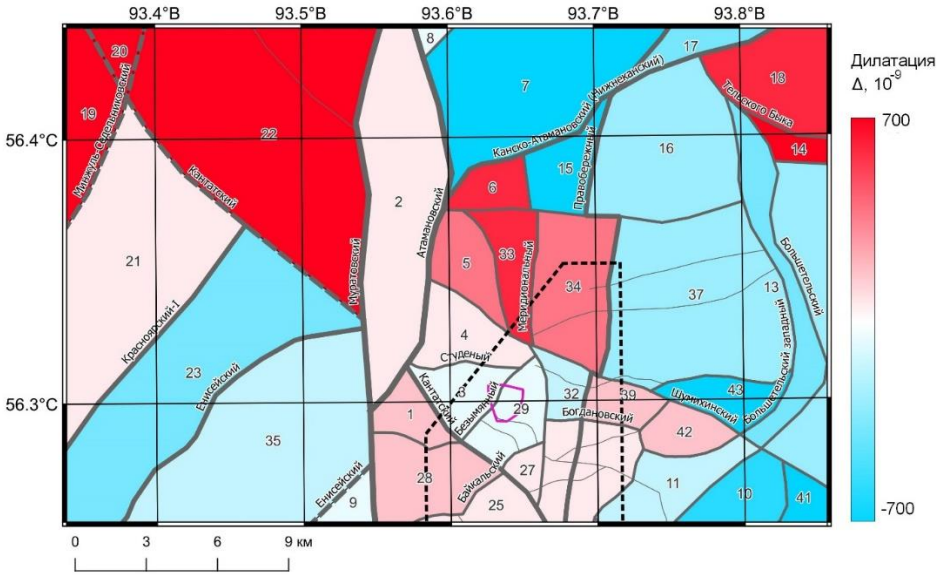


Рис. 6. Районирование структурно-тектонических блоков по изменению деформации дилатации Δ, по данным ГНСС-измерений за 2012-2021 г.

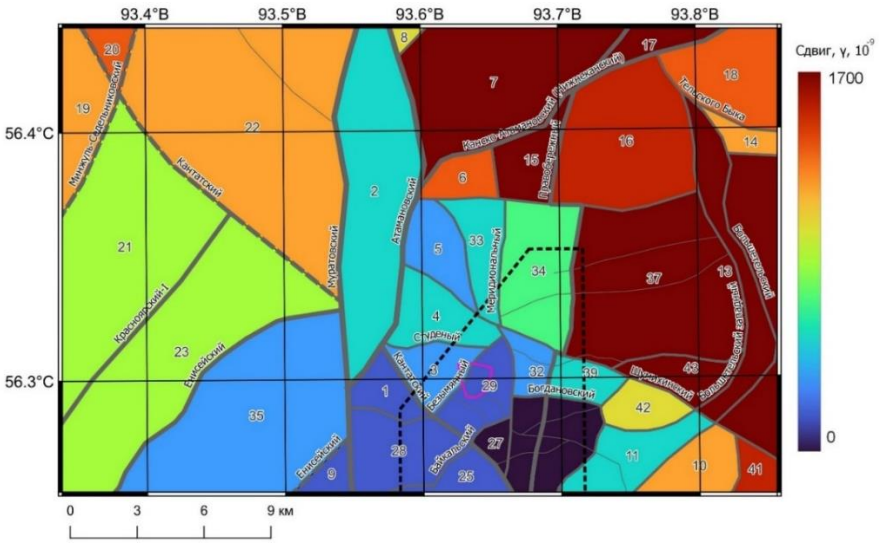


Рис. 7. Районирование структурно-тектонических блоков по величине чистого сдвига γ

Окончательно все результаты геодинамического районирования с использованием «классического» и «кинематического» подходов были обобщены путем вычисления

интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ по комплексу геолого-геофизических данных (формула 22). Пространственное распределение интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ приведено на рис. 8.

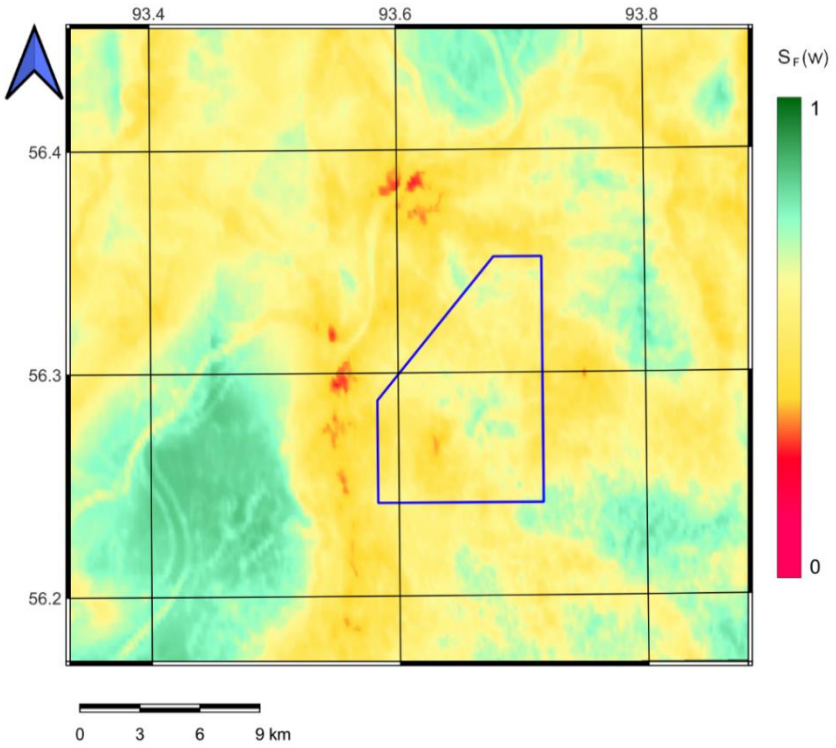


Рис. 8 Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Шкала: безопасные ($S_F(w) \geq 0.65$), нейтральные или переходные ($0.45 < S_F(w) > 0.65$), опасные ($S_F(w) \leq 0.45$)

Для интегральной меры геодинамической безопасности была построена гистограмма распределения по площади $S_F(w)$ (рис. 9). И, на ее основе, была скорректирована шкала районирования территории по степени устойчивости относительно среднего значения. Шкала разделена на 3 части: условно безопасные $S_F(w) \geq 0.65$, нейтральные $0.45 < S_F(w) > 0.65$, опасные $S_F(w) \leq 0.45$. Зеленый цвет на рисунке 8 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».

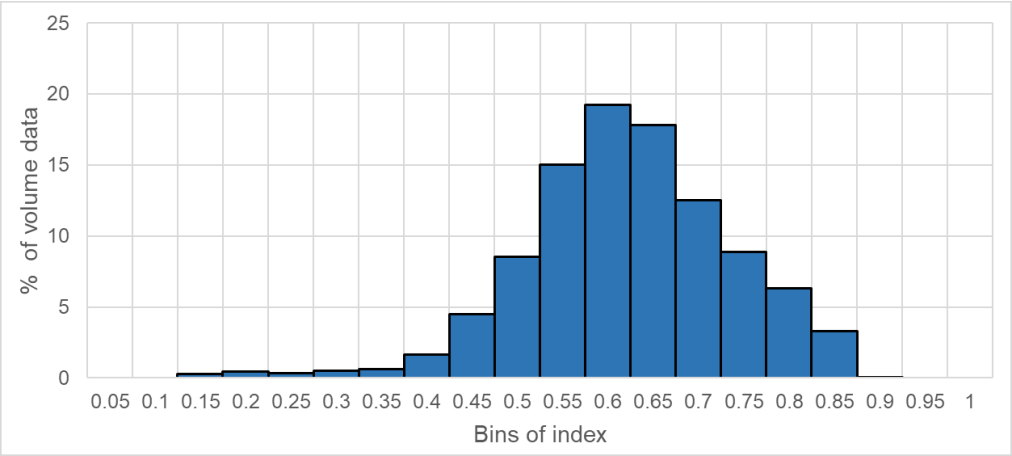


Рис. 9 – Гистограмма интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$

На карте (рис. 8) участки, соответствующие наименее устойчивому состоянию с $S_F(w) \leq 0.45$, занимают площадь ~ 21 км^2 и относятся к областям сочленения тектонических структур и резкого изменения градиента высот, которые выражаются в аномальных значениях всех мер активности динамических показателей μD_f. По отношении ко всей площади исследований, доля наименее устойчивых участков составляет ~9.1 %. Наибольшая площадь наименее устойчивых участков располагается в зоне контакта Сибирской плиты и Западно-Сибирской платформы и в зонах крупных разломов (Правобережный, Большетельский). Территория участка «Енисейский» располагается в интервале $S_F(w) = 0.57 - 0.62$, который является переходной, близким к безопасным.

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

Переходные зоны $S_F(w) \in (0.45; 0.65)$ распределены неравномерно. Основная площадь приурочена к областям взаимодействия локальных тектонических структур, областям умеренной изменчивости рельефа, напряженному состоянию в пределах немного выше фоновых значений. Переходные зоны занимают наибольшую площадь района ~56.7%.

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. Наиболее неустойчивые участки получены для зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы в центре района. На востоке относительно нейстойчивый участок находтися в зоне влияния Правобережного и

Тельского разломов. Это не противоречит общей картине тектонической эволюции данного района и является подтверждением эффективности усовершенстованного метода геодинамического районирования для решения задач оценки устойчивости геологической среды с учетом специфики объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной 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 течение которых сохраняется радиобиологическая опасность РАО, и на ее основе создана ГИС-ориентированная база геолого-геофизических данных по району исследования;

4. Развит метод геодинамического районирования с использованием новых алгоритмов системного анализа, позволяющий 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 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 13 параметрам. Построена интегральная карта геодинамической безопасности района. Участок «Енисейский» по устойчивости расположен в относительно благоприятных условиях.

7. Разработанный метод прошел апробацию и внедрен в проектные разработки организаций ГК «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.).

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы: В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и входящих в международную систему цитирования Web of Science/SCOPUS

1. Татаринов В.Н., Маневич А.И., **Лосев И.В.** Системный подход к геодинамическому районированию на основе искусственных нейронных сетей // Горные науки и технологии. 2018. №3. с. 14 - 25. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-3-14-25
2. 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. ES6001. DOI: 2019ES000687
3. 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. Т. 493. № 1. С. 544-547. DOI:10.1134/S1028334X20070077

4. Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Кафтан В.И., **Лосев И.В**., Маневич А.И. ГИС-ориентированная база данных, как информационная основа системного анализа геодинамической устойчивости Нижне-Канского массива с использованием дистанционного зондирования // Исследования Земли из космоса. 2021. №1. с. 53–66. DOI: 10.31857/S020596142101005X
5. 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. – 2021. – № 12. – С. 5–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_5
6. 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. 10.3103/S0747923921050042
7. Agayan, S.M.; **Losev, I.V.;** Belov, I.O.; Tatarinov, V.N.; Manevich, A.I. Dynamic Activity Index for Feature Engineering of Geodynamic Data for Safe Underground Isolation of High-Level Radioactive Waste. Appl. Sci. 2022, 12, 2010, https://doi.org/10.3390/app12042010
8. **Лосев И. В**. Геодинамическое районирование на основе системного анализа геолого-геофизических данных для обеспечения геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № S2. – С. 17-28. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_1_2_17

Программы для ЭВМ:

1. Маневич А.И., **Лосев И.В.,** Белов И.О., Татаринов В.Н. «Программа нормирования шкал значений инженерно-геологических параметров GP 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662379 от 11.09.2018.
2. Маневич А.И., **Лосев И.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617368. «Программа расчета распределения скоростей деформаций земной коры SEtools 1.0; дата государственной регистрации: 06 июня 2019 г.

3. **Лосев И.В**., Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Маневич А.И. Свидетельство о государственной регистрации базы данных (по геодинамике Нижне-Канского массива (Geodynamic DataBase)) №2020622380 от 23 ноября 2020г.
4. 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 сентября 2021 г.
5. **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 № 2022623073 от 24.11.2022.
6. **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 NKM v.2.0). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625328 от 19.11.2024 г.
7. 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.