

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИГЕМ РАН
чл.-корр. РАН
В.А. Петров
2025 г.
М.П.



ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертационную работу Лосева Ильи Владимировича на тему:
«Геодинамическое районирование территории строительства подземной
исследовательской лаборатории на основе системного анализа геолого-геофизической
информации»,
по специальности 1.6.21 – «Геоэкология»**

1. Актуальность темы диссертации.

В России накоплены значительные запасы радиоактивных отходов (РАО), представляющих серьёзный риск для человека и экосистем. Наибольшую угрозу создают тепловыделяющие РАО, содержащие продукты деления, актиниды и трансурановые элементы: они относятся к I–II классам опасности, а их период полураспада превышает 10 000 лет. Ещё в 1990-е годы начались поисковые исследования, целью которых было подобрать геологические структуры, способные обеспечить надёжную изоляцию таких отходов на весь срок их радиологической опасности. Отбор альтернативных площадок требовал комплексного учёта геологических, гидрогеологических, тектонических и иных факторов; при этом нужно было найти крупный структурный блок литосферы, одновременно обладающий хорошими изоляционными свойствами и тектонической стабильностью.

Многолетние исследования показали, что данным критериям наиболее соответствует гранитогнейсовая толща Нижнеканского массива (юг Красноярского края). Здесь был выделен участок «Енисейский», выбранный под создание пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО). В 2023 г. на площадке стартовало строительство шахт подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) — обязательного этапа, предусмотренного российскими и международными нормативами, цель которого — окончательно подтвердить пригодность породного массива. Однако сведения о геодинамических условиях региона остаются неполными, поэтому необходимы дополнительные исследования для устранения этих неопределённостей.

Во всём мире для прогноза устойчивости геологических сред на горизонте более 10 тыс. лет применяется многоуровневый системный анализ больших массивов геолого-геофизических данных. Такой подход позволяет выявлять источники неопределённости, определять оптимальные способы их уменьшения и получать достоверные прогнозы, даже если объём исходной информации ограничен.

Таким образом, разработка новой методики геодинамического районирования является актуальной научной задачей. Её реализация позволит оценить устойчивость горного массива на участке «Енисейский» и повысит надёжность геоэкологического обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

2. Структура и содержание работы.

Диссертационная работа объемом 153 страницы состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 8 таблиц, 47 рисунков, список литературы из 128 наименований и 1 приложение.

Во введении автор сформулировал актуальность работы, ее цель, основные научные положения, новизну и практическую значимость результатов диссертационного исследования, а также обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

В первой главе автор последовательно рассматривает отечественную и зарубежную практику выбора участков для захоронения РАО, подчёркивая уникальность сроков изоляции (≥ 10 тыс. лет) и зависимость надёжности от геодинамической стабильности структурно-тектонического блока. Далее обобщает нормативную базу (НП, руководства по безопасности, документы МАГАТЭ) и выделяет требования к данным о неотектонике, сейсмичности, современным движениям земной коры. Затем систематизирует существующие подходы к районированию: «классический» (моделирование НДС по полям напряжений), «кинематический» (по данным ГНСС и полевых измерений), экспертно-балльный и др. Исходя из этого, вводит категорию «геодинамическая устойчивость» как интегральный критерий пригодности блока. И в конечном счете, формулирует вывод о необходимости комплексной методики, объединяющей разные типы признаков в едином системно-аналитическом контуре.

Во второй главе излагаются концептуальные основы системного анализа геопространственной информации, даётся характеристика исходного геолого-геофизического материала по району исследований, сведённого автором в ГИС-ориентированную базу, а также приводится предложенная им классификация инженерно-геологических процессов и явлений, определяющих долговременную устойчивость структурно-тектонического блока, в котором планируется размещение ПГЗРО. Системный подход трактует исследуемый объект как открытую природно-техногенную систему со собственным составом элементов, внутренней структурой их взаимосвязей, функциями, взаимодействием с внешней средой и закономерностями эволюции. Первоочередной задачей геодинамического районирования стал сбор разнородных геолого-геофизических сведений и их первичное упорядочивание в ГИС-слоях. Многообразие процессов потребовало иерархической классификации, объединяющей явления в классы и подклассы по содержательным признакам. На основе анализа существующих инженерно-геологических систем, нормативных документов и специфики задачи автор сформировал собственную схему, позволившую отобрать именно те данные, которые критичны для оценки устойчивости блока на горизонте ≥ 10 тыс. лет. Геологические процессы рассматриваются как динамические изменения в земной коре, приводящие к перемещениям, деформациям и формированию рельефа; геологические явления – фиксируемый результат таких процессов (например, разлом как следствие тектонического движения). На следующем этапе разнородные данные были формализованы в соответствии с классификацией и интегрированы в единый проект ArcGIS с написанными на Python модулями системного анализа. Эти модули обеспечивают многовариантную обработку и визуализацию как с использованием оригинальных алгоритмов ДМА, так и классических методов.

В третьей главе диссертации изложена основная методическая концепция исследования, в которой автор предлагает собственный способ геодинамического районирования. Построен алгоритм оценки геодинамической устойчивости, базирующийся на приёмах дискретного математического анализа. Шаг за шагом рассмотрены все стадии его реализации: приведение разнородных исходных данных к единому масштабу, расчёт динамических характеристик рельефа, компонентов тензоров напряжений и деформаций, а также магнитных и структурно-тектонических показателей. С применением нечеткой логики сформированы интегральные индексы геодинамической безопасности, что позволило количественно оценить устойчивость исследуемой территории и локализовать участки возможного риска. Кроме того, проведён анализ корреляционных матриц полученных признаков; он показал их взаимную независимость и информативность, что служит важным подтверждением корректности разработанной методики.

Четвёртая глава демонстрирует, как созданная методика применяется «в поле» — к площадке «Енисейский», где возводится подземная исследовательская лаборатория. На базе системного анализа геологических и геофизических исходных данных автор выполнил детальное районирование, сформировав карты интегральной меры безопасности. В соответствии с этим индикатором территорию разбили на три группы: сравнительно стабильные участки, зоны промежуточного состояния и области повышенного риска. Пространственный анализ показал, что потенциально опасные фрагменты ($\approx 9\%$ площади) приурочены главным образом к межплатформенным стыкам и участкам с резкими перепадами рельефа; самая протяжённая неустойчивая зона тянется вдоль границы Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты, совпадает с крупными разломами. Сама площадка «Енисейский» попадает в пограничную категорию (интегральный индекс 0,57–0,62), что свидетельствует о её относительно благоприятном геодинамическом положении для размещения пункта глубинного захоронения РАО.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

- полученные величины динамической активности хорошо совпадают с данными полевых геологических, геофизических и геоморфологических наблюдений;
- результаты вычислений, численного моделирования и комплексных инструментальных измерений согласуются между собой и не вступают в противоречие.

4. Достоверность и новизна выводов и рекомендаций подтверждаются тем, что:

- Созданная автором классификация геолого-геофизических сведений и их углублённый системный анализ дают возможность надёжно оценивать устойчивость геологической среды даже при дефиците исходных данных.
- Геодинамическое районирование по степени опасности при размещении РАО выполнено с применением алгоритмов дискретного математического анализа динамических показателей, которые отражают способность структурно-тектонических блоков сохранять стабильность на протяжении больших временных интервалов.
- Проведённое ранжирование участка «Енисейский» и прилегающих территорий по интегральному показателю геодинамической безопасности дало объективную

оценку длительной устойчивости площадки, выбранной под пункт глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

5. Личный вклад соискателя

Он лично участвовал в геолого-геодезических полевых кампаниях на Нижнеканском массиве, где выполнял съёмку и сбор исходной информации. Собранный материал автор самостоятельно структурировал, сформировав в ArcGIS обширную ГИС базу данных для всего массива. Им разработана собственная методика ранжирования участков по уровню геодинамической устойчивости, а также созданы соответствующие алгоритмы и программные модули, на которые получены свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности. Используя эти инструменты, соискатель подготовил комплект карт геодинамического районирования района будущего пункта глубинного захоронения РАО в Красноярском крае.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность, подтверждение публикациями автора

Рецензируемое исследование базируется на обширных модельных экспериментах; их выводы систематизированы посредством методов системного анализа пространственных геолого-геофизических данных, а все расчёты и визуализации выполнены с применением программных пакетов ArcGIS, NextGIS, QGIS и Python.

Материалы диссертации представляют собой структурированное, завершенное научное исследование.

Публикации автора достаточно полно и корректно отражают содержание диссертации. По результатам исследований 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. Диссертантом получено 6 авторских свидетельств (РИД) на базы данных и программы для ПК.

Результаты работы использованы в рамках проведения полевых работ, сформулированных в документе «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждена Генеральным директором ГК «Росатом» А.Е. Лихачевым 28.03.2018 г.).

Результаты диссертации можно рекомендовать к внедрению в предприятия отрасли обращения с РАО, а именно в организации Госкорпорации «Росатом», ФГУП «НО РАО», ФГУП НТЦ ЯРБ, Росприроднадзор, а также профильные научно-исследовательские коллективы. Также результаты работы могут использоваться на горнорудных, проектных, строительных и проектных организациях, что определяет ее хорошую практическую перспективу.

7. Замечания по диссертационной работе:

1. Расчёт интегральной меры $S_F(w)$ выполнен на двумерной сетке; вертикальная (Z-) составляющая строения массива и возможная вариативность упругих параметров с глубиной не учтены.
2. Автор упоминает ArcGIS, QGIS и Python-модули, но не приводит конкретные версии и ключевые параметры, что затрудняет воспроизведение расчётов.

3. В прогнозе устойчивости не рассмотрены техногенные деформации, которые неизбежно возникнут при проходке шахтных стволов ПИЛ и последующей тепловой нагрузке на массив.
4. На разных рисунках присутствуют различные формулировки («участок строительства», «площадка ПИЛ» и т.д.) и контуры (квадрат, прямоугольник, многоугольник) участка строительства ПИЛ. На некоторых рисунках эти контуры вообще никак не подписаны. Это вызывает недопонимание у читателя. Лучшим решением было бы вынесение на все рисунки контура действующей на момент написания работы лицензии с указанием её номера.
5. На рисунках 2.6. и 2.9 не хватает элементов оформления – масштаба, рамки и др. Ко многим рисункам условные обозначения приводятся не в полном объёме (рисунки 2.7, 4.2 и др). Автору в целом следовало аккуратнее оформлять графический материал.
6. В подписи к рисунку 2.8 допущена явная опечатка: Геологическая карта района, О.А. Морозов, **2011** [Морозов и др., 2019]
7. На стр. 58 «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]». Спорное утверждение. Следовало бы сформулировать в следующем виде: «Считается, что *некоторые* линеаменты *могут быть* связаны...».
8. На стр. 63 «Согласно исследованиям, размер зоны динамического влияния Приенисейского разлома может быть оценен до 6 км.». Не хватает ссылки на источник информации.
9. Первое защищаемое положение не чувствуется вполне доказанным. Это, прежде всего, недостаток его формулировки, в которой стоило бы сделать упор на базу данных и составленную автором классификацию, как основу для будущего проведения анализа устойчивости геологической среды. Исходя из авторской формулировки, читатель ожидает (несмотря на пояснения автора в тексте) готовой оценки устойчивости в конце Главы 2.
10. В Главе 4 автор указывает, что «Основным материалом для их разработки послужили - карта активных тектонических разломов, разработанная геологами ФГУП «ГХК» [Андерсон, 2011], и неотектоническая схема Р.М. Лобацкой [Лобацкая, 2005]» (стр. 103). Но судя по изображениям, приведённым далее, вторым источником служила не схема Р.М. Лобацкой, а Сводная схема разрывных нарушений, разработанная в ИГЕМ РАН [Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Минаев В.А., Устинов С.А., Шевчук Р.В. Геодинамическая модель северной части Нижнеканского массива: разломная тектоника, деформации, изоляционные свойства пород // Доклады Академии наук. – 2022. – Том 507. – №1. – С. 67-74. DOI: 10.31857/S2686739722601399]. Материалы из [Лобацкая, 2005], конечно же, использовались при подготовке схемы ИГЕМ РАН, но сами схемы значительно разнятся.

Приведенные замечания имеют редакционный характер и не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой работы.

Диссертационная работа Лосева Ильи Владимировича выполнена на высоком научном уровне, отличается актуальностью, новизной и перспективностью практической

реализации. Достоверность полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Автореферат диссертации в полной мере раскрывает её основные положения. В публикациях отражено основное содержание диссертации.

Диссертация Лосева Ильи Владимировича соответствует требованиям «Положения НИТУ МИСИС о присуждении ученых степеней» и паспорту специальности 1.6.21 – «Геоэкология», а сам автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Лосева Ильи Владимировича заслушан и обсужден на заседании лаборатории геоинформатики, протокол № 1 от 04.06.2025 г.

Отзыв подготовлен:

Кандидат геолого-
минералогических наук,
заведующий лабораторией



Минаев Василий Александрович

Кандидат геолого-
минералогических наук,
заведующий лабораторией



Устинов Степан Андреевич

Согласен на обработку персональных данных



Минаев В.А.

Согласен на обработку персональных данных



Устинов С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)

Адрес организации 119017, Москва, Старомонетный пер., 35

Телефон: +7 (495) 951-45-79

E-mail: director@igem.ru

4 июня 2025 года

