

На правах рукописи



Ахметшин Тагир Рустэмович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ
И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ОЦЕНКИ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ
В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2022

Работа выполнена на кафедре систем автоматизированного проектирования вычислительных средств федерального бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: **Минаев Владимир Александрович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий Федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя», г. Москва

Официальные оппоненты: **Дорофеев Николай Викторович,** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления и контроля в технических системах Муромского института (филиала) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Мокшанцев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры информационных технологий Учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий Академии государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск

Защита диссертация состоится «29» июня 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 при ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. Р. Ф. Уткина» <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу университета: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.211.02.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.02,
доктор технических наук, доцент



Д. А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задачи управления рисками, в особенности рисками геодинамического происхождения на территориях с нефтегазовыми комплексами (НГК) весьма актуальны в России и за ее пределами.

Особую значимость задачи управления геодинамическими рисками приобрели в настоящее время, когда количество аварий и катастроф, связанных с природно-техногенными процессами геодинамического происхождения, порой совершенно нелогичных, даже абсурдных с точки зрения современных научно-технических норм и правил, с каждым годом только возрастает.

Сложность решения указанных задач состоит в том, что непосредственно управлять геодинамическими рисками не представляется возможным. Их можно только оценить, а затем предпринять конкретные меры по снижению последствий проявления опасных геодинамических процессов, вызывающих указанные риски. Именно эти меры позволяют обосновывать управленческие решения по освоению и развитию территории с размещённым на ней нефтегазовым комплексом.

Смоделировать геодинамический риск натурно – сложнейшая техническая задача, сегодня нерешаемая, именно поэтому в диссертации рассматривается математический подход к моделированию геодинамических рисков, перспективные направления которого сегодня обсуждаются учеными, о чем свидетельствуют многочисленные публикации.

Всё это подтверждает актуальность задач управления геодинамическими рисками, в частности, в применении к территориям с нефтегазовыми комплексами, имеющим особую значимость для государств, располагающих большими запасами углеводородов.

Кроме того, для безопасного и оптимального функционирования топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России в современных условиях необходима разработка принципиально новых математических методов поиска и разведки нефтегазоносных бассейнов, что ещё более актуализирует тему диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. К настоящему моменту времени разработан определенный спектр математических моделей, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих изучать геодинамические риски.

При выполнении исследований автор опирался на результаты отечественных и зарубежных ученых: в области математического моделирования, численных методов и их прикладного применения – Р. Беллмана, В.Н. Буркова, В.В. Власова, Л.А. Демидовой, В.И. Кейлис-Борока, А.И. Лурье, А. Лява, Н.И. Мухелишвили, Д.Н. Новикова, А.А. Самарского, И.Н. Снеддона, М. Сугено, Т. Тэрано, Ф. Хейта, С.Д. Штовба, Н.Г. Ярушкиной; в области теории геодинамических процессов – Е.В. Артюшкова, В.М. Кутепова, В.А. Магницкого, В.И. Осипова, Н.Н. Радаева, Г.А. Соболева; в области при-

кладного анализа и прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций – В.А. Акимова, В.Ф. Протасова, А.Л. Рагозина и многих других ученых.

В рамках решения задач оценки геодинамического риска на различных по геологическому строению территориях этими вопросами занимались Абрамова А. В., Ананьин И. В., Бондарь К. М., Кираковский В.В., Корячко А.В., Минаев В. А., Топольский Н.Г., Фаддеев А. О.; при моделировании геодинамических рисков в строительстве – Мокшанцев А. В., Пылькин А. Н., Шевченко Л. В.; оценке геодинамической безопасности территорий – Степанов Р. О., Трубников Б. Н., Шеко А. И. В ряде работ затронуты вопросы управления геодинамическими рисками – Данилов Р. М., Павлова С. А. и ряд других ученых.

Результаты реализации моделей связаны как с решением глобальных задач исследования геодинамических рисков, в частности, их количественной оценки на различных по геологическому строению территориях, так и задач моделирования геодинамических рисков в строительстве, оценки геодинамической безопасности территорий.

Однако существующие математические модели, методы и алгоритмы оценки геодинамических рисков не позволяют в полной мере решать задачи управления геодинамическими рисками на территориях с НГК, поскольку применительно к ним возникают дополнительные, существенно значимые требования по обеспечению геодинамической безопасности.

В частности, существующие математические модели, методы и алгоритмы не могут быть использованы для качественного решения таких задач, как оценка риска повреждения или разрушения промышленных и иных промышленно-хозяйственных объектов нефтегазового комплекса, сетей инженерных и транспортных коммуникаций, относящихся к инфраструктуре НГК, оценка риска неверного принятия решения по территориальной привязке районов нефтегазового промысла, оптимального размещения объектов НГК, а также для решения многих других задач управления, возникающих при развитии территорий с нефтегазовыми промыслами.

Все это требует интенсификации разработки соответствующих математических моделей, вычислительных методов и программных средств их реализации.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи – разработке современных математических моделей, вычислительных методов и программных средств оценки геодинамических рисков и управления ими с целью обеспечения безопасности территорий с НГК от возможных проявлений геодинамических угроз.

Объектом исследования являются территории нефтегазовых комплексов, подверженные воздействию опасных природно-техногенных процессов геодинамического происхождения.

Предмет исследования составляют математические модели, численные методы и программные средства оценки геодинамических рисков и поддержа-

ки управленческих решений по обеспечению безопасности развития нефтегазовой отрасли.

Цель диссертационного исследования – повышение эффективности управленческих решений по обеспечению безопасного развития нефтегазовой отрасли на основе математических моделей, численных методов и комплекса программных средств оценки геодинамических рисков.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие **задачи**:

1 Проанализировать современные математические модели состояния геологической среды территориально распределённых систем, позволяющие оценивать многофакторные риски от проявления в них опасных геодинамических процессов.

2 Разработать и апробировать комплекс математических моделей и программ оценки геодинамического риска на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы.

3 Построить модели управления геодинамическим риском на территориях с нефтегазовым комплексом.

4 Разработать метод формализованного представления рисков геодинамического происхождения, численный метод блочной риск-классификации объектов территорий, содержащих нефтегазовые комплексы, а также численный метод оценки геодинамического риска.

5 Практически реализовать математические модели оценки геодинамического риска, модели управления геодинамическим риском для территорий с нефтегазовыми комплексами в виде программно-алгоритмических средств, а также выполнить практическую реализацию метода формализованного описания и численного метода блочной риск-классификации объектов территорий с нефтегазовым комплексом, численного метода оценки геодинамического риска и представить результаты расчётов в виде оценочно-прогностических карт геодинамического риска, схем, таблиц и диаграмм.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы методы теории дифференциальных уравнений, механики сплошных сред, математической физики, теории нечётких множеств, математического анализа и линейной алгебры, математической статистики и теории вероятностей, численные методы сплайн-аппроксимации, спектрального Фурье-анализа.

Научная новизна и теоретическая значимость. Создан комплекс новых математических моделей, численных методов и программных средств, позволяющих оценивать, анализировать и прогнозировать геодинамические риски на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы. Предложен и обоснован численный метод оценки геодинамического риска, основанный на расчётах специального математического индикатора геодинамического риска, представляющего собой пространственное распределение значений ротора полного вектора смещений в геологической среде, показывающего, что эпицентры сейсмических событий концентрируются в областях его наи-

больших значений. Также выявлен индикатор повышенного сейсмического риска, показывающий, что наибольшая концентрация эпицентров землетрясений и наибольший вероятностный геодинамический риск приходятся на территорию, где наблюдается взаимное пересечение вихревых структур, отражающих горизонтальные напряжения в литосфере Земли.

Новые научные перспективы открывает предложенный принципиально новый геодинамический индикатор (индикаторное поле), дающий возможность по косвенным, математически вычисляемым признакам идентифицировать тот или иной район Земного шара как нефтегазоносный: нефтегазоносные месторождения с наибольшей вероятностью размещаются на границах левовращающихся вихревых структур в литосфере, что подтверждают расчеты по регионам Земного шара, где имеются нефтегазоносные зоны.

Практическая значимость результатов работы заключается в прикладной направленности разработанных математических моделей, численных методов и программных средств на реализацию количественных оценок и прогнозирование геодинамических рисков на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы.

Обоснованные и предложенные в работе математические и геодинамические индикаторы могут быть использованы для решения задач оценки риска повреждения или разрушения промышленных и иных промышленно-хозяйственных объектов НГК, сетей инженерных и транспортных коммуникаций, относящихся к его инфраструктуре, риска принятия неверного управленческого решения по территориальной привязке нефтегазового промысла, а также риска неверного территориального размещения его объектов без учёта пространственного распределения зон геодинамических аномалий и зон возможного развития опасных процессов геодинамического происхождения.

Практическая реализация метода формализованного представления рисков геодинамического происхождения, основанного на нечётких отношениях, численного метода блочной риск-классификации объектов нефтегазовых комплексов, позволяют выполнять оценочную идентификацию объектов НГК на предмет их рисковости, ранжировать природные, техногенные и антропогенные процессы по степени их воздействия на конкретные объекты НГК, а также оценивать интегральные риски для объектов нефтегазовых комплексов.

Модель и алгоритм оптимального размещения объектов с точки зрения их комплексной безопасности (в том числе – геодинамической) на территории с НГК, возможно использовать не только для разработки проектов планировочных решений, но также применять для оценки управления освоением и развитием территорий, содержащих нефтегазовые комплексы.

Полученные результаты ориентированы на информационную поддержку государственных и муниципальных органов управления при принятии решений в области хозяйственной и изыскательской деятельности, при разработке программ и планов развития безопасности среды обитания, в том числе – антитеррористической безопасности.

Реализация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность Уфимского государственного нефтяного технического университета и Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, а также в практическую деятельность научно-исследовательского и проектного института «ПЕГАЗ». Акты о внедрении результатов работы представлены в Приложениях к диссертации.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1 Комплекс математических моделей, методов и программно-алгоритмических средств оценки, анализа и прогнозирования геодинамического риска на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы. Отличительной особенностью разработанных моделей, методов и программно-алгоритмических средств является возможность по математически вычисляемым признакам идентифицировать тот или иной район Земного шара как нефтегазоносный.

2 Модель и алгоритм поддержки управления геодинамическим риском, методически реализуемые в виде процедуры оптимального размещения объектов на территории с нефтегазовым комплексом, характеризующегося минимально возможным комплексным геодинамическим риском.

3 Метод формализованного представления комплексного риска геодинамического происхождения для объектов нефтегазовых комплексов, а также численный метод блочной риск-классификации территорий, содержащих нефтегазовые комплексы.

4 Численный метод оценки геодинамического риска, а также принципиально новый геодинамический индикатор, позволяющий идентифицировать расположение нефтегазоносных месторождений.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и одобрены на: Международной конференции «Геометрические методы в теории управления и математической физике» (г. Рязань, РГУ имени С. А. Есенина, 25-28 сентября 2018 г.); XXVII Международной научно-технической конференции «Системы безопасности» – 2018» (г. Москва, Академия ГПС МЧС РФ, 29 ноября 2018 г.); XXIII Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, РГРТУ, 13 декабря 2018 г.); Международной научной конференции Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета и Научно-исследовательского центра физико-технической информатики (СРТ2019) (13 – 17 мая 2019, Царьград, Московская область, Россия); XXVIII Международной научно-технической конференции «Системы безопасности» – 2019» (г. Москва, Академия ГПС МЧС РФ, 28 ноября 2019 г.); межкафедральном научном семинаре в Рязанском государственном радиотехническом университете (2020-2021 г. г.).

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 8 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобр-

науки России, 1 работа – в издании, входящем в базу данных RSCI на платформе Web of Science, 1 зарегистрированная программа для ЭВМ.

В работах, опубликованных в соавторстве, автором лично выполнены:

- теоретическое обоснование и практическая реализация методики оценки геодинамического риска на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы в виде численного метода и компьютерной программы;
- теоретическое обоснование и практическая реализация математической модели и алгоритма управления геодинамическим риском на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы;
- разработка методов формализованного описания объектов нефтегазовых комплексов и воздействий на них, риск-классификации объектов нефтегазовых комплексов, а также численного метода решения задач поддержки управления геодинамическими рисками на территориях, содержащих нефтегазовые комплексы;
- численные оценки и расчёты геодинамических рисков для территорий, содержащих нефтегазовые комплексы.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Структура и объем диссертационного исследования. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основной текст работы содержит 152 страницы, включая 64 рисунка и 6 таблиц. Список литературы включает 223 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку объекта, предмета, цели и задач работы, основные положения, выносимые на защиту, и методы, использованные в исследовании. Показана теоретическая значимость, научная новизна и практическая ценность основных результатов проведенных исследований. Приведены сведения об апробации и внедрении работы, публикациях и личном вкладе автора, соответствии диссертации паспорту специальности.

В первой главе раскрываются виды рисков и особенности их проявления применительно к объектам НГК.

Мало исследованными в отношении объектов НГК являются риски, связанные с проявлением опасных процессов геодинамического происхождения.

Осуществленные в диссертационной работе оценка указанных рисков, разработка методов поддержки управления ими, а также создание принципиально новых модели и метода поиска нефтегазоносных бассейнов крайне необходимы для безопасного и устойчивого функционирования нефтегазового сектора ТЭК России в современных условиях. Решение обозначенных задач возможно только в рамках комплексного подхода, учитывающего всю систему взаимодействующих факторов, определяющих развитие НГК России.

Подчеркнуто, что одними из наиболее значимых геодинамических угроз, представляющих собой факторы формирования рисков в НГК, являются «медленные» катастрофы, включающие такие опасности как землетрясения, криповые подвижки, карстово-деформационные процессы, оползни, провалы, проседания. Особенности воздействия этих угроз на объекты НГК состоят в том, что они влияют не только на технологическое состояние геологической среды, сооружения, сети, коммуникации, но и на психические и медико-биологические показатели персонала, находящегося на территории нефтегазовых комплексов.

Показано, что при управлении рисками геодинамического характера на территориях НГК возникают четыре основных задачи: оценка безопасности территории, оценка состояния геологической среды, мониторинг состояния объектов и их риск-классификация. Все перечисленные задачи тесно связаны между собой, требуя для своего решения использование методов математического моделирования.

В этой связи рассмотрен и детально проанализирован комплекс математических моделей оценки состояния геологической среды территориально распределённых систем. Сделан вывод: несмотря на многообразие модельных разработок, существует необходимость в создании математических моделей, позволяющих оценивать не только многофакторные риски от проявления опасных эндогенных геологических процессов, но и риски, связанные с задачами управления и обеспечения безопасности не только для территорий нефтегазового промысла регионального уровня, но и для подобных территорий районного и локального масштабного уровней.

Под *геодинамическим риском* понимается предполагаемый негативный результат или одна из реализуемых негативных возможностей взаимодействия геологической или инженерно-геологической среды с природным, природно-техногенным или антропогенным объектом, а также группой таких объектов. Геодинамический риск представляет собой вероятностную величину, значения которой принадлежат отрезку $[0; 1]$.

Модели оценки геодинамических рисков подразделяются на детерминированные, вероятностные и модели, основанные на использовании математического аппарата нечётких множеств.

Наиболее эффективны *детерминированные трёхмерные модели*, ориентированные на оценку геодинамических рисков для достаточно протяжённых территорий регионального масштаба. Однако они не всегда корректно рабо-

тают на меньших по площади территориях вследствие разреженности данных о полях различных геодинамических аномалий.

Подобных недостатков лишены *вероятностные модели* оценки сейсмического риска. Предполагается, что последовательность геодинамических состояний геологической среды некоторой территории представляет собой простейший поток однородных событий, удовлетворяющий условиям независимости, однородности и ординарности.

Используя дифференциальные уравнения Колмогорова, описана динамика вероятностей $p_k(t)$ трёх состояний:

$$\begin{cases} p_1'(t) = -\alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{31}p_3(t), \\ p_2'(t) = -\alpha_{23}p_2(t) + \alpha_{32}p_3(t), \\ p_3'(t) = \alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{23}p_2(t) - (\alpha_{31} + \alpha_{32})p_3(t). \end{cases} \quad (1)$$

Состояния геологической среды определяются следующим образом. Предполагается, что в некоторый момент времени t_0 геосреда обладает некоторым энергетическим параметром E_0 , отражающим опасные геологические процессы (ОГП).

Тогда *состоянием 1* назовем такое состояние геосреды, при котором $\Delta E_1 = E_1 - E_0 \rightarrow 0$, т.е. она находится в равновесном устойчивом состоянии (E_1 – энергетический параметр ОГП в момент времени t_1).

Состоянием 2 назовем состояние, при котором геосреда находится в неустойчивом неравновесном состоянии, т.е. $\Delta E_2 = E_2 - E_1 \neq 0$ (E_2 – энергетический параметр ОГП в момент времени t_2).

Состоянием 3 назовем квазиравновесное состояние, при котором геосреда $\Delta E_3 = E_3 - E_1 \neq 0$, причем $\Delta E_1 < \Delta E_3 \ll \Delta E_2$ (E_3 – энергетический параметр ОГП в момент времени t_3).

Величины α_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) физически представляют собой сумму энергетических параметров процессов, протекающих в геосреде, окончание которых приводит к ее переходу из состояния i в состояние j .

Однако к территориям, значительно неоднородным в тектоническом отношении, применение детерминированных и вероятностных моделей также не всегда оправдано по причине неопределенности данных.

Поэтому для такого рода случаев в работе осуществлено применение *моделей, основанных на математическом аппарате нечётких множеств*. При формировании базы правил системы нечёткого вывода в качестве входных переменных используются характеристики геосреды, полученные на основании экспертного анализа макросейсмических и других данных по землетрясениям, так и информация о напряжениях и смещениях, рассчитанных с помощью детерминированных и вероятностных математических моделей.

Во второй главе обоснована и построена глобальная математическая модель оценки геодинамических рисков. Ее граничные условия представлены в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \tau_{xy}(x, y, h) = \mu(x, y, h)\varepsilon_{xy}(x, y, h), \\ \sigma_z(x, y, 0) + \delta\rho g u_z(x, y, 0) = \rho_s(x, y)\Delta g_u(x, y)H(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где σ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ_{xy} – сдвиговые горизонтальные напряжения в плоскости XY ; ε_{xy} – сдвиговые горизонтальные деформации в плоскости XY ; τ_{xz} – сдвиговые вертикальные напряжения в плоскости XZ (в плоскости YZ условия для вертикальных сдвиговых напряжений аналогичны для плоскости XZ); u_z – вертикальные смещения в геологической среде; $\delta\rho$ – скачок плотности на границе раздела земная кора – литосферная мантия (на границе Мохо); ρ – значение плотности на соответствующей глубине и в точке с координатами (x, y) ; $\Delta g_u(x, y)$ – значение аномалии гравитационного поля в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ – глубина залегания границы Мохо; g – ускорение свободного падения, которое принимается постоянным для любой точки (x, y, z) модельного пространства; h – толщина модельного пространства, $\rho_s(x, y)$ – плотность геологической среды в точке с координатами (x, y) , вычисляемая из соотношения $\rho_s(x, y) = \int_0^H \rho(x, y, z) dz$.

Первое уравнение системы (2) – это условие о наличии значительных сдвиговых горизонтальных напряжений на верхней границе модели (вблизи дневной поверхности Земли). Второе – условие влияния возмущений от распределённой «нагрузки» на нижней границе модели (границе Мохо). Третье и четвёртое – отражают отсутствие вертикальных сдвиговых напряжений на верхней и нижней границах модельного пространства.

Выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений строились, основываясь на системе уравнений (2) и известных соотношениях для k -ой гармоники, принятых в научной литературе, посвящённой оценке геодинамического риска:

$$\begin{cases} \sigma_z^{(k)}(x, y, z) = k^2 \left\{ \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] shkz + \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ u_z^{(k)}(x, y, z) = \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] shkz + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xy}^{(k)}(x, y, z) = -k_x k_y \left\{ [k(B + Dz) + C] shkz + [k(A + Cz) + D] chkz \right\} \sin k_x x \sin k_y y, \\ \tau_{xz}^{(k)}(x, y, z) = k k_x \left\{ \left[k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \left[k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \end{cases} \quad (3)$$

где $k_x = \frac{\pi m}{a}$; $k_y = \frac{\pi n}{b}$; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ (m, n – порядковые номера гармоник по осям X и Y , соответственно; a – длина модельного пространства (по оси X); b – ширина модельного пространства (по оси Y); A, B, C, D – неизвестные коэффициенты, определяемые из условий математической модели (2), и входящие в бигармоническую функцию вида:

$$\varphi = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \{(A_{mn} + D_{mn}z)sh(kz) + (B_{mn} + C_{mn}z)ch(kz)\} \cos k_x x \cos k_y y. \quad (4)$$

После нахождения неизвестных коэффициентов, преобразований и упрощений, в работе получены выражения для составляющих вектора смещений $u_x(x, y, z)$, $u_y(x, y, z)$ и остальных компонент тензора напряжений:

$$\begin{aligned} u_x^{(k)}(x, y, z) &= \frac{k_x}{2\mu} \{ [k(B + Dz) + C]shkz + [k(A + Cz) + D]chkz \} \sin k_x x \cos k_y y, \\ u_y^{(k)}(x, y, z) &= \frac{k_y}{2\mu} \{ [k(B + Dz) + C]shkz + [k(A + Cz) + D]chkz \} \cos k_x x \sin k_y y, \\ \sigma_x^{(k)}(x, y, z) &= \left\{ \left[kk_x^2(B + Dz) + C \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] shkz + \left[kk_x^2(A + Cz) + D \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] chkz \right\} \times \\ &\times \cos k_x x \cos k_y y, \\ \sigma_y^{(k)}(x, y, z) &= \left\{ \left[kk_y^2(B + Dz) + C \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] shkz + \left[kk_y^2(A + Cz) + D \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] chkz \right\} \times \\ &\times \cos k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{yz}^{(k)}(x, y, z) &= kk_y \left\{ \left[k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \left[k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \cos k_x x \sin k_y y. \quad (5) \end{aligned}$$

Учтена и кривизна поверхности планеты Земля путем построения приближённой рекуррентной формулы, позволяющей определить длину дуги в 1 градус по меридиану и, соответственно, длину профиля в меридиональном направлении.

$$L_{\text{мер.}}(\varphi) = L_{\text{мер.}}(0^\circ) + \varphi \cdot \frac{L_{\text{мер.}}(70^\circ) - L_{\text{мер.}}(0^\circ)}{70^\circ}, \quad (6)$$

где φ – широта местности, $L_{\text{мер.}}(\varphi)$ – длина дуги в 1 градус по меридиану на конкретной широте φ .

Длина дуги в 1 градус по параллелям находилась в соответствии с известным приближённым соотношением:

$$L_{\text{пар.}} = L_{\text{эkv.}} \cdot \cos(\varphi), \quad (7)$$

где $L_{\text{пар.}}$ – длина дуги в 1 градус по параллели, $L_{\text{эkv.}}$ – длина дуги в 1 градус по экватору.

Используя соотношения (2) – (7), во всём объёме литосферы восстановлены поля напряжений и смещений, соответствующие упругой модели, учитывающей пространственные вариации упругих модулей, поскольку величины λ и μ входят в выражения для компонент тензора напряжений и состав-

ляющих вектора смещений. Зная величины составляющих полного вектора смещений в геологической среде, сдвиговые деформации $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{xy}$ в плоскостях XZ, YZ, XY определяются, соответственно, из соотношений:

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_{xz} &= \frac{1}{\mu} \tau_{xz}, & \gamma_{yz} &= \frac{1}{\mu} \tau_{yz}, & \gamma_{xy} &= \frac{1}{\mu} \tau_{xy}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

и затем уже строится поле скоростей этих деформаций.

Для выявления геодинамического индикатора нефтегазоносных районов проведен анализ целого ряда характеристик, позволяющих количественно оценивать интенсивность геодинамических процессов. Выявлено, что *наиболее устойчивое соответствие расположения нефтегазоносных районов наблюдается для левосторонних циркуляций векторов скоростей горизонтальных сдвиговых деформаций* (рисунок 1). Таким образом, используя разработанную модель, предложен принципиально новый геодинамический индикатор, позволяющий по математически вычисляемым признакам идентифицировать тот или иной район Земного шара как нефтегазоносный.

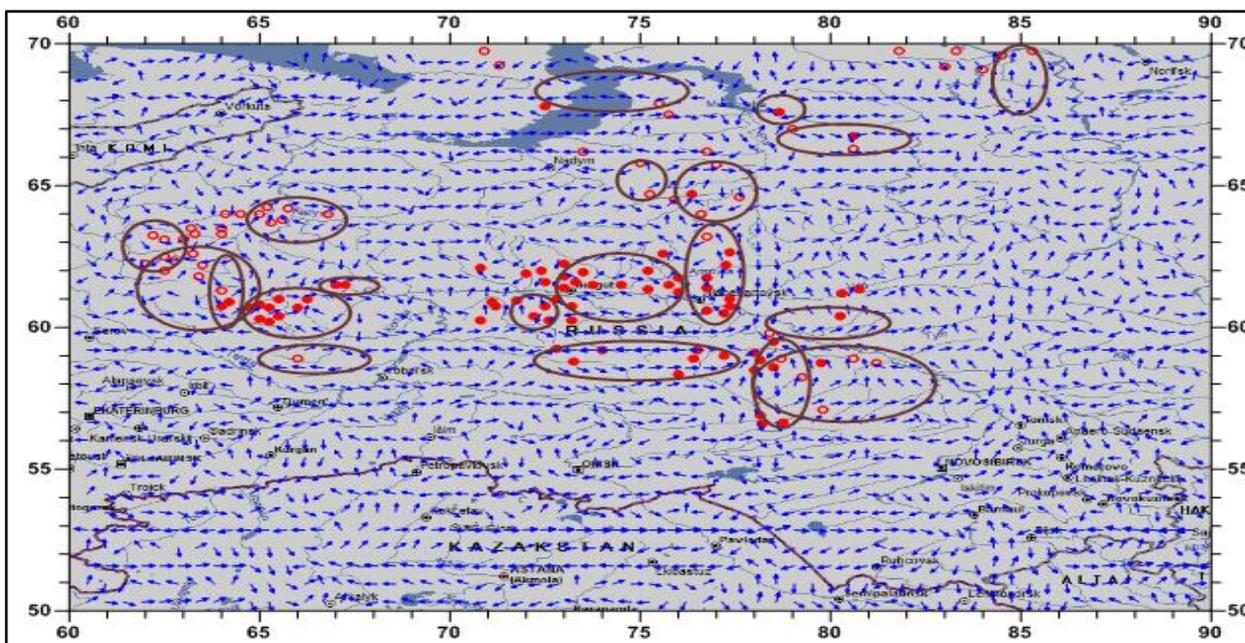


Рисунок 1 – Распределение нефтяных (красные круги) и газовых (красные окружности) месторождений на территории Западной Сибири. Эллипсами коричневого цвета обозначены области левосторонней циркуляции векторов скоростей горизонтальных сдвиговых деформаций. Глубина 3 км.

Разработан новый численный метод оценки геодинамического риска, основанный на использовании количественного математического индикатора, физически представляющего собой пространственное распределение значений ротора полного вектора смещений в геологической среде.

С помощью модели, реализованной автором в программном комплексе «Индикатор» в среде программирования Borland Delphi 7.0, также показано, что *эпицентры сейсмических событий концентрируются в областях наи-*

больших значений модуля ротора полного вектора смещений в геологической среде – $rot\vec{U}$ (рисунок 2).

Предложенные индикаторы могут быть использованы для решения задач оценки риска повреждения или разрушения промышленных и иных промышленно-хозяйственных объектов, сетей инженерных и транспортных коммуникаций, относящихся к инфраструктуре НГК, а также риска неверного принятия решения по отождествлению территории как района нефтегазового промысла.

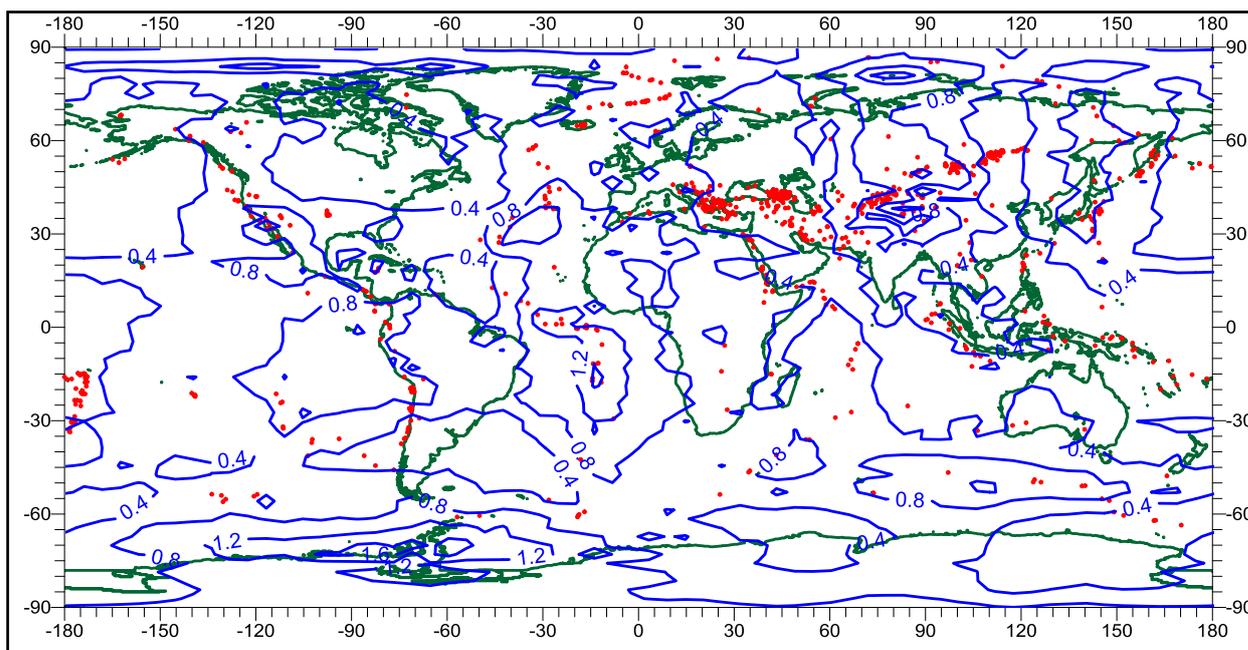


Рисунок 2 – Распределение ротора полного вектора смещений в геологической среде и эпицентры землетрясений, произошедших в период времени 1914 – 2014 г. г.

Таким образом, в работе обоснована и предложена новая глобальная математическая модель оценок геодинамического риска, геодинамических напряжений, смещений и деформаций в литосфере, отличающаяся от существующих учётом значительных горизонтальных сдвиговых напряжений в верхних слоях литосферы, а также представлены результаты расчётов новых индикаторов риска и идентификации нефтегазовых бассейнов, выполненных с помощью модели.

Во второй главе также предложен метод оценки взаимодействия природных, техногенных и антропогенных процессов в среде НГК на основе нечеткой модели. Он позволяет ранжировать природные, техногенные и антропогенные процессы по степени их воздействия на конкретные объекты НГК, оценить их интегральную рисковую устойчивость.

На рисунке 3 приведены интегральные риски для объектов НГК, а на рисунке 4 интегральные риски от природных, техногенных и антропогенных процессов, соответственно.

Значения интегральных рисков на рисунках 3, 4 представлены в убывающем порядке. Так, наибольшему риску подвержены медицинские учреж-

дения, предприятия торгово-бытовой сферы и жилые здания (гостиницы, общежития) (0.7 и более), наименьшему риску - энергетические станции, транспортные магистрали и складские помещения (0.5 и менее).

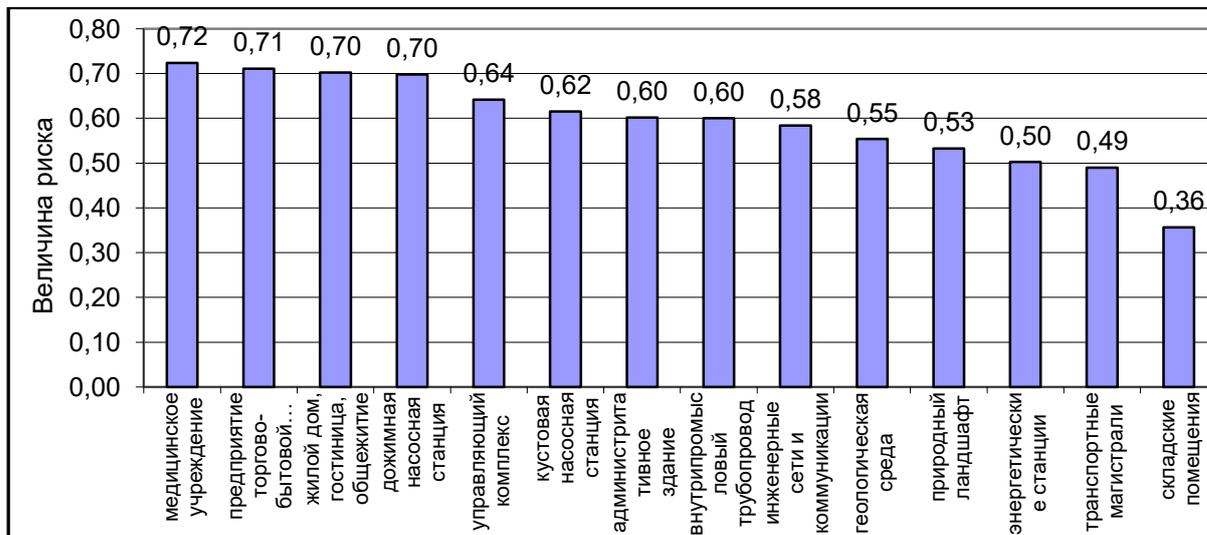


Рисунок 3 – Значения интегрального риска для различных объектов НГК

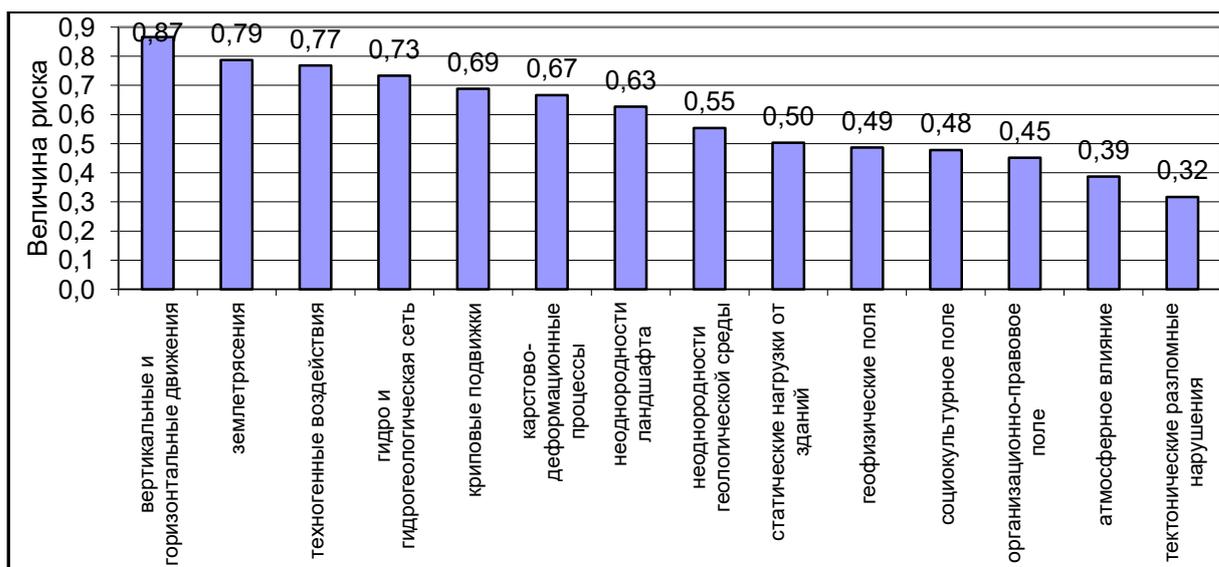


Рисунок 4 – Значения интегрального риска от различных природных, техногенных и антропогенных процессов

Наиболее опасными для объектов НГК являются вертикальные и горизонтальные движения на поверхности, землетрясения, техногенные воздействия, гидро- и гидрогеологическая сеть (более 0.7), наименее опасными – атмосферное влияние (климатические факторы) и тектонические разломные нарушения геологической среды (менее 0.4).

В третьей главе реализована модель поддержки управленческих решений по развитию территории НГК, основанная на авторском численном методе блочной риск-классификации территорий, содержащих НГК, и методе нечёткой кластеризации объектов, что позволяет обосновывать и разрабатывать стратегии управления территориальными системами.

Задача состоит в рассмотрении перемещений объектов по участкам-таксонам территории с НГК, которые за счет опасных (или повышенных) значений рисков требуют изменения местоположения зданий и сооружений на участки-таксоны с более безопасными значениями риск-состояний.

При этом комплекс природных, техногенных и антропогенных воздействий, проявляющихся в пределах каждого участка-таксона исследуемой территории, включает следующие группы: природные геологические процессы (ПП), особенности ландшафтно-геологического воздействия (ОЛГВ), природные физические поля (ПФП), техногенное воздействие (ТВ), антропогенное воздействие.

Каждый из таксонов-участков отнесён к одному из следующих классов: q_1 – «безопасный таксон» (риск $r < 0.2$); q_2 – «слабо опасный таксон» ($0.2 \leq r < 0.3$); q_3 – «умеренно опасный таксон» ($0.30 \leq r < 0.45$); q_4 – «опасный таксон» ($0.45 \leq r < 0.60$); q_5 – «значительно опасный таксон» ($0.6 \leq r < 0.8$); q_6 – «чрезвычайно опасный таксон» ($0.8 \leq r \leq 0.9$); q_7 – «катастрофически опасный таксон» ($r > 0.9$).

Кластеризация территории с НГК производилась на основе метода нечёткой кластеризации с помощью алгоритма нечётких с-средних (FCM-алгоритма).

В таблице 1 приведены признаки, характеризующие объекты НГК и использованные при нечёткой кластеризации.

Таблица 1 – Признаки объектов на территории с НГК

№	Объекты и их признаки	№	Объекты и их признаки
1.	Здания и сооружения	2.2	Электромагнитное поле
1.1	Техногенное влияние	2.3	Акустические шумы
1.1.1	Статические нагрузки	2.4	Тепловое поле
1.1.2	Вибрации	2.5	Инфразвуковое давление
1.1.3	Электромагнитное излучение	2.6	Атмосферное загрязнение
1.1.4	Акустические шумы	3.	Гидро- и гидрогеологическая сети
1.1.5	Тепловое поле	3.1	Трещиноватость геосреды
1.1.6	Радиационное излучение	3.2	Водонасыщенность территории
1.1.7	Инфразвуковое давление	4.	Геологическая среда
1.1.8	Атмосферное загрязнение	4.1	Градиентные параметры
1.2	Техническое состояние	4.1.1	Градиенты топограф. рельефа
1.2.1	Состояние фундамента	4.1.2	Градиенты плотн.неоднородностей
1.2.2	Состояние стен	4.2	Геофизические поля
1.2.3	Состояние межэтажных перекрытий	4.2.1	Геодинамические деформации
1.2.4	Состояние крыши	4.2.2	Природное инфразвуковое давление
1.2.5	Состояние окон	5.	Климатические факторы
1.2.6	Состояние коммуникаций	5.1	Количество солнечных дней в году
2.	Транспортные магистрали	5.2	Количество осадков за год
2.1	Вибрации		

На рисунке 5 представлена риск-классификация территории с НГК по уровням комплексного риска.

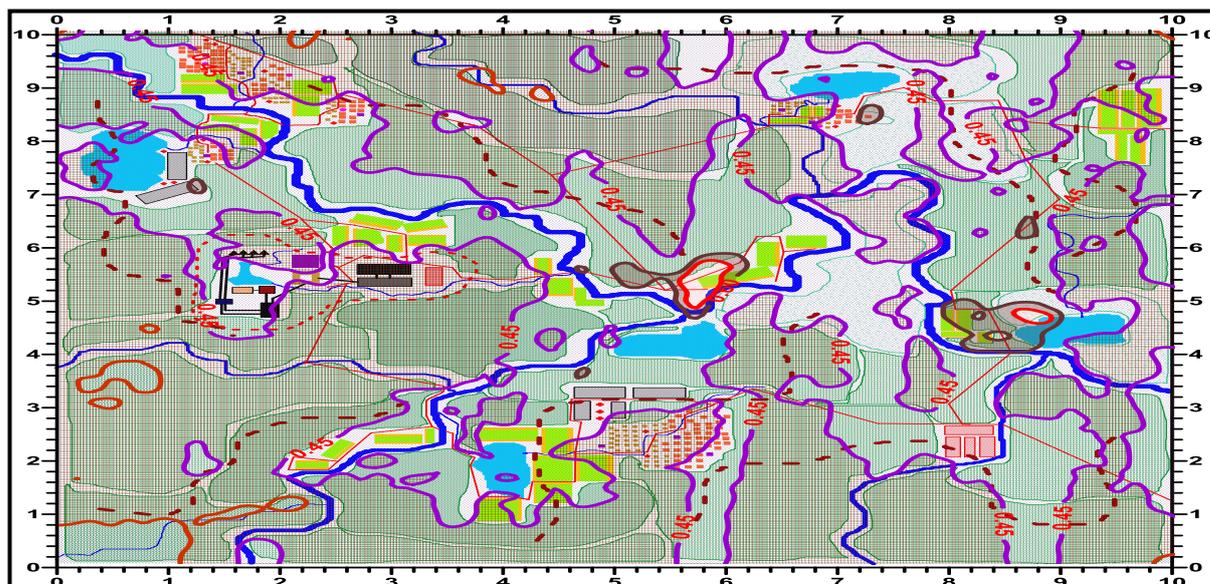


Рисунок 5 – Риск-классификация исследуемой территории с НГК по уровням комплексного риска

На рисунке 6 представлено итоговое распределение территории с НГК по зонам риска (незначительный, умеренный, значительный, сильный) в процентах. Соответствующая карта риск-классификации важна с точки зрения принятия стратегических решений по освоению и развитию территории с НГК.

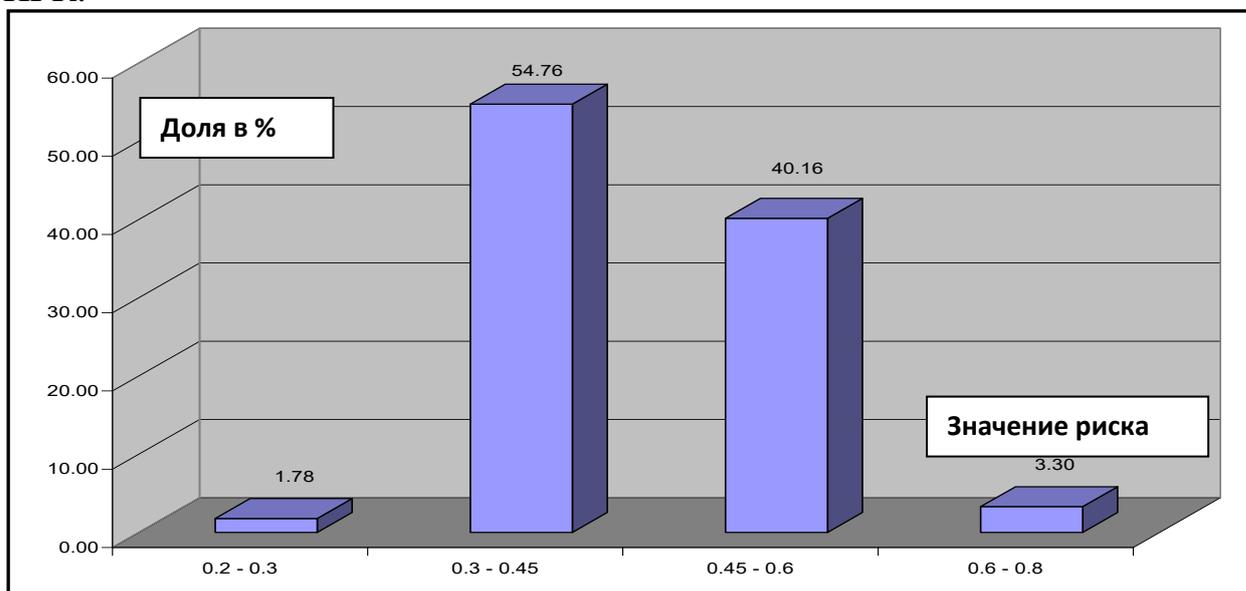


Рисунок 6 – Распределение территории с НГК по зонам риска, %.

Таким образом, в главе представлены методические подходы к решению задач управления геодинамическими рисками на НГК и прилегающих к ним территориях, основанные на совместном использовании метода нечёткой кластеризации и численного метода блочной риск-классификации. Разработаны и предложены новые модель и алгоритм оптимального размещения планируемых строительных объектов на территории с НГК.

В **заключении** рассмотрены результаты и приведены выводы, полученные в диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения научного исследования получены следующие новые результаты:

1 Новая глобальная математическая модель оценки геодинамических напряжений, смещений и деформаций в литосфере, отличающаяся учётом горизонтальных сдвиговых напряжений в верхних слоях литосферы. Модель позволяет по математически вычисляемому геодинамическому индикаторному полю (распределению скоростей сдвиговых деформаций) идентифицировать тот или иной район Земного шара как нефтегазоносный.

2 Модели и комплекс программных средств оценки геодинамического риска на территориях с НГК, основанные на использовании математических индикаторов, представляющих пространственное распределение значений ротора полного вектора смещений в геологической среде, а также распределения полей векторов горизонтальных геодинамических напряжений в литосфере Земли.

3 Разработана и практически реализована процедура поддержки управления геодинамическим риском на основе модели и алгоритма оптимального, с точки зрения безопасности размещения, объектов нефтегазовых комплексов.

4 Предложен и реализован метод формализованного представления рисков геодинамического происхождения для объектов нефтегазовых комплексов, основанный на нечётких отношениях. Это дает возможность ранжировать природные, техногенные и антропогенные процессы по степени их воздействия на объекты НГК, а также оценивать интегральные риски для НГК.

5 Разработан и практически реализован численный метод блочной риск-классификации, основанный на кластеризации объектов, имеющий большое значение при выработке стратегии управления территориальными системами, содержащими НГК, с целью их освоения и преобразования.

6 Предложенные в диссертации математические модели, численные методы и алгоритмы открывают новые перспективы для проведения научных исследований как в области управления сложными распределёнными системами, так и решения прикладных практических задач в нефтегазовой отрасли топливно-энергетического комплекса России.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Ахметшин Т. Р. Математическая модель вязкости геологической среды литосферы Земли / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Не-

вдах // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». – 2018. Выпуск 1. – С. 28-37.

2. **Ахметшин Т. Р.** Цифровая модель геодинамических процессов в литосфере Земли / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2018. Выпуск 3. – С. 9-15.

3. **Ахметшин Т. Р.** Геодинамические индикаторы для поиска нефтегазоносных полей / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах, Фаддеев А.А. // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2018. Выпуск 3. – С. 16-36.

4. **Ахметшин Т. Р.** Математические модели оценки геодинамического риска при исследовании литосферных процессов / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 6 (82). – 2018. – С. 40-47. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2018-6/02-06-18.ttb.pdf>.

5. **Ахметшин Т. Р.** Геодинамические риски и нефтегазоносные районы Кипра: модели оценки / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, А.В. Кантышева, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах // Научный журнал «Моделирование, оптимизация и информационные технологии». – 2018. Том 6, № 4. URL: <http://moit.vivt.ru/>.

6. **Ахметшин Т.Р.** Методика оценки динамики опасных геодинамических процессов в литосфере на базе нечетких моделей / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 1 (83). – 2019. – С. 126-138.

7. **Ахметшин Т.Р.** Модель и алгоритм минимизации геодинамических рисков при размещении объектов на территории нефтегазовых комплексов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. № 9(1). Электронный ресурс: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=964>.

8. **Ахметшин Т. Р.** Оценки геодинамических рисков для нефтегазовых комплексов Арктической зоны / Степанов Р. О., Ахметшин Т. Р. // Российская Арктика. – 2021. № 1(12). – С. 52-60.

9. **Ахметшин Т.Р.** Кибербезопасность и глобальные геодинамические риски / В.А. Минаев, С.В. Дворянкин, А.О. Фаддеев, Т.М. Невдах, Т.Р. Ахметшин, А.А. Фаддеев // Вопросы кибербезопасности. 2019. №3 (31). – С. 11-17 (издание входит в базу данных RSCI на платформе Web of Science).

Статьи в сборниках конференций:

10. **Ахметшин Т. Р.** Использование дифференциальных операторов при оценке геодинамического риска / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, М.И. Купцов, Т.Р. Ахметшин, Т.М. Невдах / Тезисы докладов Международной конференции «Геометрические методы в теории управления и математической физике». 25-28 сентября 2018 г. Рязань: РГУ имени С. А. Есенина, 2018. – С. 20-21.

11. **Ахметшин Т. Р.** Оценка геодинамического риска на базе нечетких моделей / В.А. Минаев, Фаддеев А. О., Ахметшин Т. Р., Невдах Т. М. / Мате-

риалы XXVII Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2018». М.: Академия ГПС МЧС РФ, 29 ноября 2018. – С. 16-18.

12. **Ахметшин Т. Р.** Оценка геодинамического риска при исследовании литосферных процессов / В.А. Минаев, Фаддеев А. О., Ахметшин Т. Р., Невдах Т. М. // Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 255-257.

13. **Ахметшин Т. Р.** Методика оценки геодеформационных процессов в литосфере на базе нечетких моделей / В.А. Минаев, Фаддеев А. О., Ахметшин Т. Р., Невдах Т. М. / Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 257-260.

14. **Ахметшин Т. Р.** Дифференциальные операторы как индикаторы нефтегазоносных бассейнов / В.А. Минаев, Фаддеев А. О., Невдах Т. М., Ахметшин Т. Р. / Материалы Международной конференции СРТ2019, 13-17 мая 2019, Пущино, Московская область, Изд. ННГАСУ и НИЦФТИ. – С. 114-118.

15. **Akhmetshin T. R.** The Earth lithosphere digital model: researches of geodynamic risks and hydrocarbon deposits forecasting / Minaev V. A., Topolsky N. G., Faddeev A. O., Grachev D.S., Akhmetshin T. R. // Proceedings of Twenty Eighth International Scientific-Technical Conference «Safety systems – 2019». November 28 2019. Moscow: State fire Academy of Russia EMERCOM, 2019. – Pp. 11-15.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

16. **Ахметшин Т. Р.** «Литосфера» / В. А. Минаев, А. О. Фаддеев, Т. М. Невдах, Ахметшин Т. Р. Свидетельство № 2021611454 от 28.01.2021

Ахметшин Тагир Рустэмович

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ
И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ОЦЕНКИ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ
В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ 2022 г. Формат бумаги 60 х 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,2.
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.