

На правах рукописи



Невдах Татьяна Михайловна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ
ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ОПАСНЫХ
ФАКТОРОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2021

Работа выполнена на кафедре «Систем автоматизированного проектирования вычислительных систем» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»).

Научный руководитель: **Фаддеев Александр Олегович**, доктор технических наук, доцент

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. Муром

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: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»**

Защита диссертации состоится «15» апреля 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 при ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» <http://www.rsreu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Перепелкин
Дмитрий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследованию современных геодеформационных процессов, под которыми понимаются процессы, связанные с деформациями, возникающими при движениях отдельных слоёв и блоков литосферы на различных глубинах, в том числе и на дневной поверхности литосферы, т.е. на поверхности Земли, посвящено огромное количество монографий, диссертаций, научных статей и других публикаций. Это и понятно, поскольку по документально подтверждённым фактическим данным современные геодеформационные процессы представляют собой значимый фактор риска возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера.

С каждым годом растёт количество природных и природно-техногенных катастроф, «ответственными» за которые выступают геодеформационные процессы. Всё это говорит об актуальности этой глобальной проблемы современности и ускорения разработки методов её решения.

К настоящему моменту времени уже разработаны эффективные математические модели и методы восстановления полей геодинамических напряжений и смещений в геологической среде, как по данным геодезических измерений, так и по косвенным признакам – данным аномальных геофизических полей таких, например, как аномальное гравитационное поле в изостатической редукции или скорости современных вертикальных (горизонтальных) движений на земной поверхности. Разработаны технологии выявления потенциально опасных в сейсмическом отношении участков и целых регионов, как на платформенных территориях, так и в областях орогенов, решены и другие важные задачи в этой области.

Однако для изучения причин возникновения опасных движений и деформаций в литосфере Земли крайне необходимы исследования пространственной динамики современных литосферных геодеформационных процессов, особенно с точки зрения их математического моделирования, что в ещё большей степени актуализирует выбранную тему исследований.

Степень разработанности темы. К настоящему моменту времени разработан достаточно разнообразный и широкий спектр математических моделей, алгоритмов и соответствующих им программных средств, позволяющих оценивать опасные геодеформационные процессы.

Существующие модели, методы и алгоритмы восстановления полей геодинамических напряжений и смещений, технологии выявления потенциально опасных в сейсмическом отношении территорий разработаны для ряда различных регионов и разнообразных по своему назначению объектов. Задачи же глобального моделирования современных литосферных геодеформационных процессов, их пространственной динамики еще не решены, что настоятельно требует создания соответствующих математических моделей и методов.

Значительным недостатком существующих моделей является использование в них осреднённых прочностных и вязких свойств геологической среды. В большинстве своём в этих моделях геологическая среда полагается исключительно упругой. Только совсем недавно появились попытки

представления геологической среды сейсмически активных регионов с позиций нечёткого моделирования, когда приходится принимать решения по освоению той или иной территории в условиях значительной неопределённости. Для платформенных же областей такие модели на сегодняшний день отсутствуют, не разработано и соответствующее программное обеспечение.

Кроме того, существующие модели, методы, алгоритмы и программные средства не позволяют «отследить» динамику изучаемых геодинамических процессов. Поэтому одна из главных задач исследования состоит в том, чтобы разработать новые математические модели, алгоритмы и программные средства, позволяющие на своей основе построить такую количественную модель литосферы, учитывающую комплекс взаимосвязей между отдельными геологическими структурами, которая бы давала в будущем возможность в режиме реального времени контролировать динамику и риски литосферных геодинамических процессов.

Именно поэтому диссертация посвящена решению актуальной научной задачи – разработке современных математических моделей, алгоритмов и программных средств исследования пространственной динамики современных литосферных геодинамических процессов и связанных с ними рисков возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера с целью обеспечения безопасности территорий и населения от возможных проявлений геодинамических угроз.

Объектом исследования являются современные литосферные геодинамические процессы, их основные параметры и количественные характеристики.

Предмет исследования составляют математические модели, численные методы и алгоритмы исследования современных литосферных геодинамических процессов и оценки вызываемых ими рисков возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке комплекса математических моделей, численных методов, алгоритмов и программных средств исследования современных литосферных геодинамических процессов, их пространственной динамики и оценки вызываемых ими рисков возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера.

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

1 Проанализировать современные математические модели и программные средства исследования количественных характеристик литосферных геодинамических процессов, ориентированные на изучение особенностей их формирования и развития.

2 Разработать и апробировать комплекс новых математических моделей, позволяющих количественно оценивать температурный режим литосферы, её вязкость, а также учитывать сложные взаимосвязи между отдельными геологическими структурами на основе количественных оценок напряжений и

деформаций, что предоставляет возможность в режиме реального времени контролировать динамику литосферных геодинамических процессов.

3 Создать и апробировать новые математические модели оценки геодинамического риска, позволяющие выполнять прогнозную оценку геодинамической устойчивости территорий регионов различного геологического строения.

4 Разработать и апробировать численный метод трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритм численной оценки прочностных свойств литосферы Земли, осуществить их программную реализацию.

5 Создать новую компьютерную базу данных (БД) характеристик процессов, происходящих в литосфере и разработать программное обеспечение для работы с этой БД.

6 Разработать экспертную систему (ЭС) для исследования динамики современных литосферных геодинамических процессов и программное обеспечение к ней.

7 Выполнить практическую оценку количественных характеристик литосферных геодинамических процессов и вызываемых ими рисков для регионов различного геологического строения, и представить результаты таких оценок, постоянно пополняющих базу данных.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использовались методы теории дифференциальных уравнений, механики сплошных сред, теории нечётких множеств, математического анализа и линейной алгебры, математической статистики и теории вероятностей, численные методы дифференцирования, сплайн-аппроксимации, спектрального Фурье-анализа, технология оперативной аналитической обработки данных OLAP. Программное обеспечение для решения поставленных в работе задач разработано в среде Borland Delphi 7.0.

Теоретическое значение и научная значимость. Создан комплекс новых математических моделей, позволяющих количественно оценивать температурный режим литосферы, её вязкость, а также учитывать сложные взаимосвязи между отдельными геологическими структурами на основе количественных оценок напряжений и деформаций, что предоставляет возможность в режиме реального времени контролировать динамику литосферных геодинамических процессов.

Разработана экспертная система (ЭС) для исследования динамики современных литосферных геодинамических процессов на платформенных территориях, функционирующая в условиях неопределённости физических характеристиках геологической среды, позволяющая выполнить количественные оценки динамики современных литосферных геодинамических процессов исследуемой территории в виде значений геодинамического риска, что, в свою очередь, дает возможность произвести прогнозную оценку успешности строительных и иных проектов по освоению различных территорий платформенного типа.

Практическая значимость результатов работы заключается в направленности разработанных математических моделей, численных методов, алгоритмов и программного комплекса оценки характеристик литосферных геодинамических процессов, позволяющих выполнять прогнозную оценку геодинамической устойчивости территорий регионов различного геологического строения и создание моделей геодинамической устойчивости платформенных и сейсмоактивных территорий различного масштабного уровня, разработку оптимальной стратегии управления безопасным и устойчивым развитием регионов, оценку, анализ и оптимизацию размещения различных объектов, систем и сетей транспортных коммуникаций.

Разработанные в рамках диссертационного исследования численный метод трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритм численной оценки прочностных свойств литосферы Земли, позволяют приводить к единому масштабу распределённые поля значений различных характеристик геологической среды и создавать новые виды таких характеристик для динамического пополнения информационных ресурсов о литосферных геодинамических процессах.

Создана новая компьютерная база данных (БД) характеристик литосферных геодинамических процессов, дающая возможность оценить риски их проявления для жизнедеятельности.

Полученные результаты могут быть использованы для информационной поддержки государственных и муниципальных органов управления при принятии решений в области хозяйственной и изыскательской деятельности, совершенствования геофизической и геоэкологической экспертиз различных хозяйственных программ, при разработке программ и планов развития территорий различной протяженности и геологического строения, при оценке безопасности среды обитания, в том числе – антитеррористической безопасности.

Достоверность полученных результатов. Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы, правильность выводов и рекомендаций, степень адекватности предложенных моделей, методов и алгоритмов подтверждается проведенными теоретическими исследованиями, созданием работоспособных инструментальных средств математического и программного обеспечения и проведением вычислительных экспериментов по решению тестовых задач, сопоставимостью полученных результатов с теоретическими оценками и экспериментальными результатами, полученными другими исследователями, практическим применением результатов в соответствующих организациях Российской Федерации.

Реализация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность ФГАОУ «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», в научно-исследовательскую деятельность АО «Центр карстоведения и инженерной геофизики – СТРОЙКАРСТ» (г. Держинск). Акты о внедрении результатов работы представлены в Приложениях к диссертации.

Новые научные результаты, выносимые на защиту:

1 Комплекс новых математических моделей, позволяющих количественно оценивать температурный режим литосферы, её вязкость, а также учитывать сложные взаимосвязи между отдельными геологическими структурами на основе количественных оценок напряжений и деформаций, что предоставляет возможность в режиме реального времени контролировать динамику литосферных геотектонических процессов, а также новые математические модели оценки геодинамического риска, позволяющие выполнять прогнозную оценку геодинамической устойчивости территорий регионов различного геологического строения.

2 Экспертная система (ЭС) для исследования динамики современных литосферных геотектонических процессов на платформенных территориях, функционирующая в условиях неопределенности о физических характеристиках геологической среды, позволяющая выполнить количественные оценки динамики современных литосферных геотектонических процессов исследуемой территории в виде значений геодинамического риска и её программная реализация.

3 Численный метод трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритм численной оценки прочностных свойств литосферы Земли, дающие возможность приводить к единому масштабу распределённые поля значений различных характеристик геологической среды и создавать новые виды таких характеристик для динамического пополнения информационных ресурсов о литосферных геотектонических процессах.

Апробация работы. Основные положения исследования изложены в опубликованных статьях и тезисах докладов. Результаты докладывались и обсуждались на десяти научных конференциях международного и всероссийского уровней.

Публикации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них: 8 работ в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 2 работы в изданиях, входящих в Emerging Sources Citation Index (ESCI) и Russian Science Citation Index (RSCI) информационной платформы Web of Science (WoS), 10 в трудах международных и всероссийских научно-практических конференций, входящих в РИНЦ, 2 статьи в иных изданиях.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611454 «Литосфера» от 28.01.2021г.

В работах, опубликованных в соавторстве, автором лично выполнены:

- теоретическое обоснование и практическая реализация в виде компьютерных программ математических моделей, позволивших создать комплексную модель литосферы, учитывающую систему взаимосвязей между отдельными геологическими структурами;

- теоретическое обоснование и практическая реализация математических моделей оценки геодинамического риска, позволяющих выполнять прогнозную оценку геодинамической устойчивости территорий различного геологического

строения; разработка экспертной системы (ЭС) для исследования динамики современных литосферных геодформационных процессов, численного метода трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритма оценки прочностных свойств литосферы для различных глубинных уровней;

- практическая реализация компьютерной базы данных (БД) характеристик литосферных геодформационных процессов и программного обеспечения к ней;
- численные оценки и расчёты характеристик литосферных геодформационных процессов и вызываемых ими рисков для регионов различного геологического строения.

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, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст работы содержит 170 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 151 источник.

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 работы, публикациях и личном вкладе автора, соответствии диссертации паспорту специальности.

В первой главе раскрываются особенности проявления современных геодформационных процессов (СГДП), возникающих на различных глубинах при движениях отдельных слоёв и блоков литосферы, в том числе и на ее дневной поверхности, рассматривается, их место в геодинамике, каким образом эти процессы связаны с математическим моделированием, численными методами и комплексами программ.

Особый акцент сделан на том, что современные геодформационные процессы представляют собой значимый фактор риска возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера, что подтверждается многочисленными документальными данными, приводятся ряд примеров, указывающих на эти процессы именно как на фактор риска чрезвычайных ситуаций геодинамического характера. Отмечается, что для изучения причин

движений и деформаций, приводящих к проявлению СГДП, крайне необходимы исследования их пространственной динамики.

Отмечается, что вопросы, связанные с этими проблемами, чрезвычайно важны, и большая часть из них до сих пор не разрешена. Эта неразрешённость напрямую связана, с одной стороны, с практическим отсутствием реальных данных о свойствах и характеристиках геологической среды на различных глубинах, а с другой стороны – с недостаточной информацией о характере знакопеременных движений отдельных слоёв и блоков земной коры, поскольку ряды наблюдаемых данных охватывают незначительный временной период и незначительные по масштабу территории планеты.

В такой ситуации выход может быть только один: по официально имеющейся и научно обоснованной информации о различных геофизических полях, а также данных о структуре и характеристиках литосферы на разных глубинах, методами математического моделирования произвести реконструкцию полей геодинамических напряжений и деформаций, что позволит перейти к изучению методами математического моделирования пространственной динамики обозначенных выше литосферных геодеформационных процессов.

Показано, что современные сейсмические процессы и движения слоёв и блоков земной коры характеризуются общностью основных количественных характеристик. Отмечается, что особенности и сложности количественных оценок данных характеристик требуют разработок современных математических моделей и программных средств, позволяющих создать единую базу данных параметров, необходимых при исследовании СГДП.

В заключение главы сделан вывод о том, что, несмотря на многообразие созданных к настоящему моменту времени математических моделей и программных средств исследования современных геодеформационных процессов, одной из главных задач современных исследований СГДП состоит в том, чтобы разработать новые математические модели, алгоритмы и программные средства, позволяющие построить такую комплексную модель литосферы, которая учитывает систему взаимосвязей между отдельными геологическими структурами и дает возможность в режиме реального времени контролировать динамику современных литосферных геодеформационных процессов.

Во второй главе показано, что информация о прочностных свойствах литосферы является одной из определяющих при количественной оценке напряжений, деформаций и смещений, возникающих в земной коре при формировании и развитии в ней геодеформационных процессов.

Поэтому во второй главе представлены математические модели, позволяющие производить как количественные оценки значений температуры, вязкости, упругих модулей на различных глубинных уровнях земной коры, так и строить пространственные распределения значений указанных характеристик литосферы Земли на различных глубинах.

Показано, что при оценке температуры на глубинах до 80 км необходимо использовать уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -A(z), \quad (1)$$

где $A(z)$ – функция объёмной теплогенерации пород литосферы; $k(z)$ – функция, описывающая изменение коэффициента теплопроводности с глубиной z ; T – температура.

Предложены два различных подхода к решению задачи по оценке температуры литосферы и, соответственно, две различные математические модели.

Так, для континентальной литосферы в отношении функции $A(z)$, предполагается, что объёмная теплогенерация пород литосферы экспоненциально убывает с глубиной в соответствии с соотношением

$$A(z) = C_1 A_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (2)$$

где A_0 – константа, равная $3 \cdot 10^{-6}$ Вт/м³, H – толщина литосферы, C_1 – коэффициент, зависящий от параметров геологической среды.

В главе автором показано, что функцию для коэффициента теплопроводности следует определять в соответствии со следующим выражением:

$$k(z) = k_0 - \frac{(k_0 - k_H)z}{H}, \quad (3)$$

где k_0 , k_H – коэффициенты теплопроводности на дневной поверхности и на границе литосфера – литосферная мантия, соответственно, H – толщина литосферы, z – глубина.

Обозначая $a = k_0$, $b = -\frac{(k_0 - k_H)}{H}$, представляя (3) в виде $k(z) = a + bz$, интегрируя (1), получим:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{C_1 A_0 e^{-\alpha z} + \alpha C_2}{\alpha(a + bz)}, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{1}{H}$.

Показано, что интегрируя (4) далее, приходим к следующему решению:

$$T(z) = \frac{C_1 A_0}{\alpha} \left[D_0 z + D_1 z \left(\frac{z}{2} - z_0 \right) + \sum_{m=2}^6 D_m \frac{(z - z_0)^{m+1}}{m+1} \right] + \frac{C_2}{b} \ln(a + bz) + C_3, \quad (5)$$

где C_1 , C_2 , C_3 – неизвестные коэффициенты, определяемые через граничные

условия; $D_0 = f(z_0)$; $D_1 = f'(z_0)$; $D_2 = \frac{f''(z_0)}{2!}$; $D_3 = \frac{f'''(z_0)}{3!}$; ... ; $D_6 = \frac{f^{(VI)}(z_0)}{6!}$;

$f(z) = \frac{e^{-\alpha z}}{a + bz}$; $f'(z) = \frac{-e^{-\alpha z} [\alpha(a + bz) + b]}{(a + bz)^2}$, а для производных порядка $n > 1$

автором получена рекуррентная формула следующего вида:

$$f^{(n)}(z) = \frac{(-1)^n e^{-\alpha z}}{(a + bz)^{n+1}} \left\{ \alpha^n (a + bz)^n + nb \left[\alpha^{n-1} (a + bz)^{n-1} + \sum_{m=1}^{n-1} \alpha^{n-(m+1)} b^m (a + bz)^{n-(m+1)} \prod_{k=1}^m (n-k) \right] \right\}.$$

Полагая $z_0 = 0$ и накладывая на (5) граничные условия вида:

$$T(z)|_{z=0} = T_0; \quad k_0 T'(z)|_{z=0} = Q_0; \quad T(z)|_{z=H} = T_H, \quad (6)$$

где T_0 , Q_0 , k_0 – температура, тепловой поток и коэффициент теплопроводности соответственно на дневной поверхности, а T_H – температура на границе литосфера – литосферная мантия, и подставляя функцию (5) в граничные условия (6), автором получена система уравнений с тремя неизвестными C_1 , C_2 , C_3 :

$$\begin{cases} \frac{C_2}{b} \ln a + C_3 = T_0, \\ C_1 A_0 + \alpha C_2 = \frac{\alpha a Q_0}{k_0}, \\ \frac{C_1 A_0}{\alpha} \sum_{m=0}^6 D_m \frac{H^{m+1}}{m+1} + \frac{C_2}{b} \ln(a + bH) + C_3 = T_H. \end{cases} \quad (7)$$

Показано, что разрешая систему (7), и подставляя значения коэффициентов C_1 , C_2 , C_3 в уравнение (5), можно рассчитать пространственное распределение температуры для континентальной части литосферы.

Распределение температуры в океанической части литосферы рассчитывалось в зависимости от её возраста в рамках модели остывающего полупространства в соответствии с соотношением:

$$\frac{T(z) - T_0}{T_H - T_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{z - z_0}{2\sqrt{\chi \cdot t}}\right), \quad (8)$$

где T_H – температура на границе литосфера – литосферная мантия (принималась равной $1717.15^\circ K$), χ – коэффициент температуропроводности (принимался равным $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), erf – функция ошибок, t – возраст литосферы.

Показано, что используя предложенные в главе математические модели, выполнен расчёт распределения глобального температурного поля литосферы для интервала глубин от 0 до 80 км. Результаты таких расчётов, например, для глубины 10 км, приведены на рисунке 1.

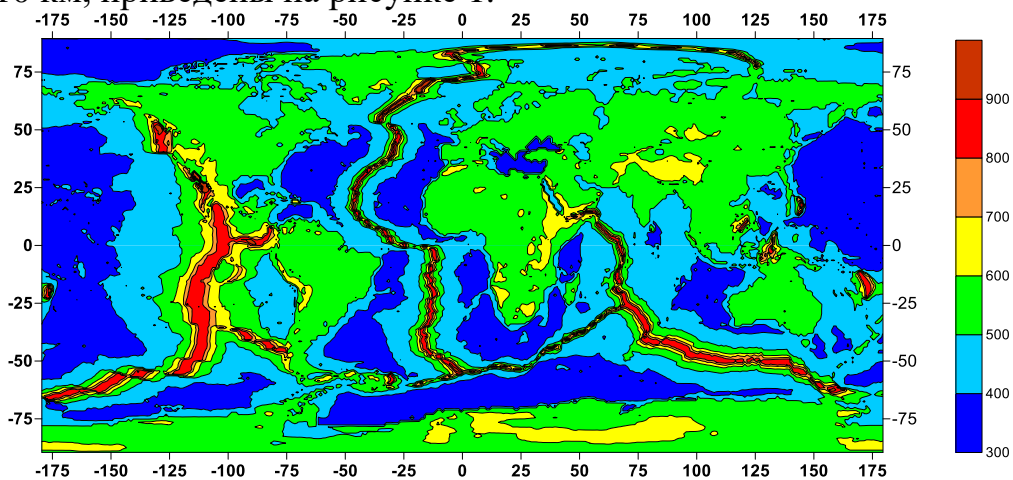


Рисунок 1 – Результаты расчётов глобального температурного поля литосферы Земли для глубины 10 км (карта построена автором)

Предложена и рассмотрена математическая модель для расчёта величины вязкости η в зависимости от глубинного уровня z :

$$\eta(z) = A_k(z) \cdot \exp\left[\frac{T^{0,857}(z)}{10} \cdot \exp\left(\frac{2,5\rho(z)gz}{\lambda(z) + 2/3\mu(z)}\right)\right], \quad (9)$$

где $A_k(z)$ – функция изменения с глубиной коэффициента пропорциональности; $\rho(z)$ – функция изменения плотности; $\lambda(z)$, $\mu(z)$ – функции изменения упругих модулей; z – глубина; T – температура.

$$A_k(z_{\text{фикс}}) = \frac{\eta(z_{\text{фикс}})}{\exp\left\{\frac{U_a(z_{\text{фикс}})}{RT(z_{\text{фикс}})} \exp\left[\frac{2,5P(z_{\text{фикс}})}{\lambda(z_{\text{фикс}}) + 2\mu(z_{\text{фикс}})/3}\right]\right\}}. \quad (10)$$

Так, для фиксированной по долготе и широте площадки $1^\circ \times 1^\circ$, распределение коэффициентов $A_k^{(i)}$ по глубине для четырёх «точек» схематично представлено на рисунке 2.

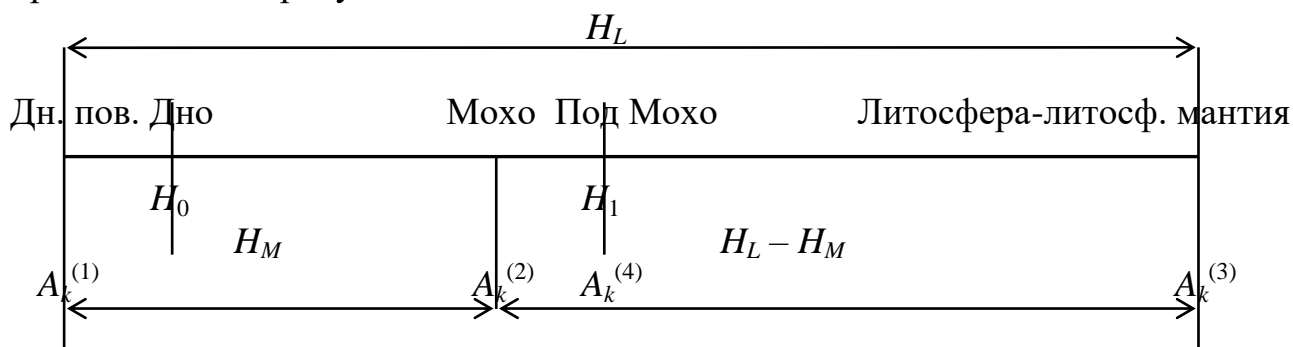


Рисунок 2 – Распределение коэффициентов $A_k^{(i)}$ по глубине

На рисунке 2 использованы следующие обозначения: H_M – это толщина литосферы до границы Мохо; H_L – общая толщина литосферы до границы литосфера - литосферная мантия; H_0 – глубина расположения океанического дна; H_1 – глубинный уровень под Мохо (принимается на 1 км глубже самой границы Мохо).

Тогда для определения величины коэффициента A_k в зависимости от глубины z будет, согласно рисунку 2, справедлива следующая система соотношений:

$$\begin{cases} \text{если } z \leq H_M, \text{ то } A_k(z) = A_k^{(1)} + \frac{A_k^{(2)} - A_k^{(1)}}{H_M - H_0} \cdot (z - H_0); \\ \text{если } z > H_M, \text{ то } A_k(z) = A_k^{(4)} + \frac{A_k^{(3)} - A_k^{(4)}}{H_L - H_M - H_1} \cdot (z - H_M - H_1). \end{cases} \quad (11)$$

Данные о распределении вязкости служат необходимыми входными данными для расчёта вязкой компоненты геодинамических деформаций, особенно сдвиговых, что позволяет пересчитывать напряжения, учитывая в них упругую и вязкую составляющие, тем самым приближая расчётные значения напряжений к их значениям в условиях реальной геологической среды литосферы Земли.

Предложена математическая модель напряжённо-деформированного состояния литосферы Земли, построенная на основании данных об аномальном гравитационном поле в изостатической редукции и информации о распределении скоростей горизонтальных движений на поверхности земной коры:

$$1) \begin{cases} \sigma_z(x, y, 0) = \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y), \\ u_z(x, y, h) = v_z(x, y, h)t, \\ u_x(x, y, h) = v_x(x, y, h)t, \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \end{cases} \quad 2) \begin{cases} \sigma_z(x, y, 0) = \rho_H(x, y) \Delta g_u(x, y) \chi H(x, y), \\ u_z(x, y, h) = v_z(x, y, h)t, \\ u_y(x, y, h) = v_y(x, y, h)t, \\ \tau_{yz}(x, y, h) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $\sigma_z(x, y, 0)$ – вертикальная компонента нормальных напряжений на границе литосфера – литосферная мантия; $u_z(x, y, h)$ – вертикальная составляющая вектора смещений на поверхности земной коры; $u_x(x, y, h)$ – x -компонента горизонтальной составляющей вектора смещений на поверхности земной коры; $u_y(x, y, h)$ – y -компонента горизонтальной составляющей вектора смещений на поверхности земной коры; $\tau_{xz}(x, y, h)$ – компонента сдвиговых напряжений в плоскости XZ на поверхности земной коры; $\tau_{yz}(x, y, h)$ – компонента сдвиговых напряжений в плоскости YZ на поверхности земной коры; $\Delta g_u(x, y)$ – величина аномалии гравитационного поля в изостатической редукции в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ – толщина литосферы в точке с координатами (x, y) ; χ – безразмерный коэффициент, равный 10^6 ; h – толщина модельного слоя геологической среды (литосферы); t – временной интервал (1 год); $\rho_H(x, y)$ – плотность геологической среды в точке с координатами (x, y) , вычисляемая

по соотношению $\rho_H(x, y) = \int_0^H \rho(x, y, z) dz$.

Вероятностная модель, представляющая собой реализацию нового, геофизически обоснованного подхода к расчёту коэффициентов модели α_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), характеризующих переход элементарного объёма геологической среды между тремя различными состояниями (равновесное устойчивое состояние (состояние 1); неравновесное неустойчивое состояние (состояние 2) и квазиравновесное состояние (состояние 3)), позволяет повысить эффективность и адекватность оценок геодинамического риска.

Математическая модель вероятностной оценки геодинамического риска основывается на использовании дифференциальных уравнений Колмогорова, описываясь указанными выше тремя состояниями.

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

В отличие от традиционного подхода, коэффициент α_{13} предложено определять следующим образом:

$$\alpha_{13} = \mu \cdot u_z' \cdot t, \quad (14.1)$$

где μ – модуль сдвига; u_z – вертикальное смещение; $u'_z = \partial u_z / \partial x + \partial u_z / \partial y$; t – время (один год, выраженный в секундах);

коэффициент α_{32} рассчитывается на основании следующего соотношения:

$$\alpha_{32} = [\mu \cdot (u'_z + u'_r) + TensionV] \cdot t, \quad (14.2)$$

где $u'_r = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x$; $TensionV$ – вязкие сдвиговые напряжения, определяемые по формуле:

$$TensionV = TensionU \cdot e^{-\frac{\mu t}{\eta}}, \quad (14.3)$$

где $TensionU$ – сдвиговые напряжения, рассчитанные по упругой модели; η – вязкость геологической среды;

коэффициент α_{23} предложено оценивать по формуле:

$$\alpha_{23} = \mu \cdot (u'_z + u'_r) \cdot t \quad (14.4)$$

коэффициент α_{13} – по формуле:

$$\alpha_{31} = \mu \cdot u'_r \cdot t. \quad (14.5)$$

Назначение «энергетической» модели – обеспечение возможности численной переоценки величин напряжений после реализации в каком-либо элементарном объёме геологической среды сейсмического события.

Согласно «энергетической» модели, для переоценки напряжений в начале накопившиеся сдвиговые напряжения в рассматриваемом элементарном объёме геологической среды с координатами его центра (x_0, y_0, z_0) переводятся в энергию упругой деформации E_0 в соответствии со следующим соотношением:

$$E_0(x_0, y_0, z_0) = \frac{3[\tau(x_0, y_0, z_0)]^2}{2\mu(x_0, y_0, z_0)}, \quad (15)$$

где τ – полное сдвиговое напряжение; μ – модуль сдвига.

При этом изменение величины выделившейся вследствие реализации опасного геодинамического события сейсмодиформационной энергии E_0 описывается законом нормального распределения:

$$E(x, y, z) = \frac{E_0(x_0, y_0, z_0)}{\sqrt{(2\pi)^3}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]\right\}, \quad (16)$$

где x – долгота; y – широта; z – глубина; x_0, y_0, z_0 – координаты эпицентра опасного геодинамического события (долгота, широта, глубина соответственно).

Затем выполняется обратный пересчёт величины сейсмодиформационной энергии в сдвиговые напряжения в интересующем нас объёме литосферного пространства по приведённой ниже формуле:

$$\tau(x, y, z) = \tau_{исх.}(x, y, z) + \sqrt{\frac{2\mu(x, y, z) \cdot E(x, y, z)}{3}}, \quad (17)$$

где $\tau_{исх.}(x, y, z)$ – первоначальное значение сдвиговых напряжений в элементарном объёме геологической среды с координатами центра (x, y, z) .

В третьей главе предложены численный метод трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритм численной оценки прочностных свойств литосферы Земли, позволяющие на

основании преобразования информации, содержащейся в модели CRUST 1.0, рассчитывать по сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 1$ км распределённые поля упругих модулей, а также формировать трёхмерные матрицы значений плотности вещества земной коры и скоростей распространения сейсмических волн.

Метод представляет собой последовательную реализацию следующих этапов.

Этап 1. Формирование совокупности долготных профилей, как множества «точек» вида (y, z) (где y – долгота, выраженная в градусах и их долях, z – глубина в км), на основе выборки данных из широтных профилей по соответствующим долготам.

Этап 2. Численный анализ совокупности взаимно-перпендикулярных широтных и долготных профилей, в результате которого выполняется трансформация двумерных матриц значений плотности геологической среды и скоростей распространения сейсмических волн в этой среде в соответствующие трёхмерные матрицы с новой сеткой с размерами ячеек $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 1$ км по схеме, приведённой на рисунке 3.

Этап 3. Численный расчёт значений прочностных характеристик литосферы с записью этих характеристик, а также значений плотностей и скоростей в виде трёхмерных матриц в выходные файлы с сеткой $0,5^\circ \times 0,5^\circ \times 1$ км.

На схеме (рисунок 3) представлены ограниченные части широтных профилей: профиль, проходящий через точки 1 – 2 – 3, профиль через точки 4 – 5 – 6, и профиль через точки 7 – 8 – 9; части долготных профилей: профиль 1 – 4 – 7, профиль 2 – 5 – 8, профиль 3 – 6 – 9.

Точки, изображённые чёрными кругами, соответствуют значениям, принадлежащим двумерным распределениям, точки, изображённые чёрными квадратами – точки, соответствующие первым вычисляемым значениям трёхмерных распределений, точки, обозначенные красными кругами – точки, соответствующие последующим вычисляемым значениям трёхмерных распределений. Линии, выделенные красным цветом отвечают совокупности дополнительных взаимно-перпендикулярных профилей, значения оцениваемых величин, «привязанных» к этим профилям, а также со значениями величин, «привязанными» к базовым профилям, выделенными чёрным цветом, представляют собой новую трёхмерную матрицу значений этих величин.

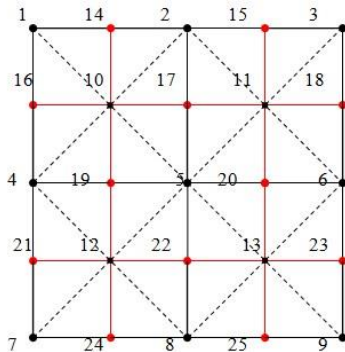


Рисунок 3 – Схема численной трансформации двумерных матриц значений характеристик геологической среды в трёхмерные матрицы их значений. Схема приведена для некоторого глубинного уровня h

Вначале выполняется расчёт значений характеристик геологической среды в точках 10, 11, 12, 13, например, для точки 10 плотность среды ρ находится по формуле:

$$\rho_{10} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_4 + \rho_5}{4}, \quad (18)$$

где индексы при обозначении плотности ρ указывают на номер точки.

Аналогичным образом выполняются расчёты в точках 11, 12, 13. Затем вычисляются значения в точках 19, 20, 17, 22.

Расширяя затем взаимно-перпендикулярные профили в широтном и долготном направлениях, аналогичным образом найдём значения искомым характеристик геологической среды в точках 14, 15, 16, 18, 21, 23, 24, 25.

Таким образом, мы получим дополнительную сеть взаимно-перпендикулярных профилей, фрагментарно проходящих через точки 16 – 10 – 17 – 11 – 18; 21 – 12 – 22 – 13 – 23; 14 – 10 – 19 – 12 – 24; 15 – 11 – 20 – 13 – 25.

Алгоритм оценки прочностных характеристик земной коры (литосферы) Земли, в котором был реализован представленный выше численный метод.

Структурно он состоит из четырёх последовательных блоков:

- 1) блок №1 – блок обработки файла границ слоёв земной коры;
- 2) блок №2 – блок обращения к файлам входных данных (это файлы, содержащие информацию о плотности вещества земной коры и сведения о скоростях распространения продольных и поперечных сейсмических волн в ней на различных глубинах);
- 3) блок №3 – блок расчёта прочностных характеристик земной коры для различных глубинных уровней;
- 4) блок №4 – запись расчётной информации в выходные файлы.

При расчете температуры для континентальной части литосферы использовалась формула численных оценок температуры (5) – (7). При расчете температуры для океанической части литосферы использовался численный метод, основанный на вычислении значений функции ошибок (8).

В четвертой главе представлены компьютерная база данных характеристик литосферных геодинамических процессов, программное обеспечение для работы с этой базой данных и экспертная система, реализованная в виде компьютерной программы.

При построении БД использована технология OLAP, позволяющая реализовывать принцип многомерного гиперкубического представления данных таблица 1.

Таблица 1 – Обозначение и содержание атрибутов при описании БД

Обозначение атрибута	Содержание атрибута
1	2
L_1	Порядковый номер ячейки
L_2	Порядковый номер координаты
L_3	Наименование координаты {долгота, широта, глубина}

L_4	Порядковый номер экспериментальной характеристики литосферных геодинамических процессов
L_5	Наименование экспериментальной характеристики литосферных геодинамических процессов {плотность, скорость продольных волн, скорость поперечных волн}
L_6	Порядковый номер расчётной характеристики литосферных геодинамических процессов
L_7	Наименование расчётной характеристики литосферных геодинамических процессов {давление, объёмный модуль упругости, модуль сдвига, температура, вязкость}
L_8	Порядковый номер компоненты нормальных напряжений
L_9	Наименование компоненты нормальных напряжений $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_r\}$
L_{10}	Порядковый номер компоненты сдвиговых напряжений
L_{11}	Наименование компоненты сдвиговых напряжений $\{\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}, \tau_z, \tau\}$
L_{12}	Порядковый номер составляющей вектора смещений
L_{13}	Наименование составляющей вектора смещений $\{u_x, u_y, u_z, u_r\}$
L_{14}	Порядковый номер вида геодинамического риска
L_{15}	Наименование вида оценки геодинамического риска {вероятностная, энергетическая, нечёткая}
L_{16}	Количественное значение параметра атрибута

Гиперкуб определён в виде совокупности измерений $\{D_1, D_2, \dots, D_h\}$ (где D_s – множество измерений атрибутов) и множества имён атрибутов M (мерами). Значения D_s являются значениями координат гиперкуба, значения M располагаются в рабочей области гиперкуба.

При динамическом формировании реализации гиперкуба исходные множества измерений D_s и мер M заданы в виде расширенных имён атрибутов, а именно: $R_i.L_j, L_j \in [R_i]$ (где R_i – наименование i -го отношения и $[R_i]$ – схема i -го отношения, а схема гиперкуба, если ограничиться двумя измерениями, представлена, например, в следующем виде: $\{R_1.L_1\} \times \{R_2.L_5(R_2.L_{16})\}$, где $D_1 = \{R_1.L_1\}$, $D_2 = \{R_2.L_5\}$ – измерения; $M = \{R_2.L_{16}\}$ – мера.

Массив <Layer Cake> («слоёный пирог»), являющийся объявленным типом данных <molecula>, представляет собой структурированную информацию о литосфере Земли, послойно размещённую в многомерной базе данных (БД) о характеристиках литосферных геодинамических процессов. Внутри базы данных предусмотрены дополнительные вычисления, позволяющие на основе имеющейся в ней информации выполнять расчёты и заполнять полученными данными «пустые» слои в БД.

Для работы с созданной базой данных о характеристиках литосферных геодинамических процессов (имеющей объём 1,67 Гб) разработана на языке программирования Borland Delphi 7.0 программа «Литосфера», представляющая собой систему выборки и обработки информации из БД характеристик литосферных геодинамических процессов.

В рамках диссертационного исследования разработана экспертная система, назначение которой – исследование динамики литосферных геодинамических процессов для решения задач в области оценки геодинамического риска для

территорий, по которым отсутствует необходимая информация о характеристиках геологической среды.

В качестве первой входной лингвистической переменной (ЛП1) использовались величины градиентов аномального гравитационного поля β_1 – «градиентность гравитационного поля»; в качестве второй (ЛП2) – величины скоростей вертикальных движений β_2 «скорость вертикальных движений»; в качестве третьей (ЛП3) – степень нарушенности сплошности геологической среды β_3 «трещиноватость геосреды».

В качестве выходной лингвистической переменной использовалась характеристика устойчивости геологической среды β_4 – «состояние геосреды». Были определены 10 состояний: равновесное; низко неравновесное; средне неравновесное; неравновесное; высоко неравновесное; низко экстремальное; средне экстремальное; экстремальное; высоко экстремальное; катастрофически опасное (рисунок 4).

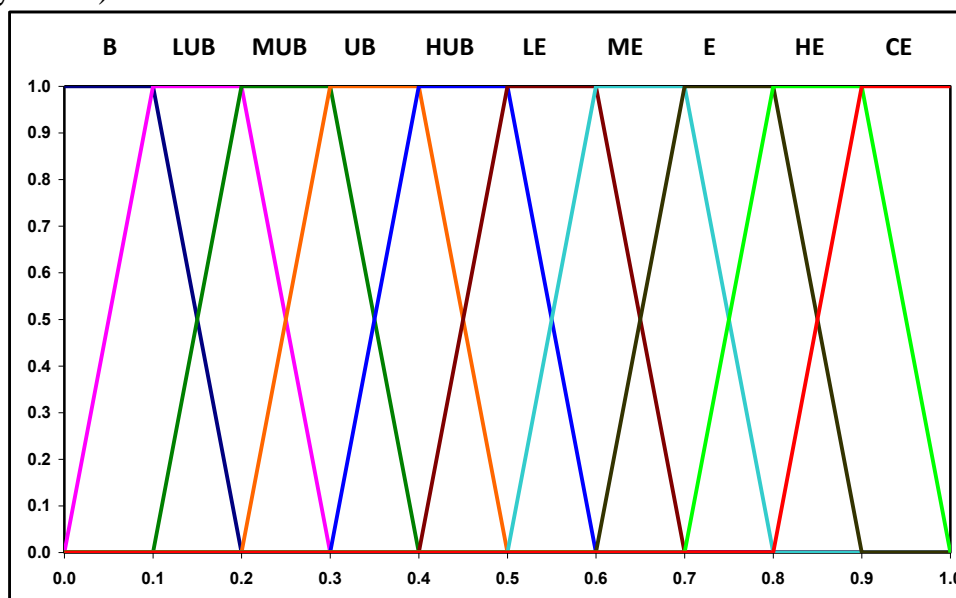


Рисунок 4 – Функции принадлежности для термов выходной ЛП «состояние среды»

Представлены система нечёткого вывода из 60 правил нечетких продукций и программная реализация ЭС для исследования динамики современных литосферных геодинамических процессов на платформенных территориях (программный продукт GeoExpert v.1.0). Показано, что модель, базирующаяся на прямом нечётком выводе и алгоритме Мамдани, позволяет на основе совместного анализа термического режима литосферы и вязкостных свойств вещества геологической среды на различных глубинных уровнях, а также особенностей распределения величин современных тектонических движений на поверхности земной коры, выполнить количественные оценки динамики современных литосферных геодинамических процессов в виде значений геодинамического риска, что, в свою очередь, дает возможность произвести прогнозную оценку геодинамической устойчивости конкретной территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты.

В теоретическом плане:

1 Комплекс новых математических моделей, позволяющих количественно оценивать температурный режим литосферы, её вязкость, а также учитывать сложные взаимосвязи между отдельными геологическими структурами на основе количественных оценок напряжений и деформаций, что предоставляет возможность в режиме реального времени контролировать динамику литосферных геодинамических процессов с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности.

2 Новые математические модели оценки геодинамического риска, позволяющие выполнять прогнозную оценку геодинамической устойчивости территорий различного геологического строения.

В прикладном аспекте:

3 Экспертная система (ЭС) для исследования динамики современных литосферных геодинамических процессов на платформенных территориях, численный метод трансформации двумерных распределённых полей значений характеристик геологической среды и алгоритм численной оценки прочностных свойств литосферы Земли для различных глубинных уровней земной коры и их реализация в виде программных средств.

4 Новая компьютерная база данных (БД) характеристик литосферных геодинамических процессов и программное обеспечение к ней.

В практическом аспекте:

5 Выполнена практическая оценка количественных характеристик литосферных геодинамических процессов и вызываемых ими рисков для регионов различного геологического строения и реализована база данных в виде динамически пополняемых информационных ресурсов о литосферных геодинамических процессах.

Полученные результаты в виде разработанных математических моделей, методик, алгоритмов и их практической программной реализации представляют эффективный аналитический инструмент для изучения проблемы воздействия литосферных геодинамических процессов на регионы различного геологического строения и решения задач обеспечения безопасного и устойчивого развития различных по масштабу и геологическому строению территорий.

Предложенные в диссертации математические модели, методики и алгоритмы оценки воздействий литосферных геодинамических процессов на жизнедеятельность населения открывают достаточно широкие перспективы для проведения научных исследований как в области теории управления сложными распределёнными системами, так и решения чисто прикладных практических задач в области инженерной геологии, геофизике, строительстве.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Невдах, Т.М. Программно-математическое обеспечение оценки геодинамического риска / В.А. Минаев, М.П. Сычѳв, А.О. Фаддеев, К.М. Бондарь, Н.А. Кузьменко [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – 2015. – Вып. 6 (64). – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2015-6>.

2. Невдах, Т.М. Моделирование термического режима литосферы как фактора геодинамических угроз / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.М. Невдах [Текст] // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2017. – Вып. 4. – С. 5–8.

3. Невдах, Т.М. Математическая модель вязкости геологической среды литосферы Земли / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин [Текст] // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2018. – Вып. 1. – С. 28–37.

4. Невдах, Т.М. Цифровая модель геодинамических процессов в литосфере Земли / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин [Текст] // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2018. – Вып. 3. – С. 9–15.

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

6. Невдах, Т.М. Геодинамические риски и нефтегазоносные районы Кипра: модели оценки / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, А.В. Кантышева, Т.Р. Ахметшин [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Том 6. – №4. – Режим доступа: <http://moit.vivt.ru/>.

7. Невдах, Т.М. Методика оценки динамики опасных геодинамических процессов в литосфере на базе нечетких моделей / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – Вып. 1 (83). – С. 126–138. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.126-138.

8. Невдах, Т.М. Построение глобальной математической модели при оценках напряженно-деформационного состояния литосферы Земли / А.О. Фаддеев, С.А. Павлова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – №68/ – С. 61–67.

Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных

9. Невдах, Т.М. Математические модели и программные средства оценки напряженно-деформированного состояния литосферы Земли [Текст] / А.О. Фаддеев, С.А. Павлова // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 1. – С. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.051-066>.

10. Невдах, Т.М. Кибербезопасность и глобальные геодинамические риски [Текст] / В.А. Минаев, С.В. Дворянкин, Т.Р. Ахметшин, А.А.Фаддеев // Вопросы кибербезопасности.– 2019. – №3(30). – С. 11 – 17.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

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

Доклады на международных и всероссийских конференциях

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

13. Невдах, Т.М. Оценка геодинамического риска при исследовании литосферных процессов / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев, Т.Р. Ахметшин // Материалы XXIII Всерос. науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях», 13 декабря 2018. – Рязань : РГРТУ. – 2018. – С. 255–257.

14. Невдах, Т.М. Цифровая модель оценки геодинамического риска в литосфере Земли / В.А. Минаев, А.О. Фаддеев // Материалы XXIV Всерос. науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях» – Рязань : РГРТУ. – 2019. – С. 161-162.

15. Невдах, Т.М. Технология построения базы данных характеристик литосферных геодинамических процессов в литосфере Земли // Материалы XXV Всерос. науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях», 18-20 ноября 2020. – Рязань : РГРТУ. – 2020. – С. 160–162.

Невдах Татьяна Михайловна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ
ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ОПАСНЫХ
ФАКТОРОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __ _____ 2021. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1