

На правах рукописи



Свалова Валентина Борисовна

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЛИТОСФЕРЕ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва - Владикавказ, 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М.Сергеева Российской академии наук и Геофизическом институте - филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»

Научный консультант: **Заалишвили Владислав Борисович**, доктор физико – математических наук, научный руководитель Геофизического института – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»

Официальные оппоненты: **Вольфман Юрий Михайлович**, доктор геолого-минералогических наук, директор Института сейсмологии и геодинамики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (г. Симферополь)

Хуторской Михаил Давыдович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией теплопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Геологический институт Российской академии наук» (г. Москва)

Корженков Андрей Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией № 304 палеосейсмологии и палеогеодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Дагестанский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (г. Махачкала)

Защита состоится «6» октября 2023 года в 10⁰⁰ часов на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 999.228.03 при ФГБУН ФНИЦ «Владикавказский научный центр РАН», ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» по адресу: 363110, РСО-Алания, м. р-н Пригородный, с. Михайловское, ул. Вильямса, д. 1.

Отзывы на автореферат (заверенные печатью, в двух экземплярах) просим направлять по адресу: 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр. Х. Исаева, д. 100, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 999.228.03 З. Ш. Гагаевой. E-mail: geodissovet@mail.ru. Факс: 8 (8712) 22-36-07. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. академика М. Д. Миллионщикова» и на сайтах: https://gstou.ru/science/dissertation_council/ и vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.228.03
кандидат географических наук



З.Ш. Гагаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Опасные природные процессы, стихийные бедствия и катастрофы являются постоянным спутником населения Земли. Эндогенные и экзогенные процессы определяют эволюцию Земли и в комплексе с климатическим режимом формируют геоэкологическую обстановку, благоприятную или катастрофическую для биоценоза. Ущерб и жертвы от землетрясений, наводнений, штормов, ураганов, цунами, извержений вулканов, оползней, селей, лавин и других опасных природных процессов и явлений со временем не только не уменьшаются, но продолжают расти. За последние двадцать лет в катастрофах и стихийных бедствиях в мире погибло свыше 3 млн. и пострадало свыше 800 млн. человек. Тенденция к повышению опасности и риска природных и техногенных катастроф представляет угрозу человечеству, как на глобальном, так и на национальном и региональном уровне. На глобальном уровне существует тенденция роста экономических последствий стихийных бедствий и катастроф, масштаб которых превышает темпы роста производства мирового валового продукта. В этой связи возрастает роль фундаментальной и прикладной науки, призванной на более глубоком научном уровне развивать и разрабатывать новые направления и подходы к решению задач теории безопасности и прикладных методов анализа и управления риском опасных природно-техногенных процессов, чрезвычайных ситуаций, стихийных бедствий и катастроф. Одним из видов научной деятельности в этом направлении является углубленный анализ опасных природных процессов на основе разработки теории формирования и эволюции геологических структур, теории геодинамической и тектонической опасности и риска (риск-анализа) и развития методов оценки и управления геоэкологическим риском (риск-менеджмента).

Степень разработанности темы. В решении проблем оценки геодинамической опасности и управления природным и техногенным риском достигнут значительный прогресс. Особо следует отметить фундаментальные работы академика В.И. Осипова, д.г.-м.н. А.Л. Рагозина, ряда зарубежных авторов (Corominas J., Vranken L., Nadim, Dilley M., Wirtz A. и др.), а также многотомные издания «Природные опасности России» и «Безопасность России». Большой вклад в решение задач прогноза, мониторинга, раннего предупреждения и управления природным и техногенным риском вносит Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России).

Большое количество работ посвящено решению проблем механико-математического и геодинамического моделирования в геологии. В этой связи необходимо отметить работы академика В.П. Мясникова, академика Е.В. Артющкова, академика В.А. Бабешко, академика Л.И. Лобковского, чл.-корр. В.П. Трубицына, академика А.Д. Гвишиани, академика Н.Л. Добрецова, д.т.н. А.Г. Кирдяшкина, Д. Теркота и Дж. Шуберта, Х. Рамберга, Д. МакКензи и многих других.

В.А. Бабешко разработал теорию блочных структур, позволяющую с высокой точностью описывать реальное поведение и свойства земной коры, Л.И. Лобковский разработал механико-математическую клавишную модель землетрясений, А.Д. Гвишиани и В.Н. Татаринев исследовали геодинамическую безопасность мест захоронения радиоактивных отходов, Ю.Л. Ребецкий исследует напряженно-деформированное состояние литосферы, М.Д. Хуторской анализирует связь теплового поля Земли и природных катастроф, решает проблему геоэкологического мониторинга, Е.А. Вознесенский изучает проблемы влияния геодинамики на свойства грунтов при решении задач инженерной геологии и строительства, включая проблему разжижения

грунтов. В работах В.И. Макарова исследуется связь эндогенных и опасных экзогенных процессов. В работах В.Б. Заалишвили, Х.О. Чотчаева, О.Г. Бурдзиевой анализируется причинно-следственная связь эндогенных геологических процессов с экзогенными процессами и с природными катастрофами. Такая связь наиболее ярко проявляется на горных территориях. В работах А.Л. Анисеева решаются задачи механического моделирования и оценки риска карста и суффозии. В работах Г.П. Постоева и А.И. Казеева решаются задачи механического моделирования и оценки риска оползневых процессов, в работах И.В. Козляковой для решения проблем подземного строительства разработаны методики оценки геоэкологического риска на основе геологической модели среды. В работах В.М. Макеева решаются задачи анализа и моделирования геологической среды при решении проблемы размещения площадок для строительства атомных станций. С.А. Несмеянов разрабатывает проблемы тектонической опасности на примере горных территорий Кавказа.

Одним из эффективных экономических инструментов управления риском является территориальное планирование на основе анализа, оценки и картографирования природных опасностей и рисков с выделением неблагоприятных для хозяйственной деятельности районов. Важнейшей задачей геолого-геофизических исследований является разработка комплексной системы геоэкологического мониторинга на основе теории управления риском. Но до сих пор в России и мире нет разработанной общепринятой методики количественной оценки риска отдельных опасных природных процессов, а также интегрального риска [Осипов, 2020].

Цель и основные задачи работы. Целью исследования является разработка комплексной методологии оценки и управления геоэкологическим риском проявлений отдельных и интегральных природно-техногенных опасностей на основе механико-математического моделирования формирования и эволюции геологических структур.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) Разработка комплексного подхода к изучению геодинамики литосферы и геоэкологического риска на базе механико-математического моделирования формирования и эволюции геологических структур по схеме: геодинамика литосферы – геодинамические процессы – геодинамическая опасность – опасные природные процессы – оценка природных опасностей – оценка и управление риском;

2) Создание механико-математической модели решения прямых и обратных задач геодинамики: – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности и определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности.

3) Разработка механико-математических моделей формирования и эволюции геологических структур с целью анализа геодинамической опасности регионов и отдельных территорий;

4) Выделение основных определяющих параметров геоэкологического риска для территорий различного масштаба: края, области, регионы и геологические обстановки;

5) Разработка унифицированной методики оценки ожидаемого геоэкологического риска отдельных и интегральных опасных природных процессов.

Объект исследований. Основным объектом исследования являются опасные природные процессы в литосфере и выявление их связей с глубинной геодинамикой с целью прогноза, предупреждения и снижения геоэкологического риска.

Предмет исследований. Обусловленные глубинными движениями геодинамические процессы, определяющие активность экзогенных процессов, методология оценок и управления геоэкологическим риском проявлений отдельных и

интегральных природно-техногенных опасностей на основе механико-математического моделирования формирования и эволюции геологических структур.

Научная новизна.

- Совместное решение проблем риск - анализа, оценки, управления природным риском и проблем формирования и эволюции геологических структур с целью анализа геодинамической опасности, обеспечивающее переход на унифицированный количественный подход к проблеме оценки и управления геозекологического риска, осуществляется впервые.

- Разработаны модели формирования и эволюции геологических структур, обусловленные подъемом мантийных диапиров на фоне коллизии литосферных плит, что является основой совместного развития концепций плюм-тектоники и плит – тектоники.

- Введено понятие геодинамической опасности, как совокупности опасностей геодинамических природных процессов и явлений в литосфере, связанных с движением вещества литосферы на различных масштабах.

- Предложены иерархические механико-математические модели формирования и эволюции разномасштабных геологических структур.

- Впервые разработана методика унифицированной оценки геозекологического риска. Введено понятие «горячих пятен» риска, отличающихся повышенными уровнями геозекологического риска.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых подходов при решении задач формирования и эволюции геологических структур на базе механико-математического моделирования с целью пошагового анализа развития и активизации опасных природных процессов, стихийных бедствий и катастроф, их прогноза, предупреждения и управления риском на основе концепции геодинамической опасности (эндогенные и экзогенные процессы) в виде унифицированной количественной оценки и управления геозекологическим риском.

Показано, что для практических целей нет необходимости строить подробную и трудоемкую карту геозекологического риска. Более важным представляется выделить самые опасные и геозекологически напряженные участки и территории, которые являются «горячими пятнами» по уровню ожидаемой опасности и соответствующему геозекологическому риску. В этой связи предполагается необходимым полное исключение участков, характеризующихся наличием «горячих пятен», из целей практического развития, а именно – строительства зданий и сооружений и размещения особо опасных ответственных объектов. Большое значение приобретает концепция допустимого (приемлемого) риска, когда геозекологический риск катастрофы значительно меньше преимуществ от освоения и развития территории.

Методология и методы исследования. При механико-математическом моделировании использовалась модель высоковязкой несжимаемой жидкости, описываемая уравнением Навье-Стокса. Использовались методы разложения по малому параметру, сращиваемых асимптотических разложений, последовательных приближений и приближения тонкого слоя.

При разработке проблем оценки и управления риском использовались методы и подходы риск-анализа и риск-менеджмента в связи с определением концепции управления риском, включающей следующие понятия: 1. Идентификация опасности; 2. Оценка уязвимости; 3. Анализ рисков; 4. Понятие приемлемого риска; 5. Оценка рисков; 6. Картографирование рисков; 7. Меры по снижению риска: а) законодательные; б)

организационные и административные; в) экономические, включая страхование; г) инженерно-технические; д) моделирование; е) мониторинг; ж) информация.

В узком смысле управление риском рассматривается как система мер, ведущих к снижению риска. Разработана и использована методика унифицированной оценки геэкологического риска. Основой методики является выделение определяющих параметров опасности и ущерба, а также определение весовых характеристик параметров. Использовались методы натуральных наблюдений, методы комбинирования, комплексирования и суперпозиции геолого-геофизических данных и карт, а также экспертных оценок. Одним из основных методов исследования при оценке геэкологического риска явился метод анализа иерархий Саати.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана концепция определяющей взаимосвязи геодинамической опасности и геэкологического риска. Обосновано, что геодинамическая опасность – это опасность процессов движения или напряженно-деформированного состояния геологической среды для различных видов и масштабов движения вещества в литосфере. Геэкологический риск опосредованно есть вероятностная мера геодинамической опасности.

2. Предложена механико-математическая модель формирования и эволюция геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром на основе приближенного решения уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и применения методов разложения по малому параметру, сращиваемых асимптотических разложений, последовательных приближений и приближения тонкого слоя. Установлено, что по мере подъема диапира на дневной поверхности формируется сначала структура сводового поднятия, а затем – глубокая депрессия. Найдены критические параметры задачи, определяющие динамику геологических структур на разных этапах развития.

3. Разработана механико-математическая модель решения обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности.

4. Построена самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна. Установлены количественные оценки подъема астеносферного диапира под геологической структурой.

5. Предложена механико-математическая модель гравитационного движения масс по оползневому склону на основе уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Найдены критические параметры задачи смены режимов движения с выделением потенциальных областей мониторинга.

6. Разработана методология унифицированной оценки и картографирования геэкологического риска на базе общей платформы управления риском. Введено понятие «горячих пятен», дифференцируемых по уровню ожидаемого геэкологического риска. Выявлены «горячие пятна» геэкологического риска для горных территорий Кавказа, территорий г. Москвы и Московской области.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов определяется надежностью механико-математических методов моделирования, развитием новых подходов на большом надежном научном материале и базисе и их верификацией и подтверждением при

сравнении с реальными геологическими и экологическими выводами и следствиями. Надежность результатов моделирования в отдельных случаях подтверждается получением сходных результатов на основе разных методов исследования. Метод анализа иерархий Саати апробирован на решении задач с известным результатом.

Апробация работы и публикации.

Фундаментальные исследования проводились по темам «Геологический риск урбанизированных территорий (оценка и картографирование на примере г. Москвы)», № гос. регистрации 01201355205; «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности», № гос. регистрации – АААА-А19-119021190076-9; по проекту ГАЗПРОМА «Адаптационные технологии для обеспечения безопасности производственных объектов при изменении геокриологических условий» (2018-2019 г.г.).

Результаты научных исследований апробировались в процессе работы по международным и российским проектам и грантам и в международных научных организациях:

1) Грант РФФИ №19-47-02010 RSF-DST(2018-2021 гг.). "Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India". «Природные опасности и мониторинг для горных территорий в России и Индии».

2) Российско-болгарский проект РФФИ и Национального научного фонда Болгарии. №18-55-18004 (2018-2020). «Тепловой поток и геотермальная активность Болгарии».

3) «Механико-математическое моделирование и мониторинг оползневых процессов» (2009-2018). В рамках Международного консорциума по оползням. IPL-163. Руководитель проекта.

4) «Исследование геотермального поля, геотермальных ресурсов и экологии региона Черного и Каспийского морей» (2012-2017). В рамках Соглашения о научном сотрудничестве между РАН и Болгарской Академией наук. Руководитель проекта.

5) «Теория и методы систем раннего предупреждения о землетрясениях для подземных трубопроводов и оползнеопасных склонов». Российско-Тайваньский проект РФФИ (2008-2011), 08-05-92003-ННС_a.

6) «Исследование гидрогеотермальных ресурсов и экологические аспекты использования геотермальной энергии в Венгрии и России». Российско-Венгерский проект на основе Договора между РАН и ВАН. 2008-2013. Руководитель проекта.

7) «Оценка риска и мониторинг опасных природных процессов для урбанизированных территорий России и Италии». Российско-Итальянский проект на основе договора между РАН и CNR. 2008-2010. Руководитель проекта.

8) «Caspian Environmental and Industrial Data & Information Service. (CASPINFO)». 2009-2010. FP7.

9) «Up-grade Black Sea Scientific Network (UP-GRADE BS-SCENE)». 2009-2011. FP7.

10) "Mitigation of Natural and Human Induced Disasters". («Снижение природных и техногенных опасностей»). Российско-Индийский проект РФФИ для организации совместных семинаров. 2009.

11) «Опасные природные процессы России и Тайваня». Российско-Тайваньский проект РФФИ для организации совместных семинаров. 2007.

12) Первая Российско-Индийской летняя школа по высокопроизводительным вычислениям и их применениям к задачам геофизики. Школа на базе Кабардино-

Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (КБГУ), г. Нальчик. 2014. Приглашенный лектор.

13) Российско-Вьетнамский семинар «Опасные природные процессы и риск». Вьетнам, 2014. Приглашенный лектор.

14) Работа в рамках Совета Директоров Международной Геотермальной Ассоциации IGA.

15) Работа в рамках Совета представителей Международного консорциума по оползням ICL.

16) Член редакционной коллегии журналов American Journal of Earth Science and Engineering (AJESE), Journal of Basic & Applied Sciences (JBAS), США.

Апробация результатов проводилась более чем на 200 научных конференциях и конгрессах в России и за рубежом, в частности:

II Российский научный форум «Экология и общество: баланс интересов». Россия, г. Вологда. ФГБУН ВолНЦ РАН. 21 апреля 2022 года; WGC (World Geothermal Congress) 2021, Iceland. <https://www.youtube.com/watch?v=NHkWhYuggSo>; Всероссийская научная конференция с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа». Петропавловск-Камчатский, Россия. 6-11 сентября 2021; XI научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. 20–24 сентября 2021 г., г. Екатеринбург; Всероссийская конференция с международным участием "Динамика и взаимодействие геосфер Земли". Томск. 8-11 ноября 2021; Российский научный форум «Экология и общество: баланс интересов», Россия, г. Вологда, ФГБУН ВолНЦ РАН, 16-20 ноября 2020 года; Международная конференция Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Владикавказ. 2019; Международная конференция «ГЕОРИСК». Москва. 2018; XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (Антистихия 2017). 2017. Москва. МЧС России; WLF4 (World Landslide Forum 4), Ljubljana, Slovenia, 2017; Международная конференция REENCON2016. Москва; II-ая Международная научно-практическая конференция «GEOENERGY-2016» . Чеченская республика. Г. Грозный; IV Международная конференция «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, Дагестан, 2015; XIV научно-практическая конференция МЧС России «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». Москва, 2015; . Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», Москва, 2015; WGC (World Geothermal Congress) 2015, Melbourne, Australia; International conference “Landslides and slope stability” (SLOPE 2015). Bali, Indonesia; 2nd Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan region (RESYLAB-2015). Belgrad, Serbia, 2015; IAEG XII Congress “Engineering geology for society and territory”, Torino-2014, Italy; Второй международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности». 10-11 ноября 2014 г. Москва. REENFOR-2014; XIII научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», Москва, 14-15 мая 2014 г., МЧС России, ФКУ центр «Антистихия», 2014; Юбилейная конференция «Современные проблемы инженерной геодинамики», посвященная 100-летию со дня рождения профессора Г.С. Золотарева (1914-2006). МГУ, Москва, 2014; World Landslide Forum 3. 2014, Beijing, China; 45 Тектоническое совещание «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». Москва. 2013; European Geothermal Congress 2013. Pisa, Italy; International conference IAMG 2013. Spain, Madrid, 2013; Первый международный

форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности». Москва, 2013; IPL (International Program on Landslides) Symposium, UNESCO, Paris, 2012; The 4th African Rift Geothermal Conference. (ARGeo C4) Nairobi, Kenya, 2012; 34 IGC (International Geological Congress), Australia, 2012; AGEC2011 (Australian Geothermal Energy Conference 2011), Melbourne, Australia; The International Conference Ecology and safety, Bulgaria, 2011; EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria, 2011; The 2nd World Landslide Forum 2011. Rome, Italy 2011; GEOCATACLISM 2011, Istanbul, Turkey, 2011; International Conference SES – Sustainable Earth Sciences, Valencia, Spain, 2011; II Международная конференция «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010; World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia; AGU (American Geophysical Union) International Conference “Meeting of Americas”, Brazil, Iguassu Falls, August 2010; IAEG Congress, 5-10 September 2010, Auckland, New Zealand; Geothermal Resources Council Annual Meeting 2010, Sacramento, CA, USA, 2010; International Association for Mathematical Geosciences Meeting (IAMG 2009), Stanford, California, USA, August 23-28, 2009; International Conference Geohazards 2009, Taiwan; General Assembly 2009 of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 19-24 April 2009; X Международная конференция «Тепловое поле Земли и методы его изучения». 18-19 июня 2008 года, Москва; 33 International Geological Congress, Oslo, Norway, 2008; Petroleum Engineering Summer School, Interactive Seminar-Workshop “GeothermalFields Development”, Dubrovnik, Croatia, June 2008; 3-я Международная конференция «Альтернативные источники энергии для больших городов», Москва, 2008; VIII Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Москва. 2007; European Geothermal Congress 2007, Germany; New Zealand Workshop and New Zealand Geothermal Association Seminar 2007, New Zealand; International conference “Mineral extraction from geothermal brines”. Tucson, Arizona, USA, 2006; Geothermal Resources Council 2006 Annual Meeting “Geothermal Resources Securing Our Energy Future”, San Diego, California, USA, 2006; First East African rift geothermal conference. Geothermal energy: an indigenous, environmentally benign and renewable energy resource. Addis Abeba, Ethiopia, 2006; World Geothermal Congress 2005, Turkey, 2005; Geothermal Conference in Zakopane, Poland, 2004; 32 IGC, Florence, Italy, 20-28 August, 2004; International Conference Energy without Smoke. Sochi, 2003; Geothermal Conference in Reykjavik, Iceland, 2003; European Geothermal Conference 2003, Hungary; EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 2003; European Geophysical Society 27 General Assembly, 2002, Nice, France; International Conference IAMG, Berlin, 2002; International Conference The Earth’s thermal field and related research methods, Moscow, 2002; International Symposium “Engineering-geological problems of the urban territories”, Ekaterinburg, 2001; International Conference Mining Prizibram Symposiun IAMG (International Association for Mathematical Geology). Prague, Czeck Republic, October 4-8, 1999. Geothermal Congress 2000, Japan; GRC (Geothermal Resources Council), IGA (International Geothermal Association) Conference. Sacramento, California, 1999; Mining Prizibram Symposiun IAMG (International Association for Mathematical Geology). Prague, Czeck Republic, October 4-8, 1999; Mining Prizibram Symposiun IAMG (International Association for Mathematical Geology). Prague, Czeck Republic, October 4-8, 1999; GRC Annual Meeting 1998, San Diego, California, USA; International Conference "The Earth's thermal field and related research methods". Moscow, 1998; 60 EAGE Conference, 1998, Leipzig, Germany; Вторая международная конференция Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Москва. МГУ. 1998; Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain, 1997; 5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. San Paulo,

Brazil, 1997; International Conference “Environmental geology and rational land use”, S.-Petersburg, 1997; 59 EAGE Conference, 1997, Geneva, Switzerland; World Geothermal Congress. Florence. 1995; International conference “Development of geothermal measurements in boreholes”. Germany, Klein-Keris. 1993; 29 IGC. Kyoto, Japan, 1992; Межд. конф. IAMG (International Association for Mathematical Geology) Горнорудный Пржибрам в науке и технике. Пржибрам, Чехословакия. 1991; XVI General Assembly of EGS. Wiesbaden, Germany, 1991; XX General Assembly of IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Vienna, Austria, 1991; CODATA conference Geomathematics and geostatistics. Leeds, U.K. 1990; Всесоюзная конференция Строение и геодинамика земной коры и верхней мантии. Москва, ГИН РАН, 1990; Международный симпозиум IAMG «Математические методы в геологии». 1989. Пржибрам, Чехословакия; Межд. конф. IAMG (International Association for Mathematical Geology) Горнорудный Пржибрам в науке и технике. Пржибрам, Чехословакия. 1987.

По теме диссертации **опубликовано** 310 научных работ, в том числе, 21 статья в журналах из Перечня ВАК и 11 статей из международных баз данных Web of Science и SCOPUS. Опубликована монография: Svalova V. Landslide Risk: Assessment, Management and Reduction. 2017. Nova Science Publishers, New York, 253 pp. (SCOPUS). Под редакцией В.Б. Сваловой изданы 4 коллективные монографии: 1) Svalova V. (editor). Risk Assessment. InTech, 2018, 384 pp., 2) Svalova V. (editor). Earthquakes - Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech, 2018, DOI: 10.5772/intechopen.71298. 3) Svalova V. (editor). Natural Hazards and Risk Research in Russia. Springer book: 86943020. 2019, 400 pp. 4) Svalova V. (editor). Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Springer book: 89082526. Switzerland. 2021. 559 pp.

Соответствие паспорту научной специальности: диссертационное исследование соответствует пунктам 1, 3, 9 паспорта специальности ВАК 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка терминов, списка литературы, двух приложений. Общий объем: 367 страниц, включая 194 рисунка и 15 таблиц.

Личный вклад автора.

Исследования носят самостоятельный характер. Все представленные результаты научных разработок получены автором самостоятельно. В совместных работах автору, как правило, принадлежит математическая часть и вопросы моделирования.

Благодарности: Автор выражает огромную благодарность своему научному консультанту д.ф.-м.н. В.Б. Заалишвили за постоянную поддержку, помощь и внимание к работе, большую благодарность академику РАН В.И. Осипову за поддержку в работе, признательность заведующему Лаборатории эндогенной геодинамики и неотектоники ИГЭ РАН д.г.-м.н. В.М. Макееву за постоянную поддержку и помощь в работе, сотрудникам Лаборатории д.г.-м.н. С.А. Несмеянову, О.А. Воейковой, д.г.-м.н. П.С. Микляеву, И.В. Коробовой за сотрудничество и помощь, сотрудникам ИГЭ РАН к.г.н. Е.А. Карфидовой, Т.Б. Минаковой, Г.С. Королевой за помощь в работе, сотруднику ГИН РАН д.г.-м.н. М.Д. Хуторскому за постоянное сотрудничество в области геотермических исследований, сотруднику ИГЕМ РАН д.г.-м.н. Е.В. Шаркову за сотрудничество в работе.

Огромная благодарность и память академику В.П. Мясникову, чл.-корр. А.В. Николаеву, Б.Г. Поляку, М.А. Гончарову, А.В. Каракину.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлены основные защищаемые положения.

В первой главе анализируются природные опасности, стихийные бедствия и катастрофы. Разработана концепция определяющей взаимосвязи геодинамической опасности и геоэкологического риска. Природные или стихийные бедствия представляют собой опасные физические процессы и явления, которые могут привести к травмам и гибели людей, материальному ущербу, социальным, экономическим и политическим потрясениям или ухудшению состояния окружающей среды. Частота бедствий, связанных с опасными природными явлениями, неуклонно возрастает. Общее количество бедствий увеличивается, но количество геологических бедствий с 1980 по 2016 гг. не сильно изменилось по сравнению с количеством гидрометеорологических и климатологических явлений. Однако жертвы и экономический ущерб постоянно возрастают (Рисунок 1).

Number of events

Relevant natural loss events
worldwide 1980 - 2016

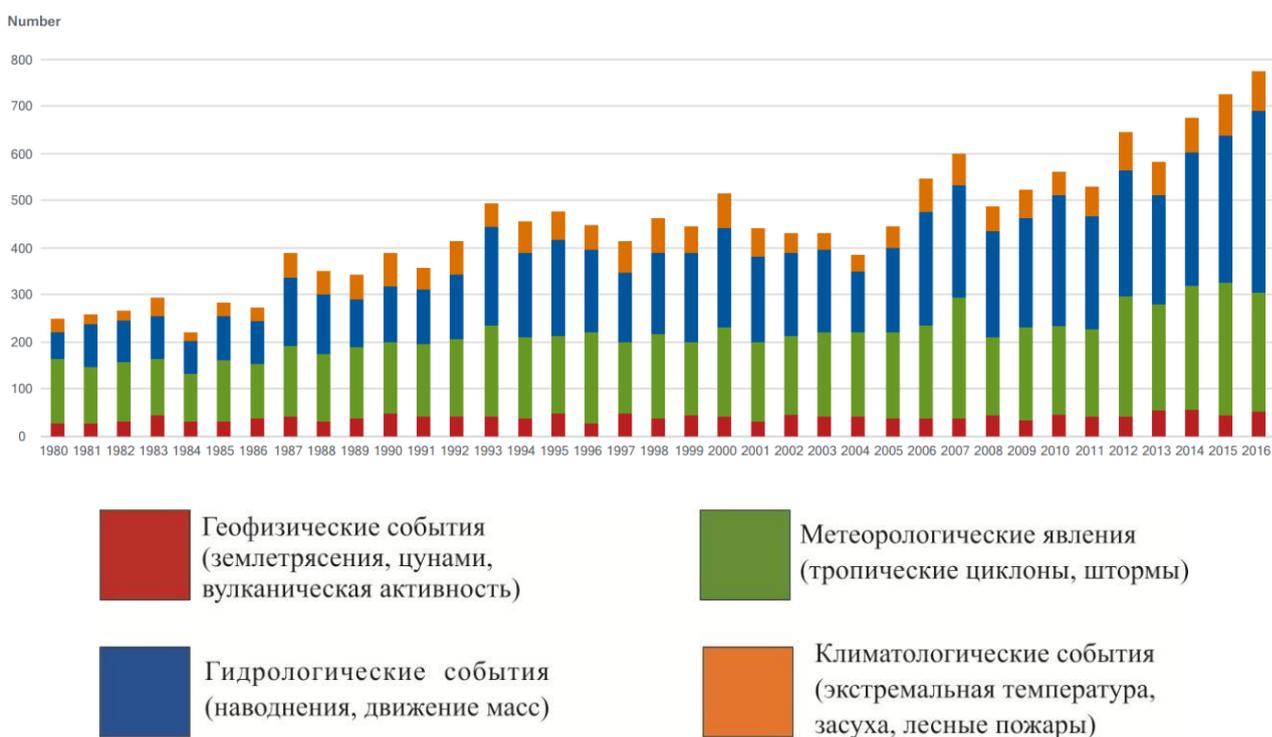


Рисунок 1 – Годовое число бедствий, связанных с природными явлениями (1980-2016 гг.). 1: красным цветом отмечены геофизические события (землетрясения, цунами, вулканическая активность); 2: зеленым - метеорологические явления (тропические циклоны, штормы); 3: синим - гидрологические события (наводнения, движение масс); 4: оранжевым - климатологические события (экстремальная температура, засуха, лесные пожары) (NatCatSERVICE, Munich Re)

Наблюдается связь природных опасностей с геодинамикой литосферы и приуроченность опасных природных процессов к границам тектонических плит и структурам Альпийско-Гималайского и Тихоокеанского поясов (Рисунок 2). Землетрясения, цунами, извержениями вулканов, оползневые процессы особенно

распространены вблизи границ тектонических плит в зонах коллизии, субдукции и в зонах Тихоокеанского огненного кольца (Рисунок 3).

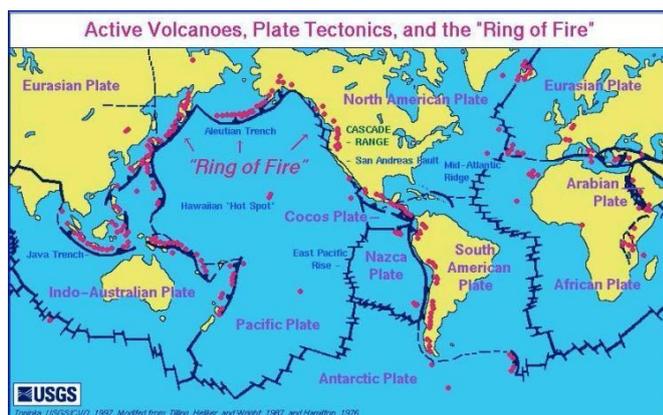


Рисунок 2 – Карта действующих вулканов, тектоники плит и Тихоокеанского огненного кольца). 328 действующих вулканов из 540 известных на Земле (Topinka, USGS/CVO, 1997)

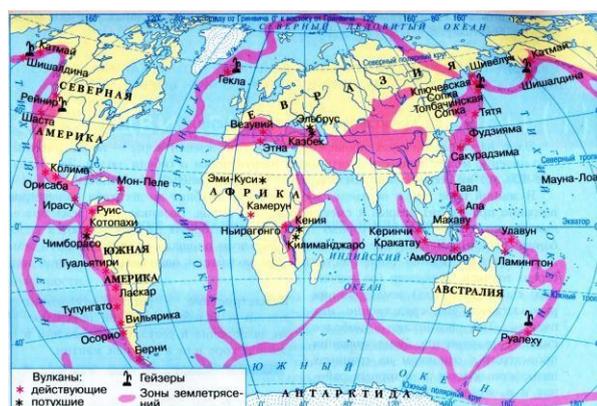


Рисунок 3 – Карта землетрясений, вулканов и геотермальной активности [World seismicity map of ESSA, 1969]

Комбинируя карты природных опасностей и рисков и карты, отражающие геодинамику литосферы, можно установить их прямую связь и взаимозависимость. Карта активных разломов земной коры хорошо отражает напряженно-деформированное состояние литосферы, связанное с различными видами движения и природной опасности (Рисунки 4, 5).

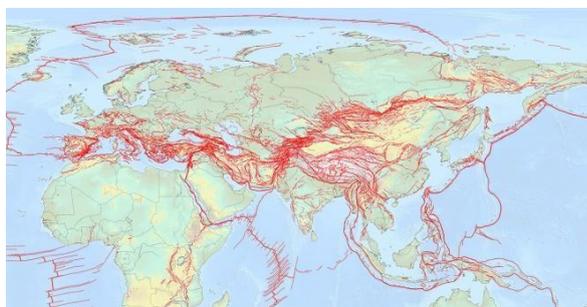


Рисунок 4 – Карта активных и сейсмогенных разломов Евразии 2018 (neotec.ginras.ru)



Рисунок 5 – Суммарная степень природной опасности по субъектам Российской Федерации (МЧС)

По частоте проявления и степени ущерба природные опасности и катастрофы имеют разную оценку в мире и России. (Рисунки 6, 7). На территории России встречается более 30 опасных природных явлений и процессов, среди которых наиболее разрушительными являются наводнения, штормовые ветры, ураганы, смерчи, землетрясения, лесные пожары, оползни, сели, снежные лавины (Рисунок 7).

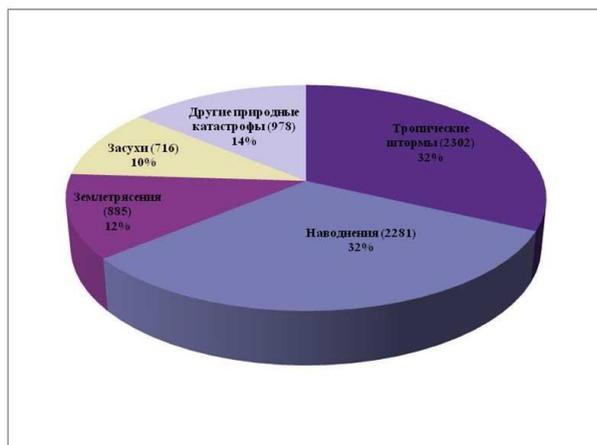


Рисунок 6 – Наиболее распространенные природные катастрофы в мире (1965-2001)
<http://emdat.be/>



Рисунок 7 – Статистика природных опасностей России [Безопасность России, 2015]

Для риск-анализа и риск-менеджмента необходима максимально структурированная унифицированная схема классификации природных опасностей с выделением наиболее характерных представителей опасностей, бедствий и катастроф в зависимости от среды проявления и источника опасности. Предлагается следующая классификация основных опасных геоэкологических процессов, где вводятся **геодинамические и тектонические процессы**, рассматриваемые в работе (Таблица 1).

Таблица 1 – Классификация основных опасных геоэкологических процессов с включением геодинамических и тектонических процессов [Свалова, 2022]

Среда	источник процесса	эндогенный	экзогенный	метеорологический
Литосфера		землетрясения вулканы глубинные разломы геодинамические процессы тектонические процессы	оползни карст суффозия геодинамические процессы тектонические процессы	наводнение засуха выветривание
Гидросфера		цунами	сель лавина переработка берегов	наводнение паводок, половодье шторм
Атмосфера		выбросы вулкана геопатогенная зона	газовые эманации гейзер	шторм ветер торнадо лесные пожары

Разработана концепция определяющей взаимосвязи геодинамической опасности и геоэкологического риска. Таким образом, вводится понятие **геодинамической опасности**, как опасного природного процесса и явления. Следует подчеркнуть, что геодинамические процессы и опасности могут реализовываться в разных средах – литосфере, гидросфере, атмосфере, в то время как тектонические процессы реализуются

в литосфере. И хотя не существует одного определенного опасного процесса, напрямую выражающего геодинамическую опасность, подобно тому, как сейсмичность проявляется в землетрясениях, тем не менее, геодинамическая опасность опосредованно реализуется в разных опасных природных процессах, таких как землетрясения, оползни, извержения вулканов, цунами и др., связанных с движениями в литосфере.

Геодинамическая опасность, по аналогии с определением природной опасности как процесса или состояния природной среды, несущего угрозу жизни и ущерба [Рагозин, 2003], может рассматриваться как процесс движения или связанного с ним напряженно-деформированного состояния геологической среды, несущий угрозу жизни и здоровья людей и ущерба природной и техногенной средам. Геодинамическая опасность есть опасность геодинамических процессов и, обусловленных ими, различного вида опасных геоэкологических процессов. Таким образом, геоэкологический риск опосредованно есть вероятностная мера геодинамической опасности. Геодинамика определяет уровень и особенности протекания геоэкологических процессов. Построение геодинамических моделей регионов опасных природных процессов с целью прогноза и предупреждения стихийных бедствий и катастроф значительно повышает надежность конечных результатов и физически более обоснована с позиций причинно-следственных связей.

Выводы по первой главе:

Разработана концепция определяющей взаимосвязи геодинамической опасности и геоэкологического риска. Геодинамическая опасность – это опасность процесса движения или напряженно-деформированного состояния геологической среды, несущая угрозу жизни и здоровья людей и ущерба техногенной и природной среды. Геодинамика геологической среды рассматривается на разных масштабах как движение литосферных плит, подъем мантийных диапиров и плюмов, движение слоев тектонически расслоенной литосферы, гравитационное движение масс по оползневому склону и др. Геодинамическая опасность характеризуется повышенными скоростями движения вещества тектонически расслоенной литосферы на разных глубинах, контрастностью скоростей поверхностных движений, повышенным напряженно-деформированным состоянием литосферы, трещиноватостью пород, наличием глубинных и поверхностных разломов, повышенным тепловым потоком, геотермальными проявлениями, повышенной сейсмичностью, вулканизмом и магматизмом, активизацией опасных природных процессов, таких как землетрясения, извержения вулканов, оползневые процессы, карст, суффозия, цунами и др. геоэкологических процессов. Геоэкологический риск опосредованно есть вероятностная мера геодинамической опасности.

Во второй главе рассматривается геодинамика литосферы наиболее опасных областей на поверхности Земли, связанных с границами литосферных плит и формированием многих опасных природных процессов, вызванных активными движениями и повышенным напряженно-деформированным состоянием геологической среды. Анализируется сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов и механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром.

Альпийский пояс связан со столкновением континентальных плит (Аравийско-Африканская и Евразийская плиты), а Тихоокеанский пояс связан со столкновением океанической и континентальной плит (Тихоокеанской и Евразийской плит), но у них много общих черт [Богданов, 1988; Богданов и др., 2001; Маловицкий и др., 1988; Родников и др., 2003; Свалова и др., 1991]. Структуры Альпийского и Тихоокеанского

поясов включают задуговые бассейны, морские котловины, осадочные бассейны, орогены (Рисунок 8, 9). Моря и впадины характеризуются тонкой корой и, в основном, высокими тепловыми потоками (Рисунок10), (Таблица 2).

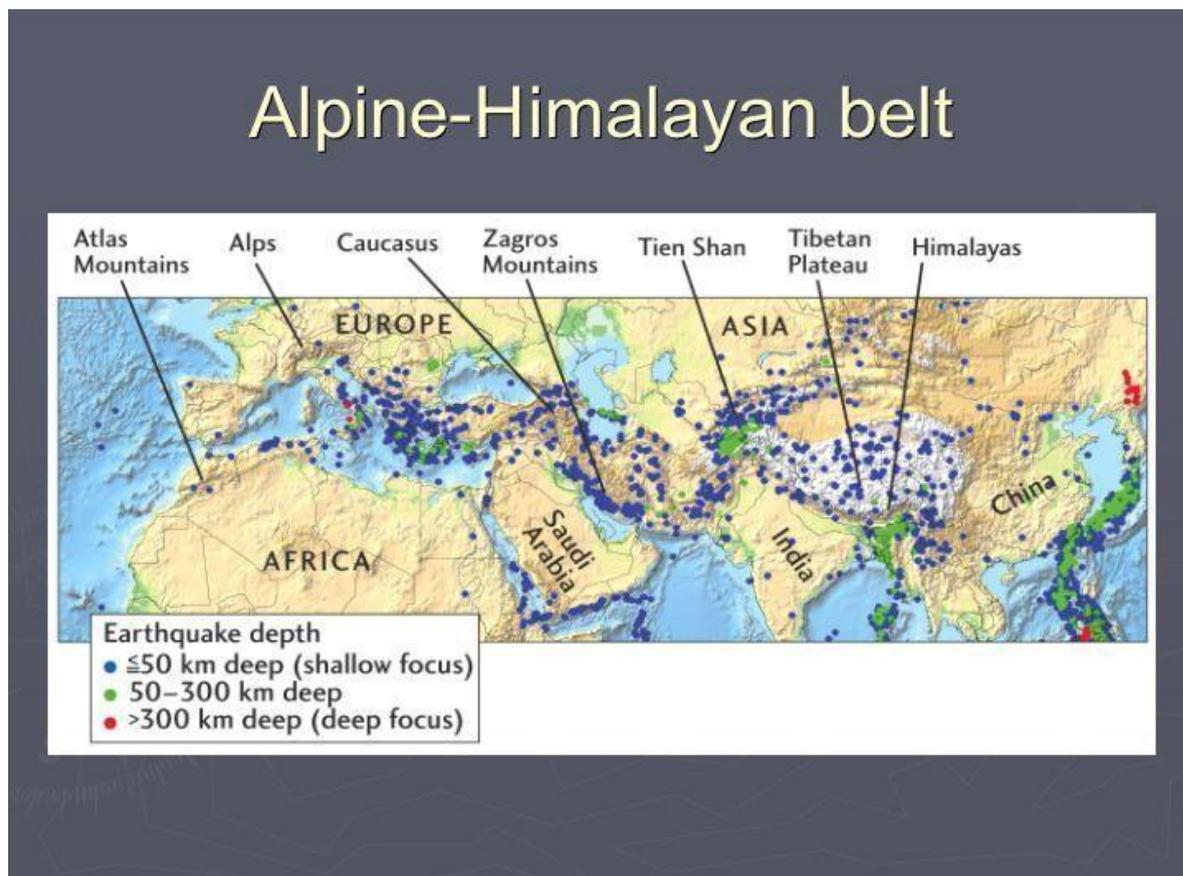


Рисунок 8 – Альпийско-Гималайский пояс (NASA)

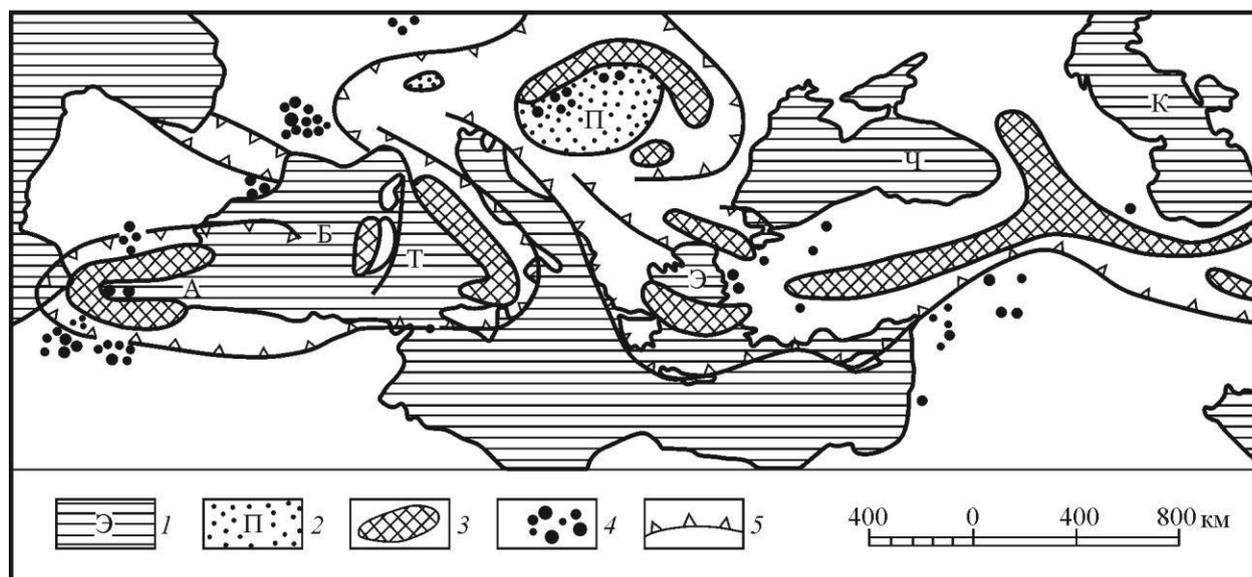


Рисунок 9 – Структура западной части Альпийско-Гималайского пояса.

1 – моря (А – Альборанское, Б – Балеарское, К – Каспийское, Т – Тирренское, Ч – Черное, Э – Эгейское). 2- Паннонская впадина. 3 – вулканические дуги. 4 – ареалы базальтового вулканизма. 5 – фронтальные зоны крупнейших надвиговых структур [Шарков, Свалова, 1989]

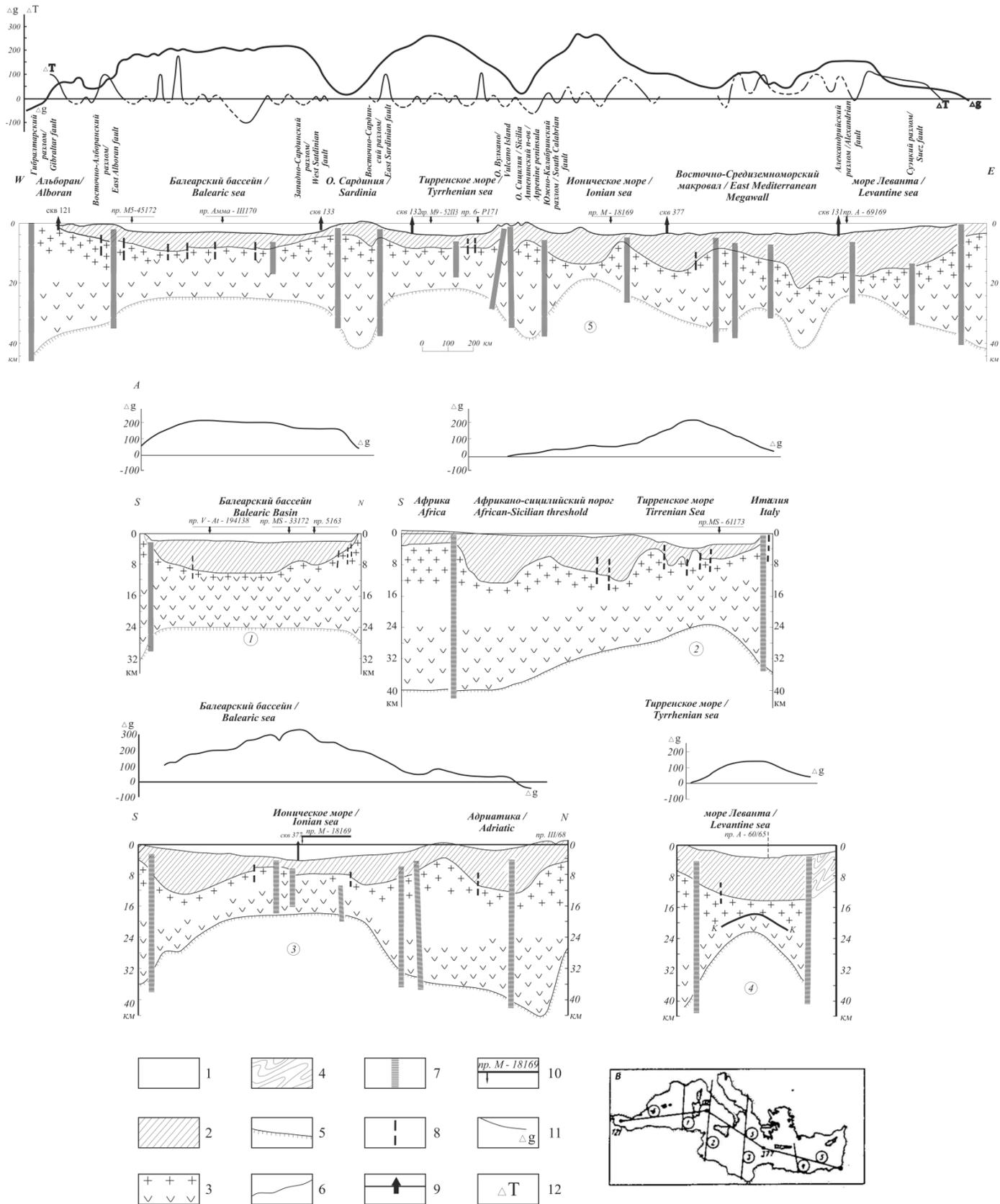


Рисунок 10 – Результаты геолого-геофизических исследований тектонических структур Средиземноморья (первичный материал) [Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980]

Таблица 2 – Геолого-геофизические данные для Альпийского и Тихоокеанского поясов [Свалова, 1993, 2020]

Структуры	Толщина осадочного чехла, км	Толщина кристаллической коры (км) в депрессии (числитель) в окружении (знаменатель)	Тепловой поток, мВт / м ²
1. Тирренское море	6	16/45	30-160
2. Эгейское море	3	15/23	100
3. Черное море	16	15/45	30-35
4. Прикаспийская впадина	24	12/40	50
5. Южно-Каспийская впадина	20	12/45	40-50
6. Ионическое море (юг)	12	10/35	30-40
7. Ионическое море (север)	8	10/30	50-70
8. Балеарское море	8	10/40	50
9. Левантийская впадина	6	8/30	30
10. Паннонская впадина	9	18/27	90
11. Алеутская впадина	5	10/26	60-80
12. Охотское море	4	8/20	100
13. Японское море	2	12/29	100-120
14. Филиппинское море	2	6/13	60

Спрединговые зоны окраинных морей Тихоокеанского пояса проявляются отодвиганием от континентов островных дуг, приобретающих изгиб в сторону океана, что также объясняется подъемом мантийных диапиров. Скорость отодвигания составляет около 2 см/год [Картер, Робертсон, 1987] на фоне коллизии плит со скоростью около 7 см/год. Таким образом, геолого-геофизические данные позволяют связать эти структуры с апвеллингом мантийных диапиров [Тектоника..., 1980; Земная кора..., 1982; Андерсон и др., 1984; Свалова, 2014; Svalova, 1993; Karig, 1974; Ringwood et al., 1988; Rodnikov et al., 2001; Tamaki, 1988].

Мантийный диапиризм вносит существенный вклад в процесс формирования новообразованных впадин Альпийского и Тихоокеанского поясов и окружающих их складчато - покровных структур и является следствием инверсии плотности в системе астеносфера - литосфера. Такая инверсия становится движущей силой на фоне сближения Африки с Евразией в Средиземноморье и Тихоокеанской и Евразийской плит в Тихоокеанском поясе. Мантийный диапиризм порождается гравитационной неустойчивостью в периоды тектономагматической активизации.

Развитие структур над астеносферными диапирами: механико-математическое моделирование.

Глубина поверхности астеносферы под Альпийском поясом колеблется от 30 км в центре Тирренского моря до 70-100 км во впадинах Восточного Средиземноморья, сильно изменяясь по латерали. Характерный размер впадин достигает 500-1000 км и более, расстояние между ними 1000-1500 км.

Чтобы получить аппроксимацию системы механических уравнений путем анализа порядка соответствующих значений величин в этих уравнениях, необходимо выделить малые параметры задачи, которые можно использовать для разложения.

Многочисленные геологические структуры характеризуются довольно пологим залеганием слоев и значительным превышением горизонтального регионального масштаба L над вертикальным масштабом h типичной мощности геологических слоев. Это позволяет ввести в анализ задачи малый параметр h/L . Второй малый параметр задачи F/R , F - число Фруда, R - число Рейнольдса, возникает при анализе реологического поведения вещества в слоях [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2012, 2013, 2014; Svalova, 1992, 1993, 1997].

Рассмотрим двухслойную модель вязкой несжимаемой жидкости, описывающей геодинамику литосферы, состоящей из двух слоев – коры и мантийной литосферы. Отсюда выбор характерных параметров задачи: $h_3 \sim 10$ км – толщина коры, $h_2 \sim 100$ км – толщина мантийной литосферы, $L \sim 1000$ км – горизонтальный масштаб, $\varepsilon = h_3/L = 10^{-2}$ – малый параметр.

Медленные деформации литосферы моделируются с помощью модели вязкого течения в многослойной несжимаемой высоковязкой ньютоновской жидкости с уравнениями Навье-Стокса (1) и уравнения неразрывности (2):

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (2)$$

где v – вектор скорости;
 g – сила тяжести;
 p – давление;
 ρ – плотность;
 μ – вязкость;
 t – время.

Введем безразмерные значения координат, скоростей и давления X, Y, Z, U, V, W, P :

$$x = LX, y = LY, z = hZ, u = u_0U, v = u_0V, w = u_0(h/L)W, p = \rho_0ghP \quad (3)$$

ρ_0, u_0 – характерные значения плотности и скорости.

Тогда можно получить в безразмерной форме уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности для медленных движений в тонком слое для двумерного случая:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial X} = \alpha \mu \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \\ \frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{F}{R \left(\frac{h}{L}\right)^3}, F = \frac{u_0^2}{gL}, R = \frac{u_0 L \rho_0}{\mu_0} \quad (6)$$

где F – число Фруда;

R – число Рейнольдса;

ρ_0, μ_0, u_0 - характерные масштабы плотности, вязкости и скорости. Силы на верхней границе равны 0 (свободная поверхность). Скорости и давления непрерывны на границах слоев. Тогда из уравнений (4-5) можно найти давления и скорости в слоях в зависимости от скорости вещества на нижней границе [Свалова, 2014].

При этом на верхней границе ζ^* выполняется кинематическое условие свободной поверхности, состоящее в том, что частицы не покидают поверхность в процессе движения (7):

$$S \frac{\partial \zeta^*}{\partial t} + U^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} - W^* = 0 \quad (7)$$

$$S = \frac{L}{u_0 t_0} \quad (8)$$

где: S - число Струхалия;

t_0 - масштаб времени.

Аналогично можно рассмотреть границу Мохо как вещественную и непроницаемую, где частицы вещества не покидают поверхность в процессе эволюции. Тогда, подставляя скорости в уравнение свободной поверхности (7), можно получить уравнение движения для любой непроницаемой границы.

Таким образом, разлагая скорости и давления в ряд по $\sqrt{\varepsilon}$ и считая границы между слоями вещественными, можно получить в нулевом приближении уравнения дневной поверхности ζ_3 и поверхности фундамента ζ_2 в зависимости от скорости подъема мантийного диапира $\zeta_1 U_0, W_0|_{\zeta_1}$:

$$\begin{aligned} \text{I} \quad & \frac{\partial^2 \zeta_3}{\partial X^2} = \beta \left[h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] \\ \text{II} \quad & S \frac{\partial \zeta_2}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \zeta_2}{\partial X} + \alpha \left[h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{(h_3)^3}{(h_3)^3 + \frac{\mu_3}{\mu_2} (h_2)^3}, \beta = \frac{1}{\frac{\rho_3}{3} \left[\frac{(h_3)^3}{\mu_3} + \frac{(h_2)^3}{\mu_2} \right]}$$

где $S = \frac{L}{u_0 t_0}$ - число Струхалия;

u_0 - характерный масштаб скорости вещества литосферы;

t_0 - характерное время процессов, μ_i - вязкости слоев;

ρ - плотности слоев.

$$U_0 = a t h k X, \zeta_1(X, t) = -\gamma s h^2 k X - (h_2 + h_3) + \frac{D}{S} t \quad (10)$$

где k, a – характеризуют интенсивность раздвига: k – в центре структуры, a – вдали от центра;

γ – позволяет варьировать форму поднимающегося плюма;

D – скорость подъема плюма $D = S \frac{\partial \zeta_1}{\partial t}$.

Данное поле скоростей качественно достаточно хорошо отражает основные особенности рассматриваемого класса движений: подъем астеносферного плюма, раздвиг над ним и опускание вещества на достаточном удалении от центра. Из решения системы (9-10) получим для достаточно больших значений t :

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= -h_3 - \alpha \gamma sh^2 kX + \alpha h_2 \ln(ch kX) + \alpha(D - h_2 ak) \frac{t}{S} \\ \zeta_3 &= \beta \left[\frac{h_2 a}{k} \ln(ch kX) + \frac{\gamma a}{(2k)^2} ch 2kX - \left(\frac{\gamma a + D}{2} \right) X^2 \right] + C_1(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ полученных выражений показывает, что существует критическая глубина подъема мантийного плюма $h_2 = 2\gamma$, когда изменяется характерная форма слоев литосферы. Если $h_2 > 2\gamma$, то существует прогиб поверхности фундамента в центре раздвига, что действительно имеет место в рассмотренных задуговых морях. Если же $h_2 < 2\gamma$ (глубина плюма невелика) или же скорость его подъема существенна ($D > h_2 ak$), то выпуклости поверхности плюма соответствует подъем поверхности фундамента (Рисунок 11).

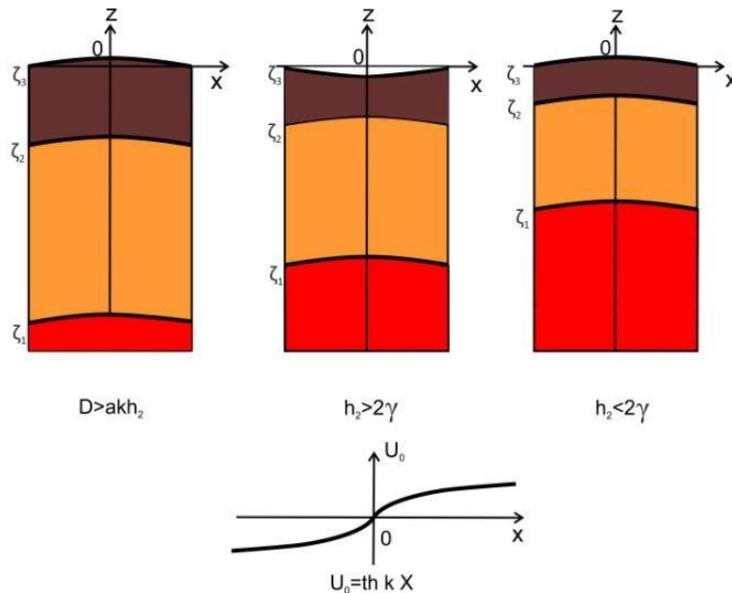


Рисунок 11а – Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром без латерального ограничения движения $U_0 = a t h k X$.

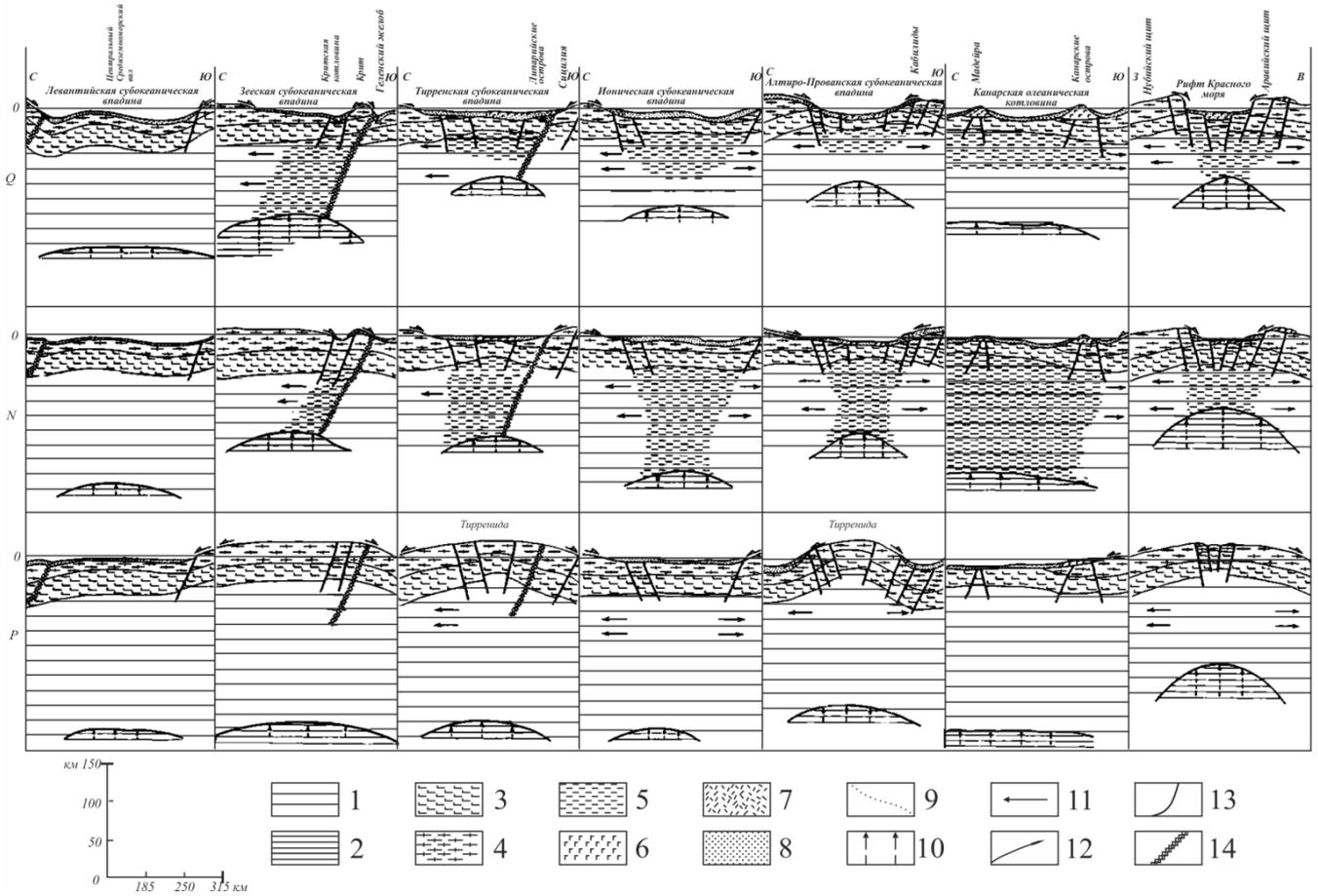


Рисунок 116 – Палеореконструкция разреза слоев земной коры и мантийной литосферы тектонических структур Средиземноморья (первичный материал) [Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980]

В тех случаях, когда на периферии бассейна существуют условия, препятствующие свободному раздвигу литосферы региона, например, вызванные коллизией Аравийско-Африканской и Евразийской плит, поле скоростей на нижней границе слоев можно моделировать в виде:

$$U_0 = \frac{thX}{ch^2X}, \zeta_1 = -sh^2X - (h_2 + h_3) \quad (12)$$

Для большей наглядности результата коэффициенты в модельной задаче опущены.

Тогда:

$$\zeta_1 = -\frac{\beta h_2}{2} \frac{1}{ch^2X} + \frac{\beta}{2} X^2 - \beta \ln(chX) + C(t)$$

$$\zeta_2 \cong -h_3 - \frac{\alpha h_2}{S} t - \alpha(1 - 2h_2)sh^2X + \alpha(1 - 2h_2)(shX)^{\frac{2(h_2-1)}{1-2h_2}} \exp\left[\frac{2-3h_2}{1-2h_2} \frac{t}{S} - sh^2X\right] \quad (13)$$

Теперь уже существуют две критические глубины кровли астеносферного поднятия, при которых разрез слоев качественно меняет свою структуру. При $h_2 > 2/3$ в центре структуры образуется прогиб. При $1/2 < h_2 < 2/3$ поверхность фундамента выполаживается, а при $h_2 < 1/2$ отражает морфологию плюма в центре раздвиги и образует вогнутость фундамента на периферии бассейна. При этом происходит скупивание и надвигообразование на периферии структур (Рисунок 12).

Первым типом скоростей (10) можно моделировать ранние стадии развития структур, вторым типом (12) – Альборанское, Тирренское и Эгейское моря, а также Паннонскую впадину. Смена режима сводового поднятия структурой глубоководной впадины подтверждается целым рядом геологических факторов: особенностями режима осадконакопления, сменой направления палеорек, эволюцией палеоглубин бассейнов и т.д. [Богданов, 1988; Тектоника..., 1980; Земная кора..., 1982; Сулиди-Кондратьев и др., 1980].

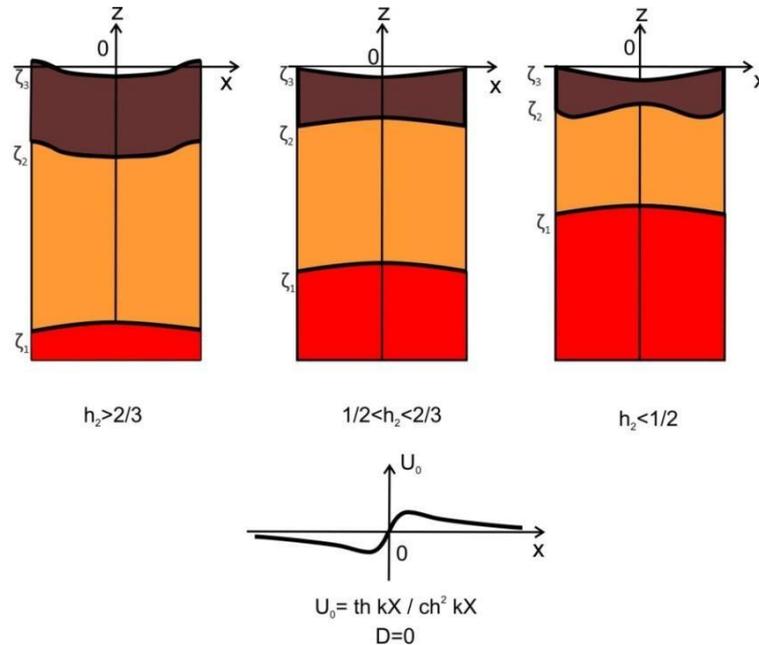


Рисунок 12 – Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром с латеральными ограничениями для раздвигая

Таким образом, разработана механико-математическая модель формирования и эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром на основе приближенного решения уравнения Навье - Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и применения методов разложения по малому параметру, сращиваемых асимптотических разложений, последовательных приближений и приближения тонкого слоя. Получены критические параметры задачи, связывающие глубинную геодинамику с эволюцией рельефа поверхности. Механико-математическое моделирование эволюции литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром показывает, что по мере его подъема при однонаправленном движении на дневной поверхности формируется сначала структура сводового поднятия, а затем – глубокая депрессия.

Анализ полученных решений для движения поверхностных границ при подъеме мантийного диапира дает возможность найти критические параметры задачи и сделать следующие выводы:

Выводы по второй главе:

Разработана механико-математическая модель формирования и эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром на основе приближенного решения уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и применения методов разложения по малому параметру, сращиваемых асимптотических разложений, последовательных приближений и приближения тонкого слоя. Получены критические параметры задачи, связывающие глубинную геодинамику с эволюцией рельефа поверхности. Механико-математическое моделирование эволюции

литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром показывает, что по мере его подъема при однонаправленном движении на дневной поверхности формируется сначала структура сводового поднятия, а затем – глубокая депрессия. Анализ полученных решений для движения поверхностных границ при подъеме мантийного диапира дает возможность найти критические параметры задачи и сделать следующие выводы:

1). Структура сводового поднятия формируется, если глубина диапира невелика или скорость его подъема существенна.

2). Структура осадочного бассейна формируется, если диапир находится достаточно глубоко или если он поднимается медленно.

3). Если на периферии бассейна существуют условия, значительно препятствующие раздвигу, то границы слоев имеют более сложную структуру, определяемую соотношением параметров задачи.

Модель может также применяться для структур разного масштаба, когда размер структуры по латерали значительно превышает толщины слоев.

В третьей главе рассматривается геотермия, сейсмичность и глубинная геодинамика Кавказского региона и решение обратной задачи геодинамики.

Кавказский регион является сложной высоконапряженной геодинамической структурой, характеризующейся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом. Геодинамика Кавказского региона определяется коллизией Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса. Разработано решение обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических проблем, а совместно с геотермическим моделированием, геолого-геофизическими методами и сейсмотомографией могут служить надежным аппаратом изучения глубинной геодинамики в связи с формированием и эволюцией геологических структур.

Используя уравнение неразрывности и приближенное уравнение Навье-Стокса для достаточно медленных движений в тонком слое и задавая поле скоростей U^* , W^* на верхней границе моделирования ζ^* , можно найти распределение скоростей и давлений в слое:

$$P = \rho(\zeta^* - Z) \quad (14)$$

$$U = U^* + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - Z)^2 \quad (15)$$

$$W = W^* + \frac{\partial U^*}{\partial X} (\zeta^* - Z) + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \left[\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \frac{1}{3} (\zeta^* - Z)^3 + \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 (\zeta^* - Z)^2 \right] \quad (16)$$

По известным скоростям на поверхности получены скорости и давления на глубине, что определяет поля напряжений в слое. Полученное решение является решением первой обратной задачи геодинамики – нахождение скоростей, давлений и напряжений вещества на глубине по известным скоростям движения дневной поверхности.

На верхней границе должно также выполняться кинематическое условие свободной поверхности, означающее, что точки поверхности не покидают ее в процессе движения:

$$S \frac{\partial \zeta^*}{\partial t} + U^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} - W^* = 0 \quad (17)$$

$$S = \frac{L}{u_0 t_0} \quad (18)$$

где S – число Струхалия;

t_0 – характерный масштаб времени.

Аналогично можно рассмотреть нижнюю границу моделирования как поверхность, точки которой остаются на ней в процессе эволюции (условие непротекания). Тогда, подставляя скорости, получаем уравнение движения нижней границы ζ_* :

$$S \frac{\partial \zeta_*}{\partial t} - W^* + U^* \frac{\partial \zeta_*}{\partial X} (\zeta^* - \zeta_*) + \frac{\rho}{2a\mu} \left[\frac{\partial \zeta_*}{\partial X} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - \zeta_*)^2 - \frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \frac{1}{3} (\zeta^* - \zeta_*)^3 - \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 (\zeta^* - \zeta_*)^2 \right] = 0 \quad (19)$$

Данное уравнение представляет собой прямое решение обратной задачи, когда рельеф дневной поверхности и скорости на ней определяют движение глубинных границ. Аналогичное уравнение может быть написано для любой вещественной границы на глубине, через которую отсутствует поток вещества. Данное решение является решением второй обратной задачи геодинамики – определение движения границы на глубине по известным скоростям поверхностных движений.

Таким образом, задавая движение дневной поверхности, получаем скорости, давления, напряжения вещества на глубине и уравнение движения глубинных границ.

Некоторые выводы о структуре глубинных движений по известным скоростям и рельефу поверхности можно сделать, анализируя различные геологические структуры и обстановки и возможные поверхностные скорости.

Анализ решений показывает, что осадочный бассейн в условиях растяжения и ороген в условиях сжатия являются более стабильными и вероятными структурами, чем бассейн при сжатии и ороген при растяжении. Вывод представляется достаточно естественным, что говорит о корректности модели и возможности ее дальнейшего развития и применения.

На основе анализа полученных соотношений можно говорить о наличии нисходящих движений в литосфере и погружении подошвы литосферы под горными структурами, что может иметь место в случае Кавказа (Рисунок 13).

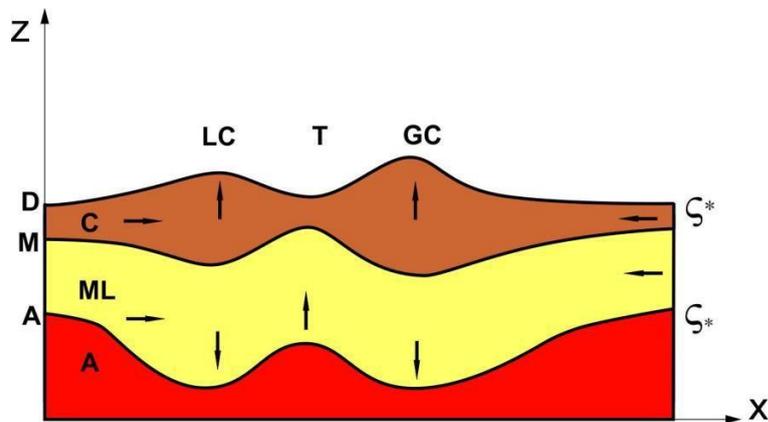


Рисунок 13а – Схематический разрез Кавказского региона на основе механико-математического моделирования.

D – дневная поверхность; M – граница Мохо; A – поверхность астеносферы; C – кора; ML – мантийная литосфера; LC – малый Кавказ; GC – Большой Кавказ; T – Закавказский прогиб. Стрелки – возможные направления движения вещества

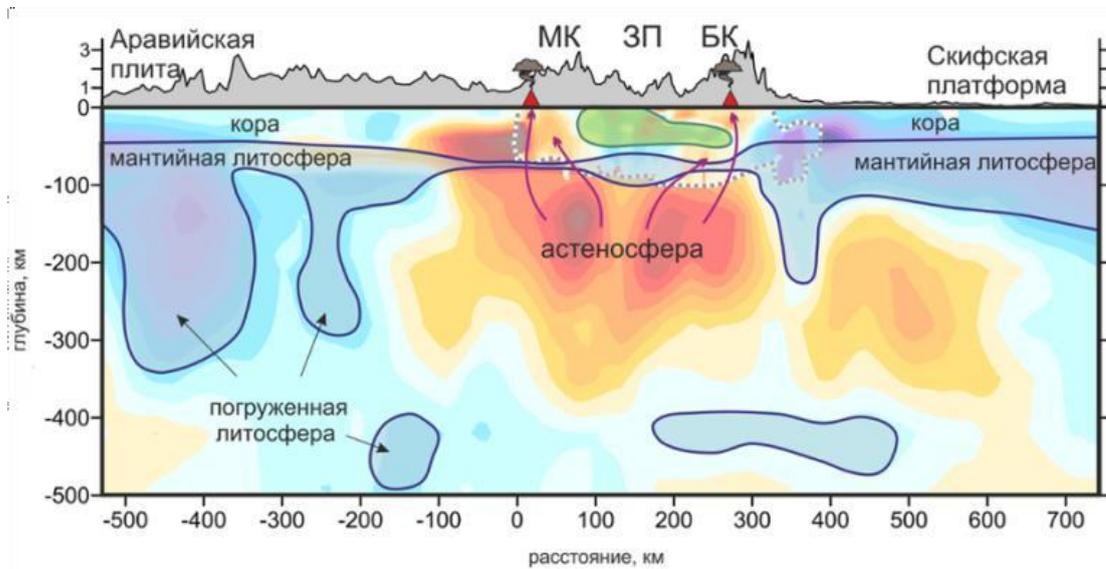


Рисунок 136 – Сейсмотомография Кавказа [Кулаков, 2012]

Таким образом, разработана механико-математическая модель решения обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических процессов.

Выводы по третьей главе:

Получено решение обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики, а именно – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Полученные решения могут использоваться для анализа глубинных геодинамических проблем, а совместно с геотермическим моделированием, геолого-геофизическими методами и сейсмотомографией могут служить надежным аппаратом изучения глубинной геодинамики геологических структур и прогноза нефтегазоносности.

Вместе с тем, коллизия литосферных плит определяется и коллизией глубинных астеносферных потоков. Плиты перемещаются за счет движений в астеносфере. Геодинамика зоны коллизии астеносферных потоков определяется соотношением плотности, вязкости и температуры слоев литосферы и астеносферы. Этими же соотношениями определяется, насколько интенсивно литосферная плита перекрывает подъем астеносферы, и с какой скоростью астеносферный диапир поднимается в зоне коллизии, формируя структуру задугового спрединга или утолщения астеносферы и подъема литосферы. Сложная геодинамическая картина определяется соотношением геолого-геофизических параметров и внешними ограничивающими факторами для скоростей и движений на сферической поверхности Земли и в ее глубинах.

Следует понимать, что геофизика и сейсмотомография дают глубинный разрез в текущий момент времени, в то время как механико-математическое моделирование позволяет изучать эволюцию структуры в динамике. Сравнительный анализ различных подходов и решений дает возможность с большей надежностью делать выводы о глубинных механизмах движений и их проявлении на поверхности Земли и обосновать наиболее вероятные причины формирования и эволюции различных геологических структур и процессов.

В четвертой главе рассматривается геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона и термогравиметрическая модель осадочного бассейна.

Прикаспийская впадина и восточный сегмент Кавказского региона, включая Каспийское море, могут рассматриваться как регионы окрестности восточной части Альпийского пояса, который в свою очередь является западной частью Альпийско-Гималайского пояса, простирающегося от западной оконечности Средиземного моря до Тихоокеанского побережья. Каспийское море пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней докембрийской Восточно-Европейской платформы, молодой эпигерцинской Скифско-Туранской платформы и современного Альпийско-Гималайского орогенного пояса. Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины являются глубокими осадочными бассейнами с толщиной осадочного чехла более 20 км, обладающими высоким нефтегазовым потенциалом и большим народно-хозяйственным значением. Анализ геофизических полей геологических структур позволяет оценить подъем астеносферы, а разработанная самосопряженная термогравиметрическая модель литосферы делает эти оценки надежными и достоверными. Геодинамика и история развития геологических структур определяют магматизм, вулканизм, сейсмичность, геотермические характеристики, геотермальную активность, нефтегазоносность, опасные природные процессы региона, что в свою очередь является обоснованием создания системы комплексного экологического мониторинга на фундаментальной научной базе, прогноза и предупреждения природных стихийных бедствий и катастроф, а также поиска полезных ископаемых, включая углеводороды.

Для определения толщины литосферы Прикаспийской впадины и окружающих регионов предлагается использовать комплексную самосогласованную термогравиметрическую модель многослойной сплошной среды, описывающей в упрощенном виде строение осадочного чехла, консолидированной коры и верхней мантии геологической структуры.

Пусть геотермическое поле для установившегося процесса описывается стационарным уравнением теплопроводности с учетом только кондуктивного теплопереноса. На границах слоев выполняются условия непрерывности температур и тепловых потоков. Дневная поверхность характеризуется температурой 0 °С. Граница литосфера-астеносфера отождествляется с температурой плавления базальтов 1200 °С. Тогда:

$$\begin{aligned} \partial^2 T_i / \partial z^2 &= - Q_i / k_i, \\ T^* &= 0^\circ \text{C}, \\ T_* &= 1200^\circ \text{C}, \end{aligned} \tag{20}$$

$$[T_i] = 0, [k_i \partial T_i / \partial z] = 0,$$

где k_i - средняя теплопроводность i -того слоя;

Q_i - теплогенерация;

$T(x,z)$ – температура;

x – горизонтальная координата;

z – вертикальная координата.

Тогда для поверхностного теплового потока можно получить следующее выражение:

$$q^*(x) = - \frac{T^* + \sum_{i=2}^n \frac{h_i^2 Q_i}{2k_i} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{k_i} \sum_{j=i+1}^n h_j Q_j}{\sum_{i=2}^n \frac{h_i}{k_i}}, \quad (21)$$

где $h_i(x) = z_i - z_{i-1}$ – толщина i -того слоя;

n – число слоев;

$z_1(x)$ – граница литосфера-астеносфера;

$z_2(x)$ – граница Мохо;

$z_3(x)$ – поверхность фундамента;

$z_4(x)$ – дневная поверхность (для нерасчлененного осадочного чехла в упрощенной модели) (Рисунок 14).

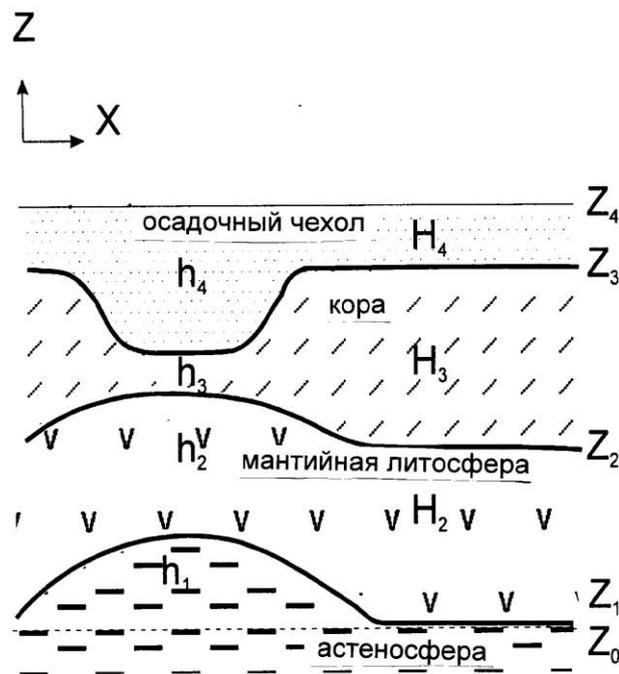


Рисунок 14а – Схематический разрез литосферы Прикаспийской впадины и прилегающей части Восточно-Европейской платформы.

Z_0 – уровень изостатической компенсации в астеносфере; Z_1 – граница литосфера-астеносфера; Z_2 – граница Мохо; Z_3 – поверхность фундамента; Z_4 – дневная поверхность.

В связи с тем, что радиоактивные элементы сосредоточены, в основном, в земной коре, то теплогенерацию в мантийной литосфере можно считать равной нулю $Q_2 = 0$. Тогда для толщины мантийной литосферы получим выражение:

$$h_2(x) = - \frac{T^* + q + \sum_{i=3}^n \frac{h_i^2 Q_i}{2k_i} + \sum_{i=3}^{n-1} \frac{h_i}{k_i} \sum_{j=i+1}^n h_j Q_j}{1/k_2 (q^* + \sum_{i=3}^n h_i Q_i)}, \quad (22)$$

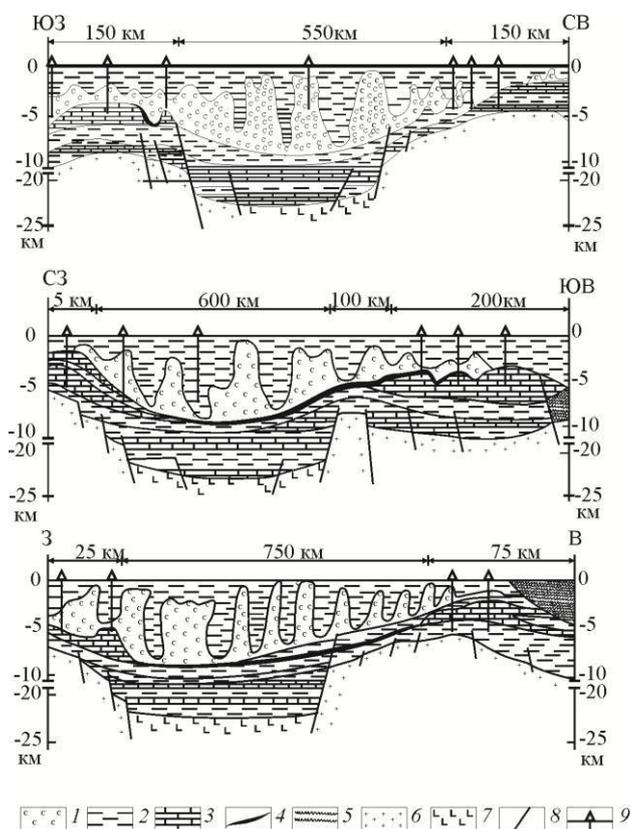


Рисунок 146 – Разрез литосферы Прикаспийской впадины (первичный материал)
[Максимов и др., 1990]

Таким образом, зная распределение поверхностного теплового потока $q^*(x)$, значения теплофизических характеристик слоев (теплопроводность и теплогенерация), а также глубину залегания поверхности фундамента и границы Мохо, можно определить глубину залегания астеносферного слоя, как в центре депрессии, так и в сопряженных областях Восточно-Европейской платформы.

Производя расчеты для характерных значений теплофизических характеристик и известных из геофизики границ, можно получить толщину литосферы в центре впадины порядка 110 км и для платформы около 180 км, т.е. подъем астеносферы под впадиной составляет около 70 км по сравнению с окружающими регионами. При расчетах использовались следующие характерные значения параметров: толщина осадочного чехла в центре впадины 24 км, на платформе 3 км. Толщина консолидированной коры 12 и 40 км, соответственно. Теплогенерация базальтов $0,5 \text{ мВт/м}^3$, гранитов 2 мВт/м^3 , осадков 1 мВт/м^3 . Коэффициент теплопроводности гранитов и базальтов $2,5 \text{ Вт/(м К)}$, терригенных осадочных пород $1,7-2,1 \text{ Вт/(м К)}$, соли - $5,4-6,6 \text{ Вт/(м К)}$, т.е. среднее для осадочного чехла 3 Вт/(м К) . $T_* = 1200 \text{ }^\circ\text{C} = 1473 \text{ K}$, $q^* = 50 \text{ мВт/м}^2$ для впадины и $q^* = 40 \text{ мВт/м}^2$ для платформы.

Рассмотрим теперь гравиметрическую модель литосферы. Будем считать Прикаспийскую впадину и Восточно-Европейскую платформу изостатически скомпенсированными структурами с уровнем компенсации в астеносфере. Тогда будем иметь следующую систему уравнений для впадины и платформы:

$$\begin{cases} \sum h_i \rho_i = \sum H_i \rho_i, \\ \sum h_i = \sum H_i. \end{cases} \quad (33)$$

Здесь ρ_i - плотности слоев. Первое уравнение характеризует равенство давлений на уровне изостатической компенсации для многослойной литосферы впадины (h_i) и платформы (H_i). Второе уравнение содержит предположение, что уровень изостатической компенсации для впадины и платформы совпадает. В частности, для упрощенной модели, состоящей из слоя астеносферы (h_1), мантийной литосферы (h_2 , H_2), консолидированной коры (h_3 , H_3) и осадочного чехла (h_4 , H_4) можно получить величину выступа астеносферы под впадиной по отношению к уровню астеносферы под платформой h_1 и разницу толщин мантийной литосферы для впадины и платформы $H_2 - h_2$:

$$h_1 = \frac{(\rho_4 - \rho_2)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_2)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1},$$

$$H_2 - h_2 = \frac{(\rho_4 - \rho_1)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_1)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1} \quad (24)$$

Для характерных значений плотности $\rho_4 = 2,3 \text{ г/см}^3$ (осадочный чехол), $\rho_3 = 2,7$ (гранит) - $2,9 \text{ г/см}^3$ (базальт), $\rho_2 = 3,3 \text{ г/см}^3$ (литосфера), $\rho_1 = 3,4 \text{ г/см}^3$ (астеносфера) и толщин слоев из предыдущей геотермической модели получаем $h_1 \cong 70 \text{ км}$, $H_2 - h_2 \cong 60 \text{ км}$. Т.е. величина астеносферного выступа под впадиной из гравиметрической модели близка к значению, полученному из геотермической модели, что говорит о корректности моделей. То же самое можно сказать об утолщении мантийной литосферы под платформой. Одни и те же величины определяются двумя независимыми методами, что повышает надежность результата. В то же время, только геотермическая модель дает абсолютные значения толщины литосферы, а гравиметрическая только относительные изменения. Обе модели допускают дальнейшее уточнение и детализировку, увеличение числа слоев, усложнение теплофизических и геофизических характеристик слоев, учет региональных гравитационных и геотермических аномалий.

Таким образом, разработана самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна, позволяющая количественно оценить подъем астеносферного диапира под геологической структурой. Модель исследуется на примере геофизических полей и геологических характеристик Прикаспийской впадины. Установлено, что для характерных значений теплофизических характеристик и геофизических границ для Прикаспийской впадины толщина литосферы в центре впадины порядка 110 км и для платформы около 180 км, т.е. подъем астеносферы под впадиной составляет около 70 км по сравнению с окружающими регионами. Данный результат был позже подтвержден геофизическими исследованиями [Гордиенко, Завгородняя, 1984].

Выводы по четвертой главе:

Разработана самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна, позволяющая количественно оценить подъем астеносферного диапира под геологической структурой. Модель исследуется на примере геофизических полей и геологических характеристик Прикаспийской впадины. Установлено, что для характерных значений теплофизических характеристик и геофизических границ для Прикаспийской впадины толщина литосферы в центре структуры составляет порядка 110 км и для платформы - около 180 км, т.е. подъем астеносферы под впадиной составляет около 70 км по сравнению с окружающими

регионами. Позже эти результаты были подтверждены геофизическими исследованиями.

В пятой главе рассматривается геоэкологическая опасность оползневой процесса и моделирование гравитационного движения масс по оползневому склону.

Одним из методов изучения оползневых процессов является механико-математическое моделирование гравитационного движения масс по оползневому склону. Для разного вида оползней и на разных стадиях своего развития оползневой процесс может описываться различными механическими и реологическими моделями. Если на стадии образования трещин откола, потери устойчивости, отрыва блоков применяются модели упругой среды и модели разрушения, то в процессе медленного движения пород по склону может применяться модель высоковязкой несжимаемой жидкости. Граничные условия задачи при этом также зависят от конкретной ситуации. Так, в случае медленного движения на нижней границе слоя используется условие прилипания. Если же рассматривается процесс селеобразования, подводного оползня или снежной лавины, то на нижней границе возможно условие проскальзывания или более сложное граничное условие. Выбор адекватной модели процесса и постановка начальных и граничных условий является самостоятельной механической задачей.

Для моделирования движения материала по оползневому склону используется модель высоковязкой несжимаемой жидкости, описываемой уравнением Навье-Стокса. Такая модель дает возможность вычисления скоростей движения среды и сравнения их с результатами мониторинга. Результаты моделирования позволяют определить положение точек максимальных скоростей на склоне, которые должны быть тестируемы в первую очередь. Модель дает возможность изучить фундаментальные аспекты движения материала по оползневому склону и исследовать проблемы снижения риска оползневых процессов, в частности, анализировать и оценить дальность и площадь распространения оползневого тела при наступлении опасного события.

Будем рассматривать медленное движение оползневых масс по склону как движение высоковязкой несжимаемой ньютоновской жидкости, описываемой приближенным уравнением Навье-Стокса.

Пусть характерный горизонтальный масштаб тела оползня L значительно превосходит его толщину h . Будем также считать оползень достаточно протяженным в плане, что позволяет трехмерную модель рассматривать как двумерную для сечений оползневого тела. Тогда можно получить распределение полей скоростей и давлений в слое:

$$\begin{aligned}
 P &= \rho(\zeta^* - Z) \\
 U &= U_0 + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} [(\zeta^* - Z)^2 - (\zeta^* - \zeta_0)^2] \\
 W &= W_0 + \frac{\partial U_0}{\partial X} (\zeta_0 - Z) + \frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \left[\frac{1}{6} (\zeta^* - Z)^3 + \frac{1}{3} (\zeta^* - \zeta_0)^3 - \frac{1}{2} (\zeta^* - Z)(\zeta^* - \zeta_0)^2 \right] \\
 &\quad + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 (Z - \zeta_0)^2 + \frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \frac{\partial \zeta_0}{\partial X} \zeta_0 (\zeta^* - \zeta_0)
 \end{aligned} \tag{35}$$

ζ_0 - нижняя граница слоя; ζ^* - верхняя граница.

Пусть на нижней границе выполняется условие прилипания: $U_0=W_0=0$

Расход масс вдоль слоя имеет вид:

$$Q = \int_{\zeta_0}^{\zeta^*} U dz = -\frac{\rho}{3\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - \zeta_0)^3 \quad (36)$$

Т.к. $Q = \text{const}$ вдоль X , то:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} (\zeta^* - \zeta_0)^3 + \frac{9\alpha\mu Q}{\rho} \left[\frac{3\alpha\mu Q}{\rho} + (\zeta^* - \zeta_0)^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial X} \right] = 0 \quad (37)$$

Условие выпуклости верхней границы имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} < 0 \Rightarrow$$

$$\frac{3\alpha\mu Q}{\rho} > -(\zeta^* - \zeta_0)^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial X} \quad (38)$$

Отсюда форма поверхности движущейся массы будет иметь следующий вид (Рисунок15).

Выпуклая поверхность возникает, если:

1. Q велико, т.е. расход вещества велик, поток интенсивный; 2. μ велико, это означает, что вязкость велика, вещество плохо растекается и может поддерживать большой угол; 3. ρ мало, т.е. вещество рыхлое; 4. $\text{grad} \zeta_0$ мал, т.е. нижняя поверхность пологая; 5. $(\zeta^* - \zeta_0)$ мало, т.е. толщина слоя мала.

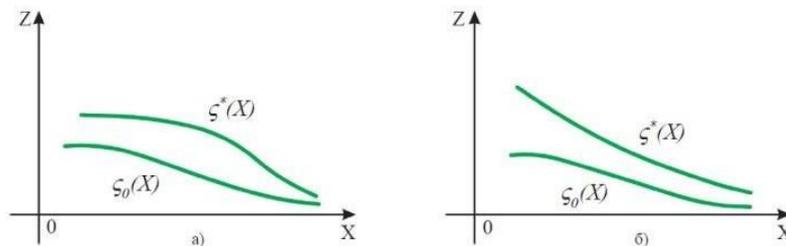


Рисунок15а – Различная возможная форма оползневой поверхности: а) – выпуклая, б) – вогнутая.

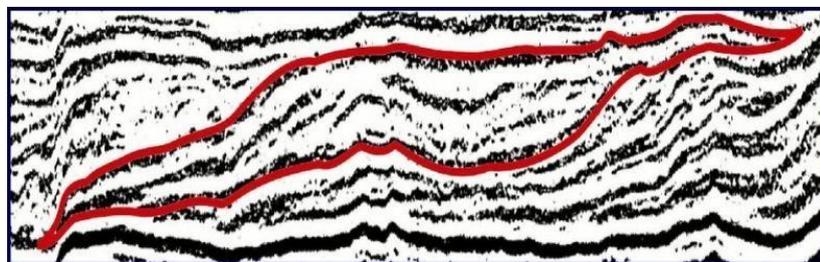


Рисунок15б – Клиноформа осадочного чехла [Гурари, 2003]

При анализе полученных условий следует отметить, что все они представляются достаточно естественными для объяснения формирования на склоне структур типа наплывов и клиноформ осадочного чехла, что говорит о корректности и представительности модели.

Важным представляется вопрос определения места максимальных скоростей на склоне. При решении вопроса о расположении поста мониторинга на оползневом склоне оптимальным местом для размещения датчиков скоростей движения масс является точка максимальных скоростей движения в массиве пород.

Рассмотрим массив осадочных пород с верхней границей ζ^* , представляющей оползневый склон. Нижнюю границу ζ_0 совместим с осью X. Максимум горизонтальной скорости U достигается на верхней границе ζ^* массива вследствие условия:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\rho}{\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - Z) = 0 \Rightarrow Z = \zeta^* \quad (39)$$

Точку максимальной горизонтальной скорости на поверхности ζ^* находим из условия равенства нулю первой производной:

$$\frac{\partial U^*}{\partial X} = 0, \quad U^* = -\frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^*)^2 \quad (40)$$

Отсюда легко получить условие:

$$\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \zeta^* + 2 \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 = 0 \quad (41)$$

Следует иметь в виду, что $\zeta^*(X)$ является известной наблюдаемой функцией - поверхностью оползневого склона. И полученное условие позволяет найти точку на склоне, где скорость движения максимальна.

Рассмотрим для наглядности и иллюстрации полученного решения поверхность оползня в виде (Рисунок16):

$$\zeta^*(X) = -thX + 1 \quad (42)$$

Тогда условие (1) дает:

$$th^2X - thX - 1 = 0, \quad (43)$$

Откуда получаем

$$thx = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \text{ и } \zeta^* = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,62.$$

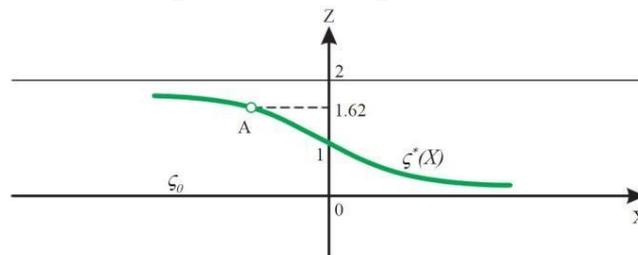


Рисунок 16а – А - точка максимальной горизонтальной скорости движения масс на поверхности склона.

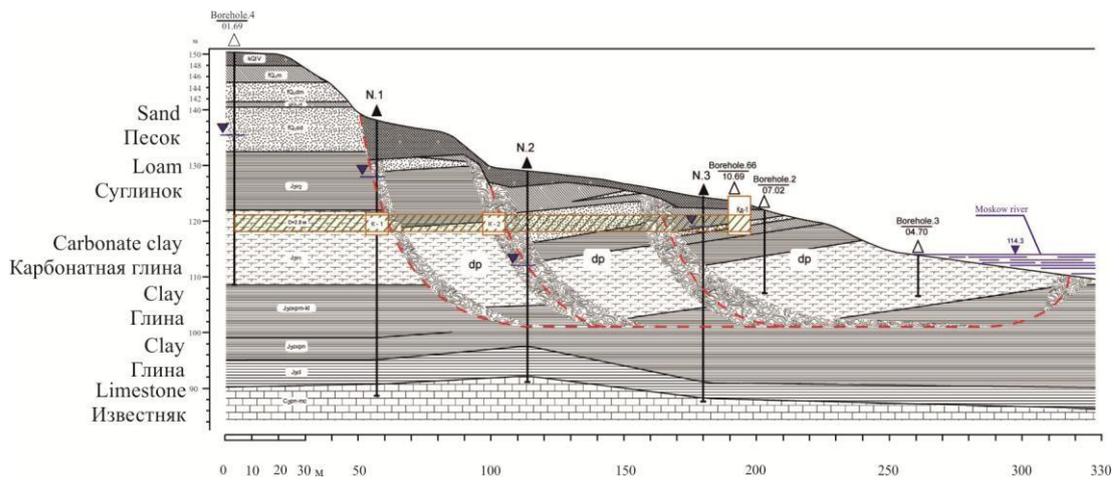


Рисунок 16б – Схематический разрез оползневого склона в Коломенском, схема мониторинга (первичный материал) (Постоев, 2012)

Такое расположение точки А максимальной горизонтальной скорости представляется реальным, а более точные данные о строении массива и его поверхности дадут возможность определить такую точку на конкретном склоне. Именно точка максимума скорости на склоне определяет место возможного срыва оползня в случае достижения предельных напряжений в массиве пород.

Точек локального максимума скорости на склоне может быть несколько, что характеризует возможность срыва оползня на каждой террасе склона.

Аналогичная модель вязкой несжимаемой жидкости может использоваться для расчета поражения площади оползневым процессом при схождении оползня или для моделирования селевого и лавинного процесса.

Таким образом, разработана механико-математическая модель гравитационного движения масс по оползневому склону на основе уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Найлены критические параметры задачи смены режимов движения с выделением потенциальных областей мониторинга.

Выводы по пятой главе:

Разработана механико-математическая модель гравитационного движения масс по оползневому склону на основе уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Найлены критические параметры задачи смены режимов движения, с выделением потенциальных областей мониторинга.

Установлено, что выпуклая поверхность типа клиноформы или наплывов осадочного чехла возникает, если:

- 1) расход вещества велик, поток интенсивный;
- 2) вязкость велика, вещество плохо растекается и может поддерживать большой угол;
- 3) плотность мала, т.е. вещество рыхлое;
- 4) нижняя поверхность пологая;
- 5) толщина слоя мала.

В шестой главе исследуется риск опасных геоэкологических процессов, Рассмотрены различные подходы к оценке геоэкологического риска. Разработана концепция и методика унификации, формализации и цифровизации оценки и картографирования природно-экологического риска на базе общей платформы управления риском и выявления определяющих параметров природной опасности для различных видов опасности, территорий и природно-техногенных условий, а также

интегрального геоэкологического риска. Решается проблема управления твердыми бытовыми и коммунальными отходами (ТБО и ТКО) на примере Московской области.

В разделе 6.1. анализируется алгоритм управления геоэкологическим риском и различные подходы к оценке риска. Концепция управления геоэкологическим риском включает следующие понятия:

1. Идентификация опасности; 2. Оценка уязвимости; 3. Анализ рисков; 4. Понятие приемлемого риска; 5. Оценка рисков; 6. Картографирование рисков; 7. Меры по снижению риска: а) законодательные; б) организационные и административные; в) экономические, включая страхование; г) инженерно-технические; д) моделирование; е) мониторинг; ж) информация. В узком смысле управление геоэкологическим риском рассматривается как система мер, ведущих к снижению риска.

Существует много определений риска [Knight, 1921; Рагозин, 2003; Brikmann, 2007; Dirk Proske, 2007; Corominas et al., 2014; Vranken et al., 2015].

Геоэкологический риск рассматривается как вероятностная мера опасности. Одним из наиболее распространенных определений геологического риска является: риск есть математическое ожидание ущерба. Или риск равен произведению вероятности возможного опасного события на произведенный ущерб:

$$R = PxD, \quad (34)$$

где R – риск; P – вероятность; D – ущерб.

Причем ущерб подразумевается как чисто экономический – зданиям и сооружениям, так и выраженный в деньгах ущерб от потери человеческих жизней.

Также ущерб можно оценить как:

$$D = P_TVE, \quad (35)$$

где E - элемент риска, выраженный в денежном эквиваленте. Он может отражать стоимость ремонта или реконструкции поврежденного объекта, а также восстановления полностью утраченного объекта;

P_T - временная вероятность повреждения;

V - уязвимость объекта [Vranken et al., 2015]. Уязвимость - это степень потери (разрушения) объекта, подверженного естественной или искусственной опасности. Она изменяется от 0 (без потерь) до 1 (полная потеря).

При оценке сейсмического риска R_s используется следующее определение [Ларионов, 2017]:

$$R_s = PxV, \quad (36)$$

V – уязвимость населения.

$$V = \frac{M(N_s)}{N}. \quad (37)$$

где N_s - число погибших на территории в результате землетрясения;

$M(N_s)$ – математическое ожидание числа погибших;

N – численность населения на территории, т.к. $P \leq 1$ и $V \leq 1$, то $R_s \leq 1$.

Для автоматизированного анализа фактического материала и построения карт интегрального риска необходимо найти суперпозицию карты интегральной природной опасности и интегральной карты (объединения карт) возможного ущерба, т.е. для

каждого i – того фрагмента карты риска R_i найти произведение вероятности интегрального опасного события P_i на сумму различных i – тых возможных ущербов от опасных процессов:

$$R = P \times D$$

где R – риск;
 P – вероятность;
 D – ущерб.

$$R_i = P_i \times D_i$$

$$R_i = \sum_j \alpha_j P_{ij} \sum_k \beta_k D_{ik} \quad (38)$$

где α_j - вес отдельной природной опасности;
 β_k - вес ущерба для отдельного параметра ущерба.

Параметрами ущерба могут рассматриваться: плотность населения, плотность застройки, плотность дорог и коммуникаций, стоимость земли, стоимость жилья. Для оценки риска предлагается использовать следующую схему (Таблица 3).

Схема в различных модификациях может использоваться как для оценки отдельного риска от определенной опасности, так и для интегрального риска.

Чтобы учесть все эти параметры, необходима весовая оценка вклада каждого параметра в процесс. Аналогично, весовая оценка вклада потребуется при оценке интегрального риска как суммы рисков от различных опасных процессов. Что в свою очередь требует экспертной оценки специалистов, статистических данных и разработки математических методов и подходов.

Одним из наиболее продуктивных методов оценки весовых характеристик вклада природных опасностей от каждого из опасных природных процессов в оценку интегрального риска может служить метод анализа иерархий (Analytic hierarchy process – АНР, русская аббревиатура – МАИ), разработанный Томасом Саати (США) в 1970 г. [Саати, 1993].

Таблица 3 – Схема расчета оценки риска [Свалова, 2022]

оценка риска R			
оценка опасности P		оценка ущерба D	
экспертная, статистическая	параметрическая	экспертная, статистическая	параметрическая
{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1}	1) определяющие параметры опасности P_{ij} , 2) оценка параметров P_{ij} , 3) оценка веса параметров α_j	{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1}	1) определяющие параметры ущерба D_{ik} , 2) оценка параметров D_{ik} , 3) оценка веса параметров β_k
расчет риска $R_i = \sum_j \alpha_j P_{ij} \sum_k \beta_k D_{ik}$			

Основа метода Саати – попарные сравнения альтернатив по каждому из критериев и попарное сравнение критериев с точки зрения важности для поставленной цели. Таким

образом, все сравнения в данном методе производятся попарно, – то есть самым простым и очевидным методом. Таким образом, метод позволяет получить объективные математические соотношения между альтернативами на основе субъективного взгляда на ситуацию лица, принимающего решение. Метод Саати апробировался и проверялся, в частности, на основе решений с известным результатом.

В разделе 6.2. решаются вопросы устойчивого развития горных территорий. Комплексный системный подход к решению проблем устойчивого развития территорий может осуществляться на основе концепции управления риском, когда количественно оценивается риск от каждого последующего шага развития территорий и внедрения в экологическую среду и даются рекомендации по снижению такого риска. Также следует учитывать все многообразие опасных природных процессов на данной территории и возможное усиление их воздействия на геологическую среду и увеличение возможных ущербов при возрастающей экологической нагрузке на систему.

Природный риск горных и равнинных территорий имеет свою специфику и особенности. Многие геоэкологические проблемы стоят особенно остро на горных территориях. Если наибольшей природной опасностью для равнинных территорий являются наводнения, то для горных местностей наибольшую опасность представляют землетрясения. И проливные дожди, и землетрясения являются триггерами для оползневых процессов – селей, обвалов, осыпей, оползней разного типа, которые также наиболее опасны для горных территорий. Основными опасными природными процессами на горных территориях являются землетрясения, оползни и наводнения (Рисунок 17).

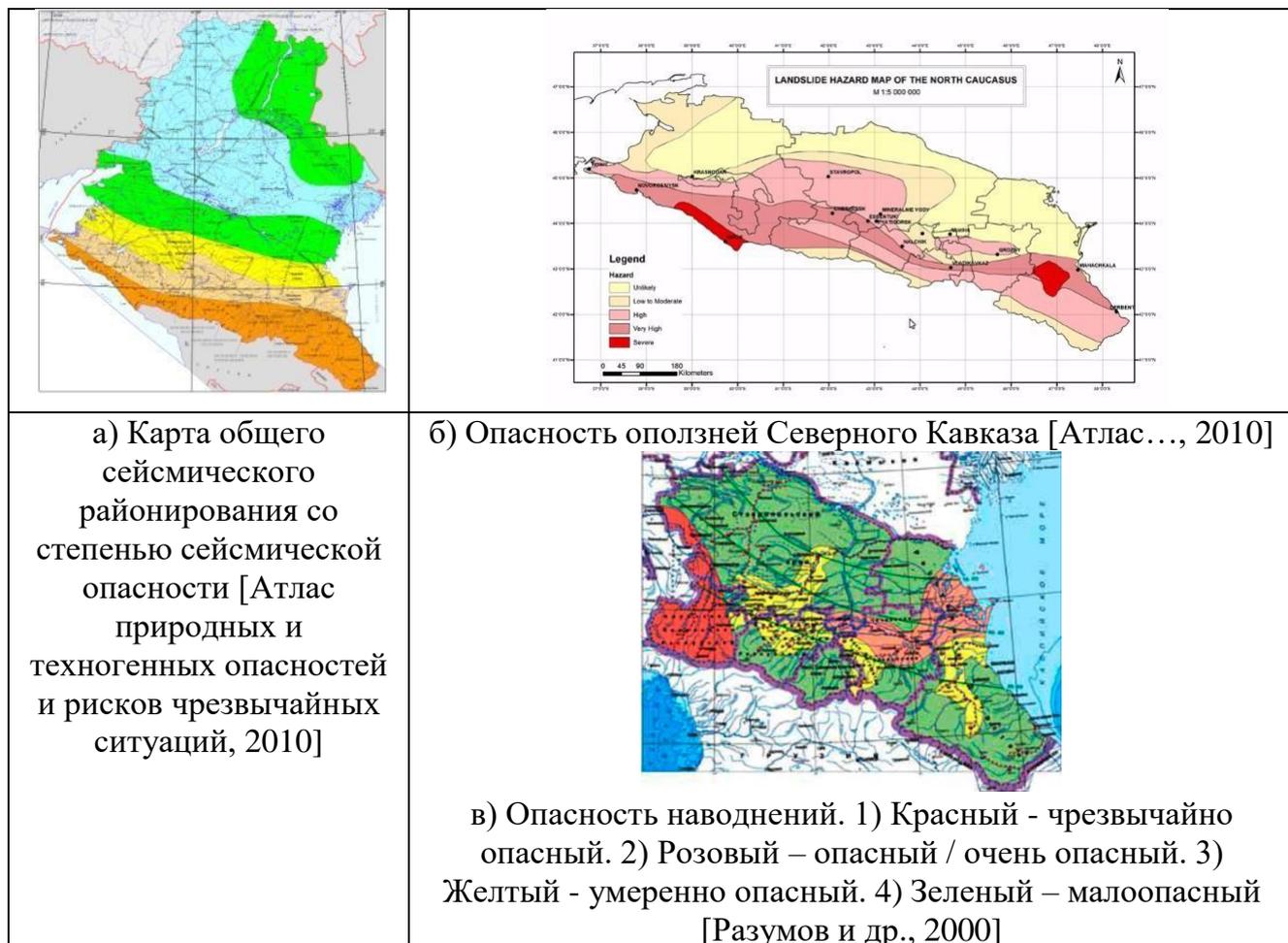


Рисунок 17 – Опасные природные процессы Кавказского региона

Используем метод Саати для оценки весов параметров риска. Для сравнения Саати предложил использовать качественные признаки, переводимые далее в количественные значения по 9-ти балльной шкале (Таблица 4).

Таблица 4 – Качественные варианты сравнения и соответствующие им количественные баллы

Качественное сравнение	Количественный аналог	Качественное сравнение	Количественный аналог
Равно, одинаково,	1	Равно, одинаково,	1
Немного лучше	3	Немного хуже	1/3
Лучше, важнее	5	Хуже, менее важно	1/5
Значительно лучше	7	Значительно хуже	1/7
Принципиально лучше	9	Принципиально хуже	1/9

Построение матрицы попарных сравнений критериев по цели.

Согласно экспертным оценкам, можно считать, что для горных территорий землетрясения являются самыми опасными процессами, опаснее, чем оползни, и значительно опаснее, чем наводнения. А оползни опаснее, чем наводнения. Тогда можно получить **матрицу попарных сравнений критериев** для землетрясений (ЗТ), оползней (О) и наводнений (Н) (Таблица 5).

Далее проводится нормировка матрицы:

1. Находим сумму элементов каждого столбца.
2. Делим все элементы матрицы на сумму элементов соответствующего столбца (Таблица 6).

3. Определяем веса строк. Для этого определяем среднее значение в каждой строке. Полученный в итоге столбец задает веса строк матрицы - веса критериев с точки зрения поставленной цели. Этот столбец называется **весовым столбцом критериев по цели** (Таблица 6).

Таблица 5. Матрица попарных сравнений критериев

	ЗТ	О	Н
ЗТ	1	5	7
О	1/5	1	5
Н	1/7	1/5	1

Таблица 6. Нормировка матрицы и весовой столбец критериев по цели

	ЗТ	О	Н	$\sum_{\text{стр}}/3$
ЗТ	0,745	0,8	0,56	0,7
О	0,15	0,16	0,38	0,23
Н	0,1	0,03	0,08	0,07
Σ	1,343	6,2	13	

Полученный столбец {0,7; 0,23; 0,07} задает веса строк матрицы. Тогда вес землетрясений при оценке интегральной опасности 0,7, оползневых процессов 0,23, а наводнений 0,07. Что отражает наибольший вклад сейсмической опасности в

интегральную природную опасность. Таким образом получен весовой вектор природных опасностей: $\alpha_j = \{ 0,7; 0,23; 0,07 \}$.

Составив аналогичную матрицу попарных сравнений критериев по цели для оценки ущерба, считая плотность населения значительно важнее плотности коммуникаций, а плотность коммуникаций важнее плотности застройки, в качестве основного параметра с наибольшим весом можно выделить плотность населения, которая определяет все остальные параметры. Тогда можно получить весовой вектор потенциальных ущербов $\beta_k : \beta_k = \{ 0,7; 0,23; 0,07 \}$. И затем интегральный риск рассчитывается по формуле $R_i = \sum_j \alpha_j P_{ij} \sum_k \beta_k D_{ik}$.

Исторически сложилось так, что именно на «горячей полосе» Кавказа по степени природной опасности сконцентрирована наибольшая плотность населения (Рисунок 18), плотность коммуникаций и застройки, техногенной нагрузки, что в свою очередь определяет «горячую полосу» Кавказа по геоэкологическому риску, на которой выделяются «горячие пятна» риска 1-го и 2-го класса (ранга) (Рисунок 19).

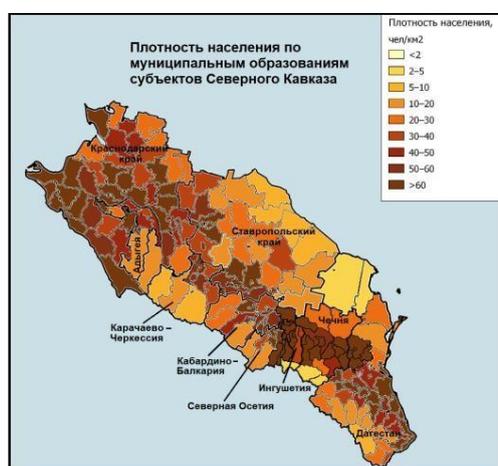


Рисунок 18 – Плотность населения Северного Кавказа (Росстат)

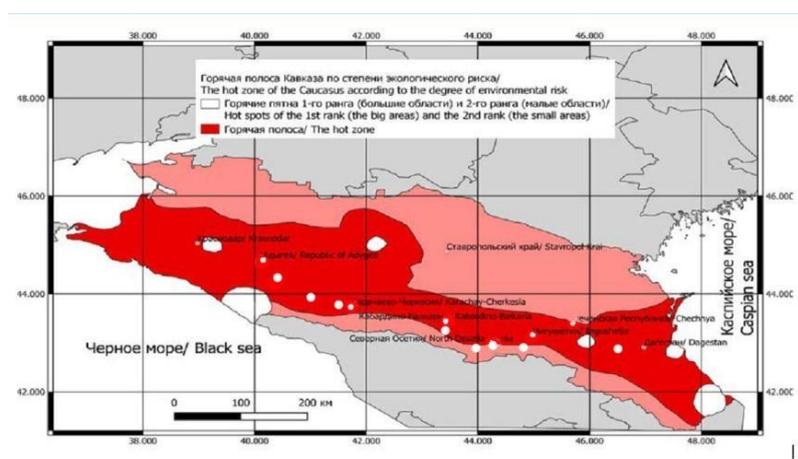


Рисунок 19 – «Горячие пятна» риска на «горячей полосе» Кавказа (темная полоса). Большие белые круги – «горячие пятна» 1-го класса (ранга), малые белые круги – 2-го класса [Свалова, 2022]

«Горячая полоса» Кавказа по степени экологического риска, характеризующая зону коллизии Африканской и Евразийской литосферных плит, проходит от Махачкалы через Грозный, Владикавказ и Краснодар, расширяясь к Черноморскому побережью Кавказа и Азовскому морю. На территории «горячей полосы» выделяются «горячие пятна» 1-го класса риска, связанные с высокой плотностью населения и особо ценными объектами – Дербент, единственный на Кавказе объект культурного наследия ЮНЕСКО, и горный кластер Сочи с Олимпийскими объектами, а также «горячие пятна» 2-го класса риска – крупные города и курорты Северного Кавказа.

В разделе 6.3. решается проблема оценки оползневой риска на урбанизированных территориях. Решается задача оценки оползневой риска урбанизированных территорий на примере города Москвы с выделением «горячих пятен» по степени оползневой риска. Оползневые процессы на территории Москвы хорошо изучены [Москва. Геология и город.1997]. Оползни занимают около 3% территории города, где насчитывается 15 глубоких и множество мелких оползней.

Карта оползневой риска на территории Москвы представляет суперпозицию карты оползневой опасности и карты интегрального ущерба, включающей оценку плотности

населения, плотности застройки, цены земли, стоимости жилья, плотности дорог, инфраструктуры и коммуникаций.

Анализ всех 15 глубоких оползней на территории Москвы, позволяет отнести к наиболее опасным объектам, оползни, расположенные вдоль Москвы-реки на Воробьевых горах, в Коломенском, на Карамышевской набережной и в Москворечье. Угол склонов варьирует в пределах от 10 до 40°.

Для оценки риска наряду с опасностью необходимо оценить потенциальный ущерб. Самые дорогие земли и постройки в Москве находятся в центре города. Там же расположены и старые исторические постройки, наиболее уязвимые для опасных природных процессов. В центре города также расположены наиболее дорогие новые наземные и подземные постройки, линии метрополитена, сложные дорожные и технические коммуникации повышенной плотности. Именно здесь - повышенная плотность населения и людей в дневное время. Можно считать, что чем ближе к центру Москвы, тем больше потенциальный ущерб от возможного оползневого процесса

Области с самой высокой степенью оползневой опасности и самым высоким ущербом и составят области наивысшего оползневого риска на территории Москвы. Это будут области в окрестности Москвы-реки и Яузы, а также - на участках контрастного рельефа вдоль русел палеорек в центре города. Это - участок на Воробьевых горах, расположенный рядом с Лужнецким метромостом, Андреевским мостом, Андреевской набережной, где находятся Андреевский монастырь, церковь (Храм Живоначальной Троицы на Воробьевых горах), здание Президиума РАН, лыжный трамплин, фуникулер, канатная дорога, различные новые дома и постройки. Это участки в районе Кремлевского холма, Котельнической набережной, Самотечной площади, Николоямской набережной, Спасо-Андроникова монастыря

Эти территории являются «горячими пятнами» на карте риска. И если в некоторых из этих точек плотность населения не так высока, то другие компоненты (стоимость земли, историческая важность объекта, плотность подземных коммуникаций и др.) дают большой вклад в высокую оценку риска.

Для автоматизированного анализа фактического материала и построения карт риска необходимо найти суперпозицию карты оползневой опасности и интегральной карты (объединения карт) возможного ущерба, т.е. для каждого i – того фрагмента карты риска R_i найти произведение вероятности оползневого события P_i на сумму различных j – тех возможных ущербов от оползней:

$$R_i = P_i \cdot \sum_j D_{ij} \quad (39)$$

Карты оползневой опасности при этом необходимо проградуировать от 0 до 1, чтобы по возможности отразить вероятность оползневого события. Так, градация возможна по пятибалльной шкале (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1), где 0 соответствует отсутствию оползневой опасности, 0,25 – низкой, 0,5 – средней, 0,75 – высокой и 1 – очень высокой вероятности оползневого процесса. Такая оценка носит экспертный характер.

Для комплексной оценки ущерба на каждом участке предлагается проградуировать возможный ущерб от каждого параметра по трехбалльной системе (0, 1, 2), где 0 означает отсутствие ущерба, 1 – умеренный, 2 – высокий ущерб. Параметрами ущерба здесь могут рассматриваться 1) плотность населения, 2) плотность застройки, 3) плотность дорог и коммуникаций, 4) стоимость земли, 5) стоимость жилья. Чем выше значение параметра (стоимость земли, жилья и т.д.), тем выше ущерб в случае опасного события. Тогда возможный ущерб по 5 параметрам в каждом элементе изменяется от 0

до 10. Риск в каждом элементе также варьируется от 0 до 10. Это риск в относительных единицах (больше-меньше) по 10-и балльной шкале. Разбив карту области на квадраты и вычислив риск для каждого квадрата, можно получить карту риска области по 10-и балльной шкале.

Оползнеопасные участки расположены преимущественно вдоль русел реки Москвы и Яузы. Участками наибольшего оползневого риска – «горячими пятнами» 1-го класса – будут области наибольшей оползневой опасности и наибольшего ущерба в случае оползневой события. По предложенной формуле расчета риска эти области могут оцениваться в 7-8 баллов. Это области в районе Кремлевского холма и Воробьевых гор (Рисунок 20). На Рисунке 21 показаны «горячие пятна» 2-го класса, соответствующие оцененному геоэкологическому риску 5-6 баллов.

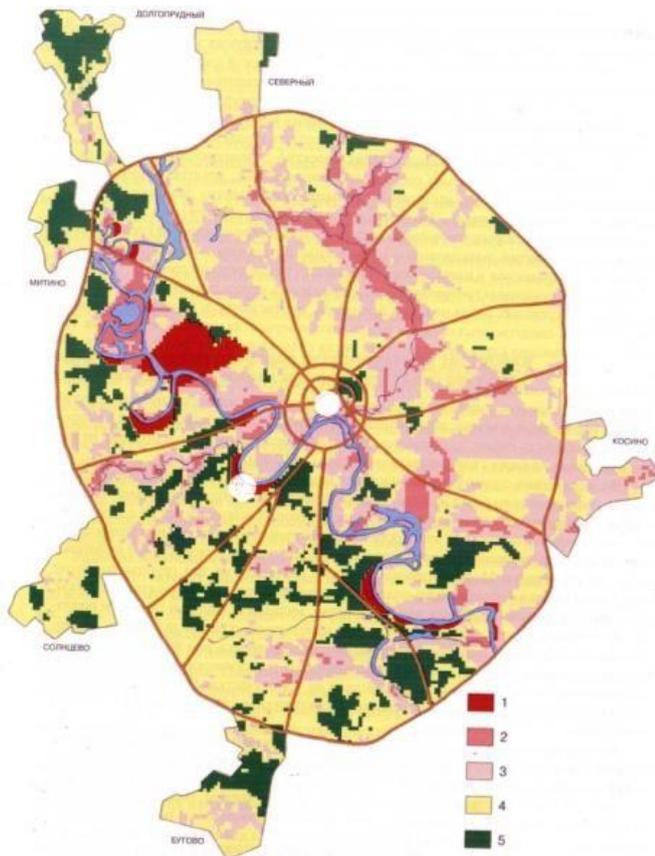


Рисунок 20 – «Горячие пятна» 1-го класса по степени оползневой опасности - белые круги

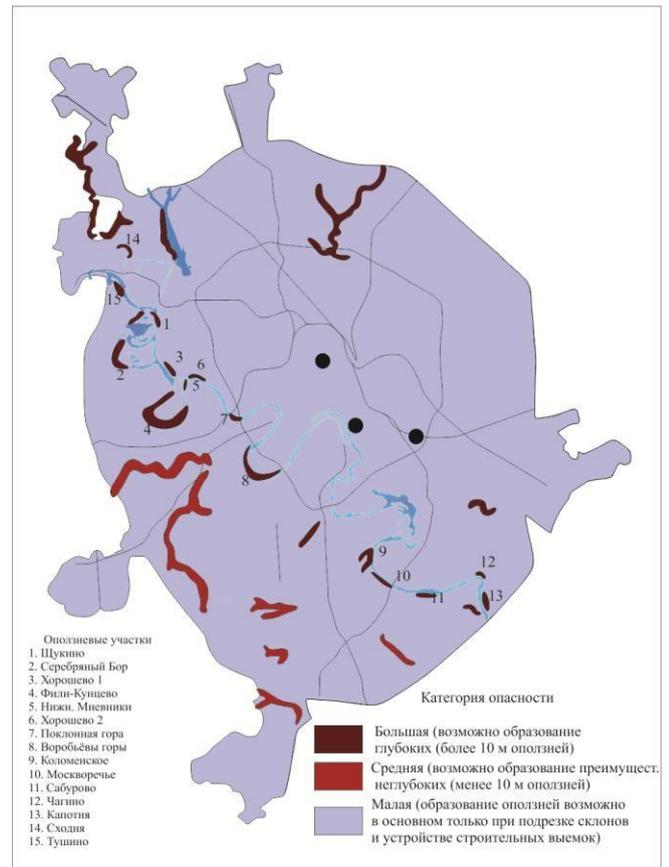


Рисунок 21 – Горячие пятна 2-го класса по степени оползневой опасности

Основой рисунка 20 является карта природных опасностей (оползни, карст, подтопление) на территории Москвы (Осипов В.И., Кутепов В.М., Миронов О.К.). Категории опасности: 1 – чрезвычайно опасная; 2 – весьма опасная; 3 – опасная; 4 – малоопасная; 5 – неопасная.

На рисунке 21 показаны глубокие оползни: 1. Щукино; 2. Серебряный бор; 3. Хорошево – 1; 4. Фили – Кунцево; 5 – Нижние Мневники; 6 – Хорошево -2; 7. Поклонная Гора; 8. Воробьевы Горы (1-ый класс риска); 9. Коломенское; 10. Москворечье; 11. Сабурово; 12. Чагино ; 13. Капотня; 14. Сходня; 15. Тушино. Черные круги указывают на поверхностные оползни Самотечная площадь (север), Андрониевская и Николаямская набережные (восток), Котельническая набережная (центр). Основа - схема оползневой опасности на территории Москвы [Рагозин, 2002].

При этом, несмотря на то, что в районе Кремля оползневая опасность не так велика, не говоря уже о постоянном мониторинге и укрепляющих мероприятиях, тем не менее, стоимость инфраструктуры и величина возможного ущерба весьма высока. С другой стороны, на Воробьевых горах оползневая опасность очень велика. И хотя плотность населения там мала, возможный ущерб от оползневых процессов может быть также весьма значительным.

Таким образом, разработана методология оценки и картографирования оползневого риска на урбанизированных территориях. На основе натуральных наблюдений, метода комбинирования, комплексирования, наложения геолого-геофизических данных и картографического материала, а также экспертных оценок для города Москвы, областями высокого оползневого риска можно считать области глубоких оползней вдоль русел рек Москвы и Яузы, а также вдоль палеорусел рек в центре города с высокой оползневой опасностью и высоким потенциальным ущербом. Эти области могут рассматриваться как «горячие пятна» 1-го и 2-го класса по степени геоэкологического риска.

В **разделе 6.4.** рассматривается решение проблемы геоэкологической оценки территорий и территориального планирования для размещения объектов утилизации и глубокой переработки отходов. Из рассмотрения следует исключить области высокого геоэкологического риска из потенциальных территорий размещения дополнительных опасных объектов повышенной геоэкологической нагрузки. Это, в первую очередь, населенные пункты, включая санитарные зоны, особо охраняемые территории, объекты культурного наследия, рекреационные зоны, дороги и коммуникации. Необходимо перерабатывать и утилизировать отходы на небольших расстояниях от источников отходов. Так для Москвы в качестве полигонов переработки и утилизации отходов следует рассматривать Московскую и другие близлежащие области.

Для территории Московской области наиболее характерны такие виды опасных природных процессов, как наводнения, оползни, карст, суффозия, провалы грунта, оврагообразование, речная эрозия, подтопление, заболачивание, выветривание, ураганы, засухи (как результат лесные и торфяные пожары). Наибольшая природная опасность характерна для Люберецкого и Раменского районов. Это наиболее неблагоприятные районы Московской области по степени потенциальной опасности от природных процессов и явлений, а также загрязнения геологической среды (Рисунок 22).

На основе проведенного анализа Люберецкий район можно рассматривать как «горячее пятно» по геоэкологическому риску [Свалова, 2020] вследствие высокой природной опасности, геохимического загрязнения от течения рек с территории Москвы и западного направления ветров, близости к Москве и высокой населенности (высокий потенциальный ущерб).



Рисунок 22а – Оползневые процессы и карст на территории Московской области (masteratlas.ru)

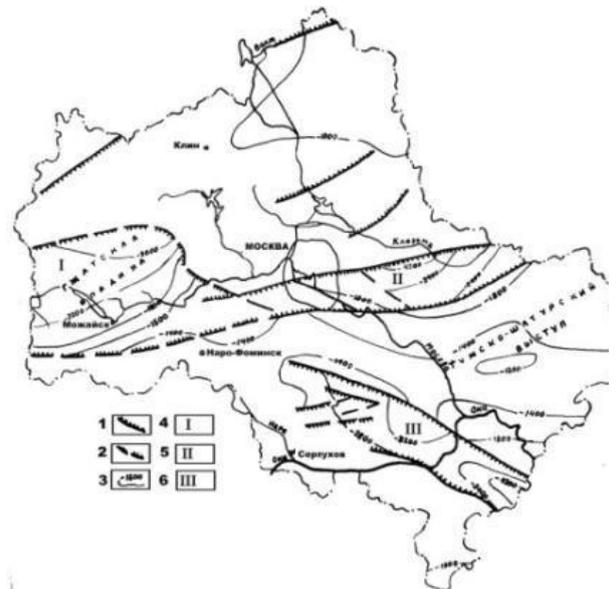


Рисунок 22б – Схематическая тектоническая карта Московского региона. Разломы кристаллического фундамента: 1-установленные; 2 – предполагаемые; 3- изогипсы поверхности фундамента; м; Впадины фундамента: 4 – Гжатская, 5 – Подмосковная, 6 –Пачелмская [Вагнер, Манучарянц, 2003]



Рисунок 22в – Рельеф Московской области. Черный круг – «горячее пятно» по степени риска (Люберцы) [Свалова, 2020; Вагнер, Манучарянц, 2003]

Таким образом, произведена оценка геоэкологического риска опасных природных процессов; разработана методология унификации, формализации и цифровизации оценки и картографирования геоэкологического риска на базе общей платформы управления риском и выявления определяющих параметров природной опасности и их градации для различных видов опасности, территорий и природно-техногенных условий с выделением «горячих пятен» по степени риска.

«Горячие пятна» по степени геоэкологического риска – это суперпозиция областей максимальной вероятности опасного события и областей максимального потенциального ущерба в случае наступления события. Установлены «горячие пятна» по степени геоэкологического риска для горных территорий на примере Кавказа, «горячих пятен» оползневого риска на примере г. Москвы, «горячих пятен» геоэкологического риска для Московской области.

Выводы по шестой главе:

Рассмотрена унифицированная оценка геоэкологического риска опасных природных процессов. Разработана методология унификации, формализации и цифровизации оценки и картографирования природного геоэкологического риска на базе общей платформы управления рисками. Введено понятие «горячих пятен» по степени геоэкологического риска. «Горячие пятна» по степени риска – это суперпозиция областей максимальной вероятности опасного события и областей максимального потенциального ущерба в случае наступления события. Установлены «горячие пятна» по степени геоэкологического риска для горных территорий на примере Кавказа, «горячих пятен» оползневого геоэкологического риска на примере г. Москвы, и геоэкологического риска различных геодинамических опасностей Московской области.

Установление районов расположения и локализации, т.н. «горячих пятен» требует организации комплексного геоэкологического мониторинга, а смягчение их воздействия - реализации инженерно-геологических мероприятий для снижения геоэкологического риска, развития критериев сейсмостойкого строительства, риск-ориентированного территориального планирования, дополнительных инженерно-геологических изысканий при строительстве и освоении новых территорий

В Заключении приводятся теоретические и эмпирические результаты работы, и рассматривается дальнейшее развитие темы исследования. Отмечается, что взаимосвязь геодинамики литосферы и опасных природных процессов носит глубинный фундаментальный характер. Эндогенные и экзогенные опасные природные процессы, во многом, определяются литосферными движениями, источники которых находятся в глубинах ядра и мантии Земли. Тектонические движения и напряжения являются источником опасных геоэкологических процессов. Взаимодействие литосферы и астеносферы в значительной степени влияет на формирование и эволюцию геологических структур и определяет многие опасные геоэкологические процессы и явления. Выявление этих связей и закономерностей на новом уровне представляет направление дальнейших исследований и разработок.

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработана концепция определяющей взаимосвязи геодинамической опасности и геоэкологического риска. Обосновано, что геодинамическая опасность – это опасность процессов движения или напряженно-деформированного состояния геологической среды для различных видов и масштабов движения вещества в литосфере. Геоэкологический риск есть вероятностная мера геодинамической опасности.

2. Разработан комплексный подход к решению задач геодинамики, оценки и управления геоэкологическим риском по схеме: геодинамика литосферы – геодинамические процессы - геодинамическая и тектоническая опасность – опасные природные процессы – оценка природных опасностей и геоэкологических рисков – управление геоэкологическим риском.

3. Предложена механико-математическая модель формирования и эволюция геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром на основе приближенного решения уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости

и применения методов разложения по малому параметру, сращиваемых асимптотических разложений, последовательных приближений и приближения тонкого слоя.

4. Разработан комплексный подход к совместной разработке плюм-тектоники и тектоники плит. Разработана механико-математическая модель формирования и эволюция геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром.

5. Разработана механико-математическая модель решения обратной задачи геодинамики прямым методом. Решена первая обратная задача геодинамики – восстановление полей скоростей, давлений и напряжений на глубине литосферы по имеющимся данным о скоростях на дневной поверхности.

6. Поставлена и решена вторая обратная задача геодинамики – определение движения границ на глубине литосферы по заданным движениям дневной поверхности. Полученные решения используются для анализа глубинных геодинамических процессов.

7. Построена самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна. Установлены количественные оценки подъема астеносферного диапира под геологической структурой.

8. Предложена механико-математическая модель гравитационного движения масс по оползневому склону на основе уравнения Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Найдены критические параметры задачи смены режимов движения с выделением потенциальных областей мониторинга.

9. Разработана методика выявления определяющих параметров природной опасности и их градации для различных видов опасности, территорий и природно-техногенных условий на основе исследований по геодинамике, геотектонике, геомеханике, геотермии, механико-математическому моделированию, оценке и управлению природными геоэкологическими рисками.

10. Разработана методология унифицированной оценки и картографирования геоэкологического риска на базе общей платформы управления риском. Введено понятие «горячих пятен», дифференцируемых по уровню ожидаемого геоэкологического риска.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гончаров М.А., Короновский Н.В., Разницын Ю.Н., Свалова В.Б. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов // Геотектоника. 2015. №6. С. 80-93. (ВАК, WEB of Science, SCOPUS)

2. Свалова В.Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. // Геология и геофизика Юга России. 2021. 11 (3). С. 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007. (ВАК, SCOPUS).

3. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. 2022. 12 (1). С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (ВАК, SCOPUS).

4. V.B. Svalova, V.B. Zaalishvili, G.P. Ganapathy, P. Ivanov. Engineering and Technical Methods for Landslide Risk Management and Reduction. // Устойчивое развитие горных

территорий. 2020. Т.12. №1 (43). С.162-170. DOI: 10.21 177/1998-4502—2020-12-1-162-170 (ВАК, SCOPUS)

5. **В.Б. Свалова.** Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. // Геология и геофизика Юга России. 2020. 10(4). С. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004. (ВАК, SCOPUS).

6. Миронов О.К., Карфидова Е.А., **Свалова В.Б.** Возможности использования ориентированного графа геологических границ в формальном описании трехмерной крупномасштабной геологической модели // Геоэкология. 2019. №1. С. 70-80. DOI:10.31857/S0869-78092019170-80 (ВАК, RSCI)

7. **Свалова В.Б.** Геотермальная энергетика в России и мире и гидрогеотермальные системы Кавказа. // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 2(52). С. 43-53. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2022.52.005> (ВАК)

8. **Свалова В.Б.** «Горячие пятна» геоэкологического риска и проблемы территориального планирования. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2022. 65(3). С. 77-97. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-77-97> (ВАК)

9. **Свалова В.Б.** Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // Геология и Геофизика Юга России. 2019. 9 (3). С. 77-93. DOI: 10.23671/VNC. 2019.3.36485. (ВАК)

10. **Svalova V.B.,** Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // Геология и Геофизика Юга России. 2019. 9 (2). С. 109-127. DOI:10.23671. VNC.2019.2.31981 (ВАК)

11. **Svalova V.B.,** Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Ginzburg A.A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India // Геология и Геофизика Юга России. 2019. 9(4). С. 87-101. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44491 (ВАК)

12. **Свалова В. Б.** Анализ и оценка риска оползневых процессов на урбанизированных территориях. // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 4. С. 22-29. (ВАК).

13. **В.Б. Свалова.** Мониторинг и снижение риска оползневых процессов на Тайване. // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. №3. С. 13-25. (ВАК).

14. **Свалова В.Б.** Комплексное использование геотермальных ресурсов. // Георесурсы. 2009. № 1 (29). С. 17-23.

15. **Свалова В.Б.,** Шарков Е.В. Позднекайнозойская геодинамика Альпийского складчатого пояса в связи с формированием внутриконтинентальных морей (петролого-геомеханические аспекты). // Известия ВУЗов. (Высших учебных заведений). Геология и разведка. 2005. №6. С. 3-11.

16. **Свалова В.Б.,** Шарков Е.В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны (петрологические и геомеханические аспекты). // Геология и геофизика. 1992. № 5. С. 21-31.

17. Шарков Е.В., **Свалова В.Б.** О возможности вовлечения континентальной литосферы в процесс субдукции при задуговом спрединге // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 118–131.

18. **Свалова В.Б.,** Шарков Е.В. Формирование и эволюция задуговых бассейнов Альпийского и Тихоокеанского поясов (сравнительный анализ). // Тихоокеанская геология. 1991. № 5. С. 49-55.

19. Шарков Е.В., **Свалова В.Б.** Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит. // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 685-688.

20. Занемонец (**Свалова**) В.Б., Михайлов В.О., Мясников В.П. Механическая модель образования глыбовой складчатости. Известия АН СССР. Физика Земли. 1976. № 10. С. 13-21.

21. Занемонец (**Свалова**) В.Б., Котелкин В.Д., Мясников В.П. О динамике литосферных движений. Известия АН СССР. Физика Земли. 1974. № 5. С. 43-54.

Публикации в изданиях, входящих в базу данных SCOPUS.

22. **Svalova V.** TXT-tool 3.007-1.1: Mechanical-Mathematical Modeling and Monitoring for Landslide Processes. /In: Sassa K., Tiwari B., Liu KF., McSaveney M., Strom A., Setiawan H. (eds) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Springer, 2018. P. 315-319. (SCOPUS)

23. Ginzburg A., Nikolaev A., **Svalova V.**, Manukin A., Savosin V. TXT-tool 2.007-1.1: Monitoring Alarm System of Landslide and Seismic Safety for Potentially Hazardous Objects. /In: Sassa K. et al. (eds) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Springer, 2018. P. 309-325. (SCOPUS)

24. Ginzburg A., Nikolaev A., **Svalova V.**, Postoev G., Kazeev A. TXT-tool 2.007-1.2 Landslide and Seismic Monitoring System on the Base of Unified Automatic Equipment. /In: Sassa K. et al. (eds) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. Springer, 2018. P. 327-340. (SCOPUS)

25. **Svalova V.** Geothermal Energy. /Глава в энциклопедии. Engineering Encyclopedia. 2017. 6 с. (SCOPUS)

26. **Valentina Svalova.** Landslide Risk Analysis, Management and Reduction for Urbanized Territories. /Proceedings of WLF4 (World Landslide Forum 4), Ljubljana, Slovenia, Springer. 2017. P. 439-445. (SCOPUS)

Монография (SCOPUS)

27. **Svalova V.** Landslide Risk: Assessment, Management and Reduction. 2017. Nova Science Publishers, New York. 253 pp. Hardcover ISBN: 978-1-53612-294-7 e-Book ISBN: 978-1-53612-311-1 (SCOPUS)

Коллективные монографии

28. **Свалова В.Б.** Геодинамика и глубинное строение Кавказского региона. // Коллективная монография «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». Владикавказ, 2022. С. 97-102. DOI: 10.33580/9785904868277_97

29. **Свалова В.Б.** Опасные природные процессы, риск-менеджмент и устойчивое развитие горных территорий. // Коллективная монография «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии». Владикавказ, 2022. С. 103-109. DOI: 10.33580/9785904868277_103

Монографии (отв. редактор)

30. **Svalova V.B.** (ed.). Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Springer book: 89082526. Switzerland. 2021. 559 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8>

31. **V. Svalova** (editor). Natural Hazards and Risk Research in Russia. Springer book : 86943020 . Switzerland. 2019. 400 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4>

32. **Svalova V.** (editor). Risk Assessment. InTech, 2018. ISBN 978-953-51-3799-3, Print ISBN 978-953-51-3798-6. 384 pages, under CC BY 3.0 license DOI: 10.5772/intechopen.68673 <http://www.intechopen.com/books/risk-assessment>

33. **Svalova V.** (editor). Earthquakes - Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71298

34. Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. /Кононов В.И., Юдахин Ю.Н., Свалова В.Б. (Отв. ред.). М.: Наука, 1993. 400 с.

Главы в монографиях

35. **Svalova V.** Thermo-gravity model for sedimentary basins./ Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 25-34.

36. **Svalova V.** Geothermics and seismicity of the Caucasus region and the inverse problem of geodynamics / Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 391-400. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_22

37. **Svalova V.** Geothermics and geodynamics of the back-arc basins of the Alpine and Pacific belts. / Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 401-409. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_23

38. Makeev V., Makarova N., Sukhanova T. , **Svalova V.** Structural geodynamic zoning of Eastern European Platform – the basis for creating of geothermal model. / Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 429-438. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_25

39. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Burdzieva O., Melkov D., Dzhgamadze A., **Svalova V.**, Nikolaev A. Prospects for identifying and applied use of hydro and petrothermal energy sources in geodynamically active structures of the eastern segment of the Central Caucasus./ Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 35-63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63571-8_3

40. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Berger M., Burdzieva O., Dzeranov B., Melkov D., Kanukov A., **Svalova V.**, Nikolaev A. Endogenous and exogenous manifestations of geodynamic activity in the Central Caucasus. / Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. **V. Svalova** (ed.) Springer book: 89082526, 2021. P. 499-532.

41. **V. Svalova.** Landslide risk assessment, management and reduction for city territories. /In:Natural Hazards and Risk Research in Russia. Edited by: **Valentina Svalova.** Springer book : 86943020 . 2019. P. 283-296. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_20

42. **V. Svalova** (2019). Mechanical-mathematical modeling for landslide processes./ In:Natural Hazards and Risk Research in Russia. Edited by: **Valentina Svalova.** Springer book : 86943020 . 2019. C. 297-304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_21

43. Alexander Ginzburg, **Valentina Svalova**, Alexey Nikolaev, German Postoev, Andrey Kazeev. Landslide and seismic monitoring systems. /In:Natural Hazards and Risk Research in Russia. Edited by: **Valentina Svalova.** Springer book : 86943020. 2019. P. 43-62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91833-4_4

44. Alexander Ginzburg, **Valentina Svalova**, Alexey Nikolaev, Anatoliy Manukin, Vladimir Savosin. Early-warning landslide monitoring system. /In:Natural Hazards and Risk Research in Russia. Edited by: **Valentina Svalova.** Springer book : 86943020. 2019. P. 63-86.

45. **Svalova V.B.** Landslide risk management and crises events. /In: Crisis Management. Theory and practice. ISBN: 978-953-51-6103-5. Edited by: Katarina Holla. InTech. 2018. P. 239- 258. DOI: 10.5772/intechopen.71641

46. **Svalova V.** Landslide Risk Management for Urbanized Territories. /In: Risk Management Treatise for Engineering Practitioners. Edited by Chike F Oduoza. InTeck, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79181

47. **Svalova V.** Risk Analysis and Land Use Planning./ Spatial Analysis, Modelling and Planning. Edited by Jorge Rocha and José António Tenedório. InTeck, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79776

48. **Svalova V.** Modeling and Monitoring for Landslide Processes. /Chapter in book: Natural Disasters - Typhoons and Landslides - Risk Prediction, Crisis Management and Environmental Impacts. Editor: K. Linwood, Nova Science Publishers, NY USA, 2014. P. 177-198.

49. Evgenii Sharkov and **Valentina Svalova V.** Geological-Geomechanical Simulation of the Late Cenozoic Geodynamics in the Alpine-Mediterranean Mobile Belt. / New Frontiers in Tectonic Research - General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. INTECH, Croatia, 2011. P. 18-38.

Публикации в других изданиях.

50. **Svalova V.** Geodynamics of Alpine Belt and Caribbean Region: Plate - Tectonics and Plume - Tectonics. // Journal of Basic & Applied Sciences, 2022. V. 18, 126–139. <https://doi.org/10.29169/1927-5129.2022.18.13>

51. Н. Б. Добрев, П. Г. Иванов, В. Б. **Свалова, В. Б.** Заалишвили, Б. В. Дзеранов. Опасные экзогенные процессы в горных районах Северного Кавказа и Болгарии. //Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2019. Том 4. № 4 (18). С. 5-14. DOI: 10.25744/genb.2020.71.19.001

52. **В.Б. Свалова.** Риск-анализ и риск-менеджмент с использованием метода анализа иерархий./ Материалы II Российского научного форума «Экология и общество: баланс интересов». Россия, г. Вологда. ФГБУН ВолНИЦ РАН. 21 апреля 2022 года.

53. **Свалова В.Б.** Решение обратной задачи геодинамики. /Сборник материалов. Всероссийская конференция с международным участием "Динамика и взаимодействие геосфер Земли". Томск. 8-11 ноября 2021.

54. **Свалова В.Б.** Геодинамика и геотермия Прикаспийской и Южно-Каспийской впадин. / Сборник материалов. Всероссийская конференция с международным участием "Динамика и взаимодействие геосфер Земли". Томск. 8-11 ноября 2021.

55. **В.Б. Свалова, И.В. Коробова.** Проблема геоэкологической оценки территорий для размещения объектов утилизации и глубокой переработки отходов. / Сергеевские чтения. Вып.22. Москва, РУДН. 2020. С. 152-159.

56. Zaalishvili V.B. Chotchaev Kh.O., Magkoev T.T., Melkov D.A., Nikolaev A.V., **Svalova V.B.**, Arkhireeva I.G., Dzeranov B.V. Physical fields as derivative of deformation of rock massif and technology of their monitoring. / Proceedings of the VIII science and technology conference "Contemporary issues of geology, geophysics and geo-ecology of the North Caucasus" (CIGGG 2018) сер. "Advances in engineering research" 2019. Издательство: ATLANTIS. PRESS. 2019. P. 62-67. Doi: 10.2991/ciggg-18.2019.12

57. **Svalova V.B.** Landslide risk assessment and management / В сборнике: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Под редакцией А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. 2019. С. 756-767.

58. **Свалова В.** Пространственное геологическое моделирование и управление оползневый риском. / Материалы международной конференции «ГЕОРИСК» 2018. 6 с.

59. **Svalova V.** Landslide Processes Modeling, Monitoring and Risk Reduction. / Proceedings of International conference on "Landslides and slop stability" 2015 (SLOPE 2015). Bali, Indonesia. 2017.