

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.34

Рег. N НИОКТР 124020900028-0

Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
« ____ » _____ 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
(промежуточный, 2025 г.)

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр., зав.лаб.
докт. физ.-мат. наук

_____ А.И.Горшков
Подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, гл. науч. сотр., зав. лаб. д.ф.-м.н.,	_____	А.И. Горшков (введение, разделы 1.1-1.3, заключение)
Исполнители темы		
гл. науч. сотр. академик РАН	_____	Л.И. Лобковский (разделы 2.1, 2.3)
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	_____	В.А. Желиговский (раздел 3.1)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____	О.М. Подвигина (раздел 3.2)
гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук	_____	Г.М. Стеблов (разделы 2.4, 2.5)
гл. науч. сотр. докт. физ.-мат. наук	_____	А.В. Хохлов (раздел 3.1)
вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	И.С. Владимирова (раздел 2.1)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	А.А. Баранов (разделы 2.1, 2.3)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	А.П. Кержаев (раздел 4)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	И.В. Меньшова (раздел 4)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____	О.В. Новикова (раздел 1.2)
ст. науч. сотр. канд. тех. наук	_____	Е.С. Подольская (раздел 1.2)
мл. науч. сотр.	_____	М.С. Гридчина (раздел 2.4)
мл. науч. сотр.	_____	А.И. Ливинский (раздел 1.3)
мл. науч. сотр.	_____	Г.Э. Мельник (раздел 2.5)

мл. науч. сотр.	<hr/>	М.А. Семка (раздел 1.1)
	Подпись, дата	
мл. науч. сотр.	<hr/>	Д.С. Толмачев (раздел 3.1)
	Подпись, дата	
мл. науч. сотр.	<hr/>	Т.Т. Хасаева (раздел 3.3)
	Подпись, дата	
лаборант-исследователь	<hr/>	А.А. Таранюк (раздел 3.1)
	Подпись, дата	
нормоконтролер	<hr/>	О.В. Селюцкая
	Подпись, дата	

РЕФЕРАТ

Отчет 49 с., 1 кн., 15 рис., 41 источн., 2 прил.

МОРФОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ, ГЕОДИНАМИКА, СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАГНИТОГИДРОДИНАМИКА, ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Исследования, проводимые по теме, направлены на изучение математическими методами строения и процессов в трех оболочках Земли: коре, мантии и ядре. Целью исследований является достижение уникального ожидаемого результата реализации Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы): Математические методы решения задач геодинамики в коре, мантии и ядре Земли. Пункт ПФНИ «Геофизические методы изучения строения, вещественного состава земных недр и глубинных процессов; взаимодействие геосфер».

Морфоструктурное районирование (МСР) позволяет изучать блоковое строение земной коры и его связь с сейсмичностью и оруденением. Исследования по моделированию геодинамики включают моделирование динамики блоков земной коры и мантийных процессов. В исследованиях по магнитогидродинамике рассматриваются вопросы генерации магнитного поля, обуславливаемого процессами в земном ядре.

В 2025 г. проведено МСР и определение мест возможного возникновения землетрясений в пределах острова Сахалин и обобщены результаты многолетних исследований горных систем Средиземноморского региона по идентификации сейсмогенных узлов. Завершено изучение корреляции полиметаллических месторождений Кавказа с морфоструктурными узлами региона.

Разработано реальное обобщение тектоники литосферных плит для современного этапа развития Земли на основе конвективной 3D модели современной глобальной геодинамики. Изучены аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля на примере двух сильных землетрясений в Армении для выявления возможных предвестников сильных землетрясений. Рассмотрена проблема деградации многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) в Чукотском автономном округе (ЧАО), которая вызывает необходимость создания системы спутникового геодезического мониторинга за состоянием ММГ. Проведен анализ геодинамики двух активных зон Дальнего Востока (Сахалинской системы разломов и Алеутской островной дуги в районе Командорских островов) для изучения реакции структур на сильные сейсмические события в этих областях. Были проанализированы соотношения между вертикальным поднятием Балтийского щита, определенным по наблюдениям ГНСС, и изменением гравитационного поля, зарегистрированным спутниковыми гравиметрическими

проектами. В области магнитогидродинамики продолжено численное и аналитическое исследование магнитных мод при разных задаваемых условиях. Получены модификации метода дополнительных подпространств и его применение для численного решения уравнений конвекции. Рассмотрен вопрос о генерации магнитного поля во внешних областях галактик, т.е., на большом удалении от центра галактического диска. Продолжены исследования по дальнейшему развитию теории разложений по собственным функциям Папковича–Фадля и построению новых точных решений важнейших, с точки зрения приложений к задачам геодинамики, краевых задач теории упругости в декартовой системе координат.

По результатам исследований в 2025 г. опубликовано 10 статей в рецензируемых изданиях, а также сделано 26 докладов на международных и российских научных конференциях.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	9
1 Морфоструктурное районирование земной коры	9
1.1 Морфоструктурное районирование Сахалина.....	9
1.2 Сейсмогенные узлы южной Европы	11
1.3 Изучение связи полиметаллического оруденения с морфоструктурными узлами	13
2 Геодинамика, моделирование геодинамических процессов с использованием данных спутниковой геодезии	16
2.1 Исследование современной глобальной геодинамики	16
2.2 Аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля, как возможные предвестники сильных землетрясений	17
2.3 Мониторинг динамики криолитозоны Чукотки	19
2.4 Моделирование деформаций земной коры в окрестности подвижных разломов	21
2.5 Постледниковые движения в пределах Балтийского щита	22
3 Вопросы генерации магнитного поля.....	24
3.1 Численное и аналитическое поведение двумерного пространственно-периодического течения идеальной жидкости.....	24
3.2 Модификации метода дополнительных подпространств и его применение для численного решения уравнений конвекции	29
3.3 Механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков.....	30
4 Задачи теории упругости	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	39
ПРИЛОЖЕНИЯ	44
Приложение А – Публикации по теме НИР, изданные в 2025 году.....	44
Приложение Б – Доклады по теме НИР, подготовленные в 2025 году.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по теме выполнялись в рамках приоритетных направлений, определенных Планом фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021 - 2030 годы:

Приоритеты научно-технологического развития:

д) противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и экстремистской идеологии, деструктивному иностранному информационно-психологическому воздействию, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства, укрепление обороноспособности и национальной безопасности страны в условиях роста гибридных угроз; Критические технологии: Мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды и изменения климата (в том числе ключевых районов Мирового океана, морей России, Арктики и Антарктики), технологии предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, негативных социально экономических последствий

Уникальный ожидаемый результат реализации Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы): Математические методы решения задач геодинамики в коре, мантии и ядре Земли.

Пункт ПФНИ «Геофизические методы изучения строения, вещественного состава земных недр и глубинных процессов; взаимодействие геосфер».

Цели конкретных исследований, проведенных в 2025 году, включали решение задач, которые группируются в несколько основных направлений, охватывающих все оболочки Земли.

1) Структура и процессы в земной коре, включая изучение блокового строения земной коры с помощью морфоструктурного районирования для решения задач распознавания сейсмоопасных мест и рудоносных структур.

2) Геодинамика и моделирование геодинамических процессов в литосфере и мантии, в том числе с использованием спутниковых геодезических данных.

3) Исследования магнетогидродинамики, направленные в конечном счете на моделирование магнитного поля Земли и его инверсий.

Изучение геодинамики литосферы, строения земной коры, глубинных мантийных процессов актуальны для понимания эволюции планеты и ее геофизических оболочек.

Научная новизна проведенных в 2025 г. исследований состоит в разработке и применении новых методов, построении новых моделей и изучении ранее не исследованных процессов. В частности, построение схем морфоструктурного

районирования создает основу для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений и для изучения узлового контроля оруденения. Эти подходы вносят вклад в разработку более адекватной оценки сейсмической опасности. Развитие математических методов моделирования тектонических процессов на основе данных спутниковой геодезии и решение соответствующих обратных задач позволят выявлять более точные характеристики тектонических процессов, а также реологии литосферы и верхней мантии. Теоретические исследования по проблеме магнитного динамо актуальны и перспективны для создания новых моделей и верификации существующих представлений о происхождении магнитного поля Земли и его изменениях.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Морфоструктурное районирование земной коры

1.1 Морфоструктурное районирование Сахалина

Морфоструктурное районирование (МСР) направлено на определение иерархической линеamentно-блоковой структуры изучаемого региона и выявление наиболее тектонически активных структур – морфоструктурных узлов. МСР основано на совместном анализе современного рельефа, отображенного на топографических картах и спутниковых снимках, и геологической структуры региона, представленной на геологических картах.

Исходные данные для проведения МСР составили топографические карты РФ в масштабе 1: 1 000 000 (листы L-54, M-54, N-54), а также цифровые карты рельефа, представленные в базе геоданных GeoMapApp [<http://www.geomapapp.org>]. Для анализа геологической структуры и сопоставления ее с рельефом использована цифровая Государственная геологическая карта Российской Федерации, (листы L-54 и M-54), масштаб 1:1000 000, серия Дальневосточная [http://www.geolkarta.ru/lists_all.php?obj oblast]. Учитывались сведения об активных разломах Евразии, представленные в электронной базе Геологического института РАН [<http://neotec.ginras.ru/database.html>], а также данные о разломной тектонике и сейсмотектонике [1].

Основные определения. На схемах МСР определяются блоки трех иерархических уровней. Низший уровень (третий ранг) состоит из блоков, для которых характерны близкие значения информативных признаков рельефа (уровень высот и ориентация линейных форм рельефа). Границы блоков проводятся там, где резко и существенно меняется значение хотя бы одного признака. Блоки объединяются в мегаблоки, представляющие второй уровень иерархии. Если значения информативных признаков от одного блока к другому изменяются монотонно, то границы мегаблоков проводятся там, где монотонность нарушается. Самая крупная единица районирования первого ранга – горная страна – территория единого облика рельефа и одного типа процесса горообразования. Линеamentу присваивается высший ранг морфоструктур, которые он разделяет. Различается два типа морфоструктурных линеamentов: продольные и поперечные. Продольные линеamentы близпараллельны осям и подножиям хребтов, простираются вдоль продольных долин и межгорных котловин; они обычно включают зоны хорошо изученных глубинных разломов. Поперечные линеamentы пересекают крупные элементы рельефа косо или под прямым углом. Они трассированы в местах резких и существенных изменений значений информативных признаков рельефа. Зоны поперечных линеamentов выделены по комплексу прерывистых линейных форм рельефа и включают

вытянутые в едином направлении отрезки разломов и тектонические уступы. Морфоструктурные узлы формируются в местах пересечения или причленения морфоструктурных линеаментов.

Составленная схема морфоструктурного районирования Сахалина представлена на Рис.1. В качестве крупнейшей территориальной единицы первого ранга рассматривается сам остров Сахалин и примыкающие к нему зоны шельфа. На севере границей Сахалина служит линеамент первого ранга 1-2 северо-восточного простирания, которое характерно поперечным разломам северной части Сахалина. Западной границей горной страны служит линеамент первого ранга 7-44, который проходит вдоль Татарского пролива и соответствует Восточно-Сихотэ-Алиньскому разлому. На востоке Сахалин ограничен линеаментом первого ранга 2-49, который трассирован по границе горных хребтов Сахалина и прилегающего шельфа; зона линеамента включает Северо-Сахалинский и Пограничный разломы. На юге граница между Сахалином и островом Хоккайдо в рельефе и тектонически выражена слабо, линеамент, разделяющий эти морфоструктуры проведен по шельфу пролива Лаперуза в близширотном простирании и маркируется цепочкой слабых землетрясений, вытянутых в том же простирании. Вдоль всего острова примерно посередине проходит линеамент первого ранга 1-41, продолжающийся далее в юго-западном простирании как линеамент 41-53. Эти линеаменты соответствуют Центральносакхалинскому разлому, который рассматривается как граница между Охотоморской и Евразийской литосферными плитами [1].

В регионе выделено четыре мегаблока, являющиеся морфоструктурами второго ранга. Основная часть острова разделена на Северный и Центральный мегаблоки, различающиеся уровнем высот рельефа, которые существенно выше в Центральном мегаблоке. Поперечный линеамент 2-го ранга 20-23 является границей этих мегаблоков и соответствует крупному тектоническому разлому. Южный Сахалин разделен на два мегаблока продольным линеаментом 2-го ранга 41-54, соответствующему близмеридиональному ответвлению Центральносакхалинского разлома. Линеаменты третьего ранга разделяют блоки, которые различаются уровнем высот и простиранием отдельных элементов рельефа.

В результате МСР на Сахалине определено 56 узлов, образованных пересечениями линеаментов. На Рис. 1 видно, что эпицентры землетрясений с М6+ расположены вблизи некоторых пересечений линеаментов, т.е. в морфоструктурных узлах.

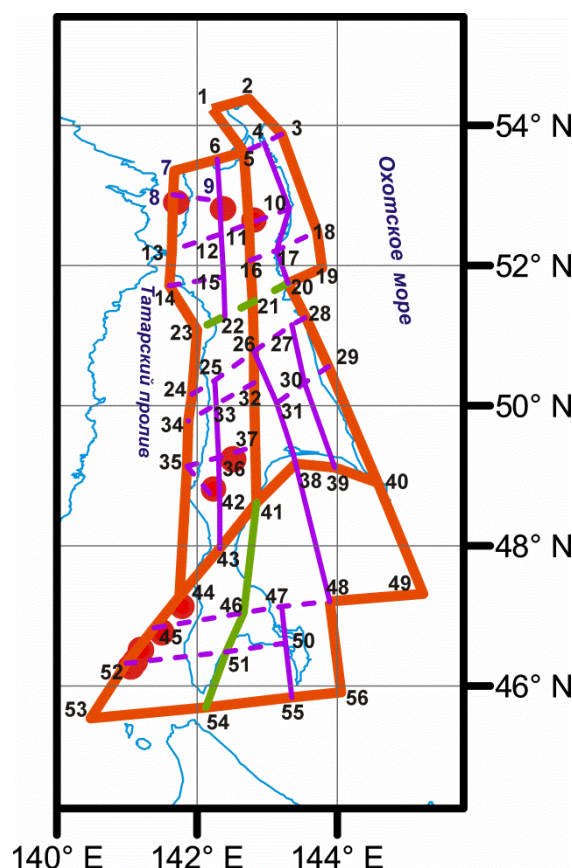


Рисунок 1 – Схема морфоструктурного районирования Сахалина

Линиями разной толщины показаны морфоструктурные линеаменты: красные линии – линеаменты 1-го ранга, зеленые – линеаменты 2-го ранга, фиолетовые – линеаменты 3-го ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, пунктирные – поперечные. Цифрами показаны номера пересечений линеаментов (узлов). Красные кружки – эпицентры землетрясений с $M6+$

Результаты были представлены на конференции [2].

1.2 Сейсмогенные узлы южной Европы

В 2025 г. проведено обобщение многолетних исследований, направленных на идентификацию сейсмоопасных узлов в горно-складчатых областях Средиземноморского сейсмоактивного пояса с помощью методов распознавания образов на основе данных морфоструктурного районирования (МСР). В период 2000–2024 гг. были изучены следующие горные системы: Карпаты, Апеннины, Альпы, Динариды, Эллиниды, Балканиды [3, 4, 5, 6, 7, 12]. Также была показана возможность применения развиваемого в ИТПЗ РАН подхода для изучения внутриплитовых областей: Иберийского полуострова [8], Французского центрального массива [9] и литосферного блока Корсика-Сардиния [11]. На примере Паданской межгорной впадины была установлена возможность применения методики МСР и распознавания мест возможного возникновения землетрясений для $M5+$ в пределах областей равнинного рельефа [13]. В качестве примера

проведенных исследований на Рис. 2 представлены результаты МСР и распознавания сейсмогенных узлов для М6+ в горных поясах центральной Европы.

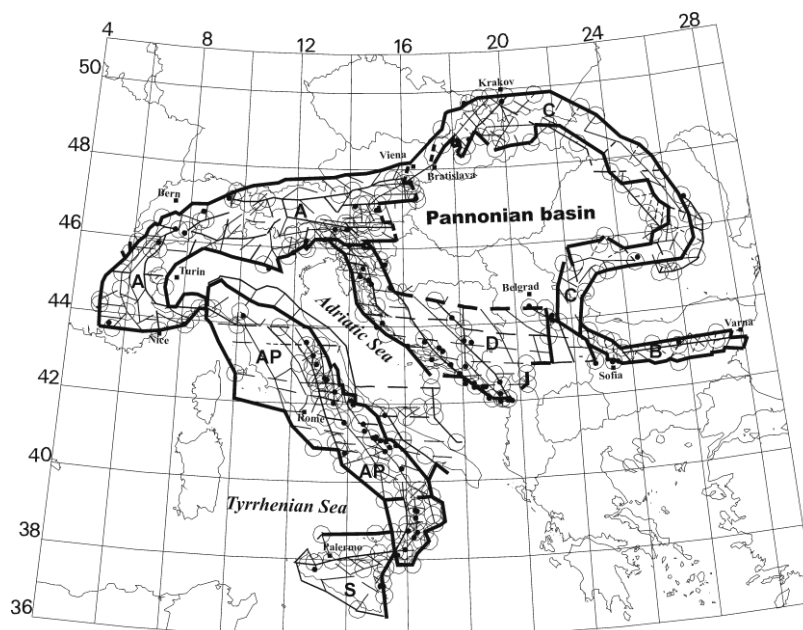


Рисунок 2 – Карта распознанных сейсмогенных узлов для М6+ в Апеннингах и Сицилии, Альпах, Динаридах, Карпатах и Балканидах

Сплошные линии обозначают продольные линеаменты, пунктирные линии – поперечные линеаменты. Жирные линии показывают линеаменты 1-го ранга, средние линии – линеаменты 2-го ранга, тонкие линии – линеаменты 3-го ранга. Кругами обозначены распознанные сейсмоопасные узлы для М6+. Черные точки показывают эпицентры событий с М6+. А – Альпы, АР – Апеннины, В – Балканиды, С – Карпаты, D – Динариды, S – Сицилия

Долгосрочное применение методики распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в Южной Европе показывает достаточную эффективность метода для выявления сейсмически опасных зон для разных целевых магнитуд в различных тектонических обстановках. Результаты, представленные в этой главе, можно считать положительными, поскольку в каждом из исследованных регионов узлы, содержащие известные события с целевой магнитудой, были отнесены к категории высокосейсмичных. Несколько случаев, когда узлы, в основном отмеченные историческими целевыми событиями, были ошибочно классифицированы как не сейсмогенные, можно объяснить низкой точностью определения магнитуды исторических землетрясений. Количество потенциальных узлов, в которых еще не происходили целевые события, относительно невелико в каждом регионе. Одним из главных преимуществ используемого подхода является то, что он не требует предварительного знания региональной сейсмичности исследуемого региона, поскольку МСР основано на анализе имеющихся топографических, тектонических и геологических данных. Методология

представляется особенно полезной в районах, где информация об исторической сейсмичности скудна, например, в регионе Корсика-Сардиния. Таким образом, особое внимание следует уделять сейсмогенным узлам, которые еще не проявили себя целевыми землетрясениями. Получаемая в результате распознавания информация о положении потенциально сейсмоопасных узлов является ключевой для расчетов оценок сейсмической опасности.

Результаты опубликованы в виде отдельной главы в монографии [14].

1.3 Изучение связи полиметаллического оруденения с морфоструктурными узлами

В 2025 г. завершено изучение горно-складчатого сооружения Кавказа с целью (1) выявления особенностей положения крупных и суперкрупных месторождений полиметаллов в линеamentно-блоковой структуре этого региона и (2) определения геолого-геофизических и геоморфологических признаков мест локализации рассматриваемых месторождений с помощью методов распознавания образов. Исследование выполнено с использованием геоинформационной системы QGIS [<https://www.qgis.org>] и методов распознавания образов на основе морфоструктурных данных. Структурную основу исследования составила схема морфоструктурного районирования (МСР) Кавказа, отображающая иерархическую систему блоков земной коры, их границы – морфоструктурные линеamentы, а также положение морфоструктурных узлов, формирующихся в местах пересечения линеamentов [15]. Установлено, что месторождения металлов Кавказа средних и крупных размеров приурочены к морфоструктурным узлам (Рис. 3). Задача решена с помощью алгоритма распознавания с обучением "Подклассы" на основе геоморфологических и гравиметрических параметров, характеризующих узлы. Значения параметров определены с помощью геоинформационной системы QGIS по электронной базе геоданных GeoMapApp [<http://www.geomapapp.org>].

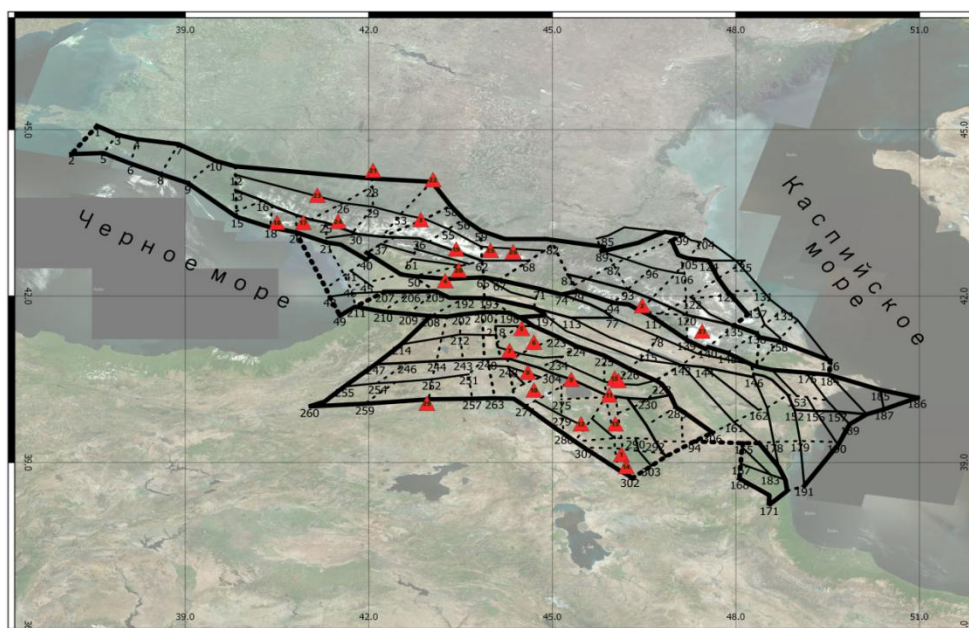


Рисунок 3 – Схема морфоструктурного районирования Кавказского региона и положение месторождений полиметаллов

Линиями показаны линеаменты: толстые – первого ранга, средние – второго ранга, тонкие – третьего ранга; пунктирными линиями обозначены поперечные линеаменты, сплошными – продольные. Красными треугольниками показано положение крупных месторождений полиметаллов. Цифрами обозначены номера узлов

В результате МСР на Кавказе было выделено 237 пересечений линеаментов (Рис. 4), каждое из которых мы рассматриваем как отдельный морфоструктурный узел. Узел определяется как 25-километровая окрестность точки пересечения линеаментов. Совокупность 237 узлов составила множество объектов распознавания в задаче распознавания рудоносных узлов Кавказа.

Как видно на Рис. 4, абсолютное большинство рассматриваемых месторождений расположено вблизи пересечений линеаментов, т.е. в морфоструктурных узлах. Большинство месторождений локализовано в узлах, образованных пересечением линеаментов высших 1-го и 2-го рангов (Рис. 3), которые соответствуют региональным глубинным разломам древнего заложения, активированным на этапе горообразования.

В результате (Рис. 4) из 237 узлов к рудоносному классу **Р** были отнесены 80 узлов (около 34%), а к не рудоносному классу **НР** – 157 (около 66%).

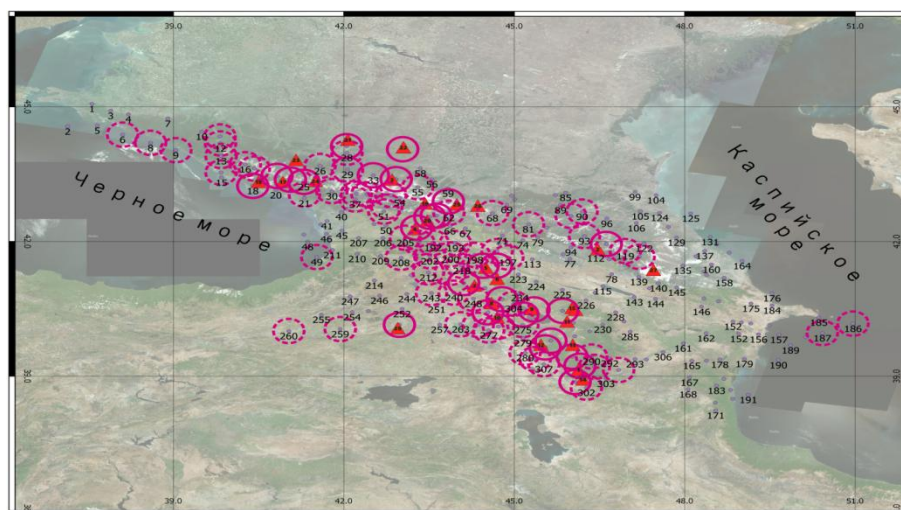


Рисунок 4 – Карта распознанных потенциально рудоносных областей
Мелкими розовыми кружками показаны мелкие и средние месторождения, большими синими – крупные. Сплошными кругами отмечены узлы, составившие материал обучения рудоносного класса. Круги, показанные точечным пунктиром, обозначают узлы, распознанные как потенциально рудоносные. Красными треугольниками показано положение крупных месторождений полиметаллов

В результате проведенного исследования показана определяющая роль морфоструктурных узлов в контроле пространственной локализации оруденения в Кавказском регионе. Методы распознавания образов позволили определить потенциально рудоносные узлы в пределах исследуемого региона. Характерные признаки рудоносных узлов Кавказа, основанные на морфометрических и гравиметрических показателях, свидетельствуют о повышенной активности новейших тектонических движений и усиленной раздробленности земной коры в окрестности рудоносных узлов.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные характерные признаки представлены конкретными интервалами численных значений геоморфологических и гравиметрических параметров и могут применяться для идентификации рудоносных узлов в других горно-складчатых областях России. Распознанные рудоносные узлы представляют собой локальные структуры, размеры которых составляют первые десятки километров. Это позволяет сузить районы работ при проведении прогностических металлогенических исследований. Развиваемая в работе методика распознавания рудоносных узлов на основе данных морфоструктурного районирования позволяет по-новому выявлять потенциально рудоносные узлы на региональном уровне. Ее использование может существенно повысить эффективность планирования практических металлогенических исследований.

Результаты опубликованы в [16].

2 Геодинамика, моделирование геодинамических процессов с использованием данных спутниковой геодезии

2.1 Исследование современной глобальной геодинамики

Совместно с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН исследована современная глобальная геодинамика с позиций 3D модели конвекции в мантии Земли и ее приложения к региональным тектоническим процессам.

С помощью уравнения Стокса для безинерционного движения вязкой жидкости с неньютоновской реологией рассчитаны мгновенные скорости течений в сферической мантийной оболочке Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN 2. На поверхности сферической модели за счет мантийной конвекции с неньютоновской реологией, учитывающей ослабленные литосферные зоны спрединга и субдукции, получена самосогласованная модель геодинамики современной Земли [17]. Модель автоматически учитывает все основные силы, действующие в мантии и на поверхности Земли. Построенная 3D модель мантийных течений хорошо описывает горизонтальные движения поверхности Земли, которые наблюдаются по данным космической геодезии, и дает количественную основу для интерпретации особенностей региональных геологических процессов [18].

Как было показано ранее [19], постулат теории тектоники плит о твердотельном вращении плит на поверхности Земли (теорема Эйлера), на котором основаны кинематические построения тектоники плит, не всегда применим. Другое исходное положение тектоники плит об их полной обособленности или, другими словами, о замкнутости их границ также не всегда выполняется. В частности, граница между Евразийской и Североамериканской плитами в северо-восточной Азии, по всей видимости, еще полностью не сформировалась в процессе длительной геодинамической эволюции Земли после распада Пангеи. Однако эта граница, согласно постулатам тектоники плит, обязательно должна была существовать. Поэтому многие авторы стремились «нарисовать» эту границу с помощью введения дополнительных малых плит (Амурской, Охотоморской и др.) вопреки имеющимся фактическим данным, например рассеянной сейсмичности и т.д. Анализ этих и других тектонических противоречий привел к обобщению классической тектоники плит, в котором вместо жестких плит допускались деформируемые плиты с возможностью незамкнутых границ [19]. При этом, однако, терялась возможность расчета кинематики плит с использованием теоремы Эйлера независимо от конвективных движений в мантии. Для количественного описания тектоники деформируемых литосферных плит на сферической поверхности Земли

требовалась трехмерная модель мантийной конвекции, что значительно усложняло расчеты движения литосферной оболочки по сравнению с эйлеровой кинематикой жестких плит. В недавних работах авторов [17, 19] был сделан необходимый шаг к более адекватному описанию современной глобальной геодинамики по сравнению с тектоникой плит. Он основан на конвективной 3D модели современной глобальной геодинамики, которая, опираясь на реальные плотностные неоднородности Земли, полученные по данным сейсмической томографии, дает расчетную картину горизонтальных движений поверхности Земли, близко соответствующую кинематическим моделям тектоники плит и данным спутниковой геодезии (Рис. 5). Это означает реальное обобщение тектоники литосферных плит для современного этапа развития Земли.

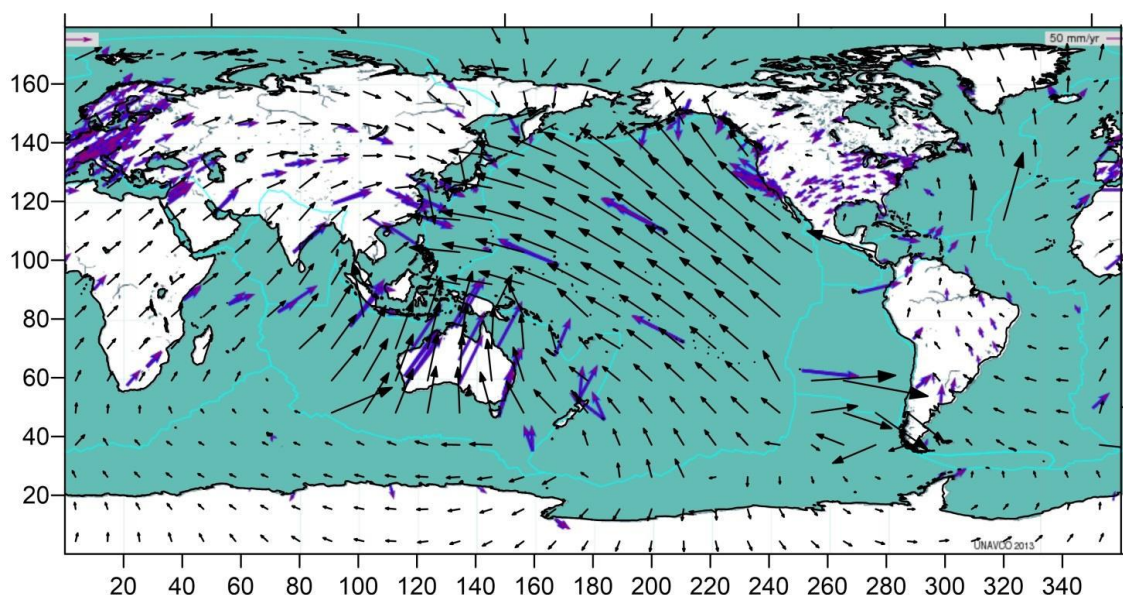


Рисунок 5 – Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками. Синими стрелками показаны скорости из модели ITRF [20].

Черной линией показаны контуры континентов.

Голубой линией показаны границы основных плит

Результаты исследования доложены на конференции [21].

2.2 Аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля, как возможные предвестники сильных землетрясений

Совместно с ИФЗ РАН на примере Армении проведен анализ переменного геомагнитного поля δT с помощью отношений амплитуд синхронно измеренных вариаций компонент δT поля в северной части Армении до и после Спитакского (07.12.1988 г., $M = 7.0$) и Парванийского (13.05.1986 г., $M = 5.4$) землетрясений. Новизна исследования состоит в том, были проанализированы данные геофизического мониторинга сразу нескольких параметров среды в Закавказье: вариации локального геомагнитного поля,

концентрации гелия и радона в скважинах и вариаций силы тяжести перед и после сильных землетрясений в Закавказье по данным различных авторов.

Расчетный параметр $N(A)$ характеризует изменение электромагнитной индукции (электропроводности) геологической среды. Перед Спитакским землетрясением значения параметра $N(A)$ изменились примерно на 35%. Анализ данных до Парванийского землетрясения также показывает резкий спад значений этого параметра на 20-25% (Рис. 6). Эти изменения показывают на то, что в изучаемой геологической среде изменилась электромагнитная индукция или электропроводность. Концентрация почвенного радона на станции Джермук перед Спитакским землетрясением увеличилась на 15%, а на станции Ленинакан, наоборот, уменьшилась (Рис. 7). За несколько месяцев до Спитакского землетрясения в Каджаранской скважине появился мантийный гелий, который обычно появляется перед сильными землетрясениями. В северной части Армении, где проводились измерения силы тяжести, перед Спитакским землетрясением также были зафиксированы аномальные изменения (Рис. 6).

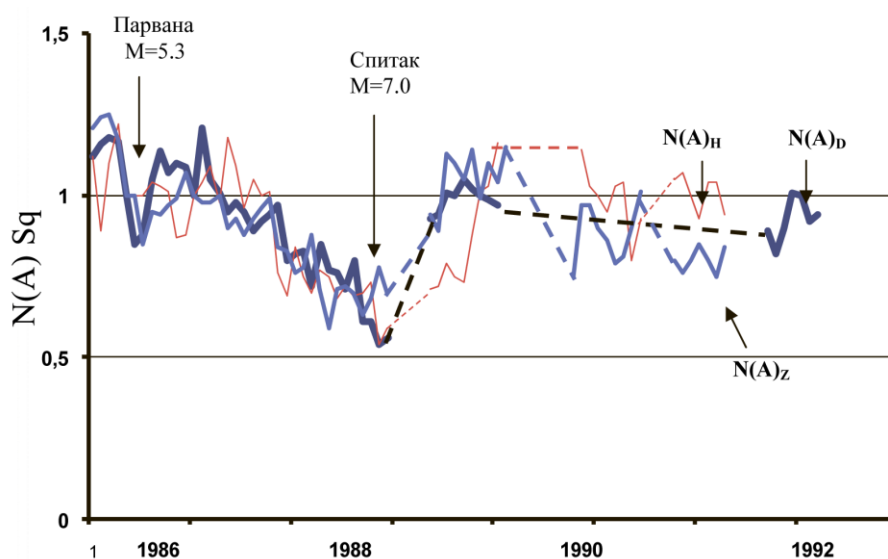


Рисунок 6 – Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ Sq- вариаций для компонентов δD , δH и δZ геомагнитного поля δT между станциями Джерадзор – Товуз за период 1986-1993 гг.

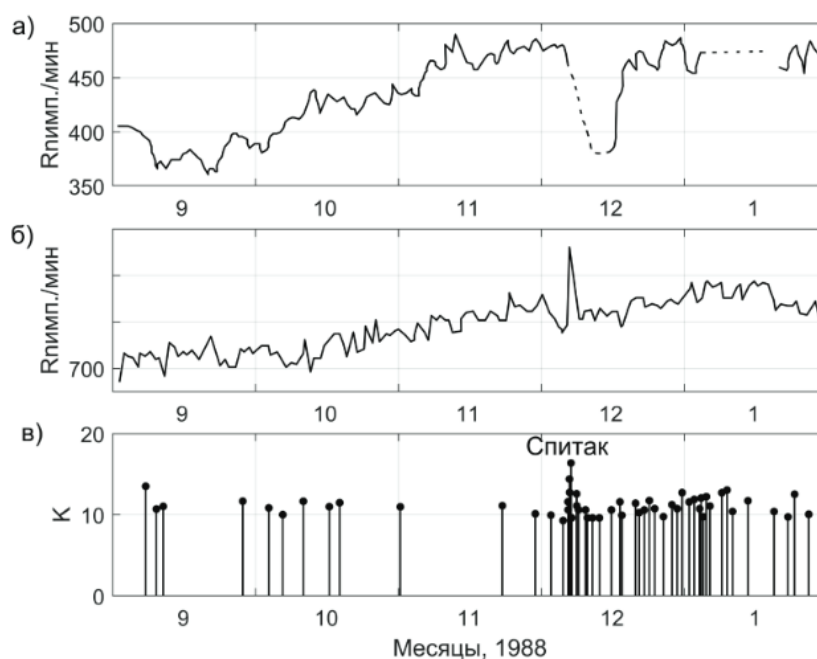


Рисунок 7 – Изменения концентрации подпочвенного радона (Rn имп./мин) на станциях Лениакан (а) и Джермук (б). Энергетический класс сейсмических событий (в)

Результат этих исследований позволяет считать, что полученные аномальные изменения в геофизических полях являются возможными геофизическими предвестниками Парванийского (13.05.1986 г., $M=5.4$) и Спитакского (07.12.1988 г., $M=7.0$) землетрясений. В дальнейшем геофизический мониторинг вариаций геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля может использоваться для выявления возможных предвестников сильных землетрясений в других сейсмоактивных регионах России.

Результаты исследования опубликованы в [22].

2.3 Мониторинг динамики криолитозоны Чукотки

Совместно с Институтом океанологии РАН и Институтом Физики Земли РАН им. О.Ю.Шмидта рассмотрена проблема деградации многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) в Чукотском автономном округе (ЧАО) и необходимость создания системы спутникового геодезического мониторинга.

Целью исследования является разработка концепции системы мониторинга криолитозоны в ЧАО на основе использования данных спутниковой геодезии с целью непрерывной оценки динамики деградации ММГ и оперативного предупреждения опасных процессов в местах размещения промышленных и инфраструктурных объектов. Рассмотрены природно-климатические и техногенные особенности региона, современные прогнозы развития криолитозоны и потенциальные риски для инфраструктуры.

Предложена комплексная система мониторинга (Рис. 8), основанная на интеграции ГНСС- и InSAR-наблюдений, позволяющая осуществлять высокоточный контроль деформаций земной поверхности, фундаментов зданий, промышленных объектов, аэропортов и протяжённых сооружений. Рассмотрены особенности установки оборудования в условиях вечной мерзлоты и варианты развертывания подсистем мониторинга.

Новизна исследования обусловлена тем, что в настоящее время система мониторинга состояния криолитозоны в ЧАО представлена, в основном, пунктами метеорологических и гляциологических наблюдений системы государственного фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты и сети циркумполярного мониторинга сезонно-талого слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM), а также объектовыми сетями геотехнического мониторинга. Применение методов спутниковой геодезии для исследования динамики многолетнемерзлых грунтов (ММГ) является современным общемировым трендом. Это обусловлено высокой точностью и хорошей разрешающей способностью спутниковых геодезических измерений, а также возможностью комплексирования различных методов спутниковой геодезии для организации непрерывного мониторинга ММГ. Активно развиваются технологии применения данных спутниковой геодезии для слежения за динамикой бугров пучения на основе данных ГНСС и InSAR, мониторинга толщины сезонно талого слоя на основе данных InSAR и ГНСС.



Рисунок 8 – Концептуальная схема системы мониторинга ММГ в ЧАО

Практическая значимость исследования с тем, что сложные климатические условия, высокая льдистость грунтов, а также техногенное воздействие на мерзлоту

создают риски деформаций оснований зданий и сооружений. Прогнозы показывают, что к 2030 году мощность сезонно-талого слоя (СТС) увеличится на 150–200% по сравнению с историческим уровнем. Это приведёт к снижению несущей способности свай до 70% и усилению сил морозного пучения до 90%. Учитывая активное развитие инфраструктуры региона, вопрос развития систем постоянного мониторинга состояния криолитозоны становится крайне актуальным и практически значимым.

Результаты исследования доложены на конференции [21].

2.4 Моделирование деформаций земной коры в окрестности подвижных разломов

Дальний Восток России – уникальный регион взаимодействия нескольких литосферных плит в условиях интенсивной субдукции. В настоящем исследовании проведен анализ геодинамики двух активных зон Дальнего Востока: Сахалинской системы разломов и Алеутской островной дуги в районе Командорских островов. Несмотря на принадлежность к субдукционному типу границ, данные области контакта литосферных плит обладают фундаментальными отличиями как в геометрии, включая угол падения сейсмофокальной зоны, так и в интенсивности движений, наблюдаемых на поверхности. В основу исследования легли новые данные повторных наблюдений ГНСС на Северо-Сахалинском геодинамическом полигоне Росреестра (ССГДП) за многолетний период, а также на постоянно действующих станциях, расположенных на Командорских островах, за период после сильного землетрясения 17.07.2017 с $M_w = 7.8$ вблизи них. В результате обработки по ежесуточным решениям составлены временные ряды координат пунктов, по которым выполнена оценка скоростей смещения пунктов. Для командорских станций применена специальная методика оценки скоростей, ввиду существенных сейсмических ступенчатых смещений на графиках, а также визуального отличия наклона линии тренда до и после сильного землетрясения 20.12.2018 с $M_w = 7.2$.

Существенные изменения в векторах скоростей смещения станций (порядка 20–30° по направлению и 27% в среднем по длине) до события 17.07.2017 (опубликованы ранее в [24]), между сильными землетрясениями и после 20.12.2018 (Рис. 9) могут говорить о многократном перераспределении движений на контакте плит.

В то же время, в результате моделирования механического сцепления на сахалинском участке контакта Амурской и Охотоморской плит по оценкам скоростей на пунктах ССГДП, опубликованного ранее в [23], выявлены зоны максимального сцепления, а также высокого градиента, совпадающие с локализацией очагов двух

сильнейших за последние 30 лет землетрясений в регионе: Нефтегорского (27.05.1995, $M_w = 7.0$, глубина 23.6 км) и Углегорского (04.08.2000, $M_w = 6.8$, глубина 15.0 км).

Таким образом, выявлены существенные различия в реакции на сильные сейсмические события структур рассмотренных участков контакта плит на Дальнем Востоке. Установлено, что распределение механического сцепления и связанные с ним поверхностные деформации в Сахалинской зоне демонстрируют относительную стабильность после реализации сильных сейсмических событий, что может указывать на дефицит выделения сейсмического момента и высокую вероятность новых сильных землетрясений в регионе. В то же время, в районе Командорских островов за период наблюдений зафиксирована многократная перестройка режима межплитового взаимодействия, сопровождавшая каждое сильное землетрясение за рассмотренный период и отразившаяся в значительных изменениях оценок скоростей смещений земной поверхности.

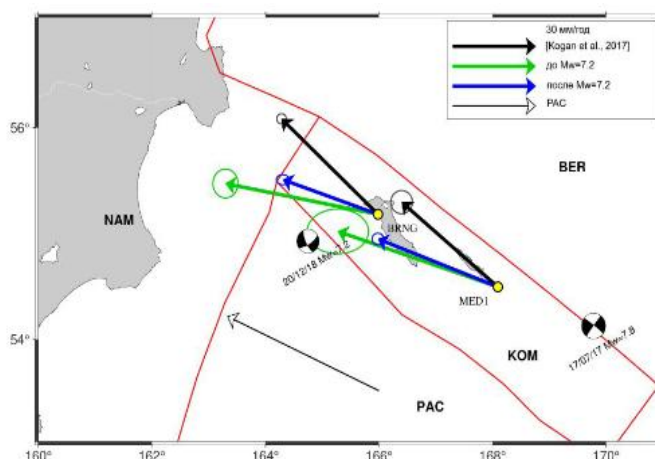


Рисунок 9 – Скорости смещения станций Командорских островов за разные периоды

Результаты свидетельствуют о принципиально отличающихся режимах сейсмического цикла и релаксационных процессов в сравниваемых зонах, обусловленных различиями в их глубинной структуре и характере движений на контакте плит.

Результаты опубликованы в [25].

2.5 Постледниковые движения в пределах Балтийского щита

Были проанализированы соотношения между вертикальным поднятием Балтийского щита, определяемым по наблюдениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), и изменением гравитационного поля, зарегистрированным спутниковыми гравиметрическими проектами GRACE и его продолжением GRACE-FO за период 2003–2023 гг. Изучаемые гравитационные аномалии отражают перераспределение

гравитирующих масс в земной коре и верхней мантии, которые неизбежно сопровождают процесс постледниковой изостатической компенсации.

В данной работе были сопоставлены скорости вертикального движения геодезических пунктов в Фенноскандии, определённые методами ГНСС, с изменениями гравитационных аномалий в этой же области по данным спутникового проекта GRACE (включая, его продолжение GRACE-FO). Для исследования были использованы данные ГНСС из трёх различных источников. Для сопоставления их с вертикальными движениями по имеющимся данным ГНСС в Фенноскандии были выбраны две области размером порядка длины полуволны 60-й гармоники сферического разложения, т. е. около 330 км, по которым было выполнено пространственное осреднение имеющихся данных ГНСС и спутниковой гравиметрии. Выбранные области различаются между собой по средней скорости вертикальных движений и одновременно характеризуются относительной латеральной однородностью распределения вертикальных движений внутри каждой из них. Такими областями являются: (1) центральная область Скандинавского полуострова, прилегающая к северу Ботнического залива и к западу от него и (2) зона сочленения Балтийского щита с Русской плитой к востоку от Ботнического залива (Рис. 10). В первой из областей скорости поднятия максимальны и достигают 9 мм/год (см. красные стрелки на Рис. 10), во второй области скорости поднятия уменьшаются от 5 до 2 мм/год (см. синие стрелки на Рис. 10).

Проведённое исследование показывает значимость совместного анализа гравиметрических (GRACE/GRACE-FO) и координатных (ГНСС) наблюдений, включающим как горизонтальные, так и вертикальные движения. Комплексный подход, использующий одновременно различные инструментальные методы, открывает перспективы для более объективной и точной оценки современных движений земной коры, повышая надёжность выводов о состоянии и эволюции Балтийского щита. Полученные результаты могут служить базой для прогнозирования дальнейших изменений в вертикальной и горизонтальной составляющих движения земной коры и формирования стратегий по совершенствованию высокоточного координатного обеспечения в районах постледниковой изостатической компенсации.

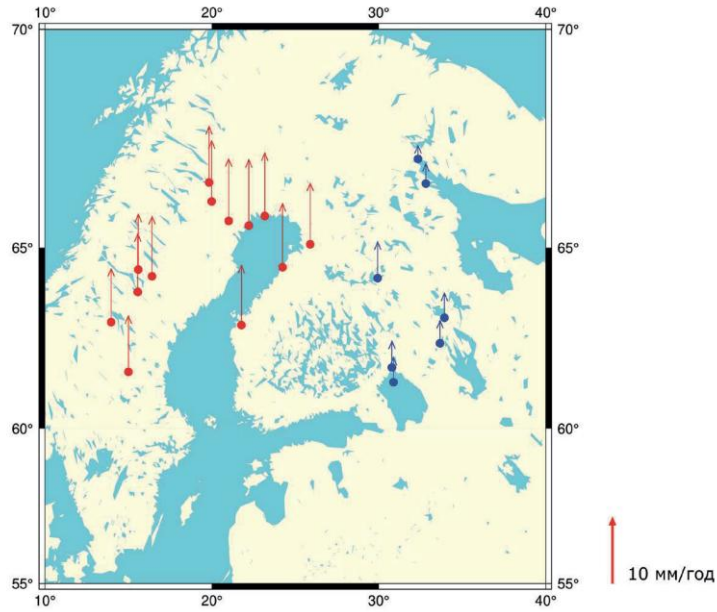


Рисунок 10 – Скорости вертикальных движений в Скандинавии:
красные стрелки – зона 1, синие стрелки – зона 2

Результат опубликован в [26].

3 Вопросы генерации магнитного поля

3.1 Численное и аналитическое поведение двумерного пространственно-периодического течения идеальной жидкости

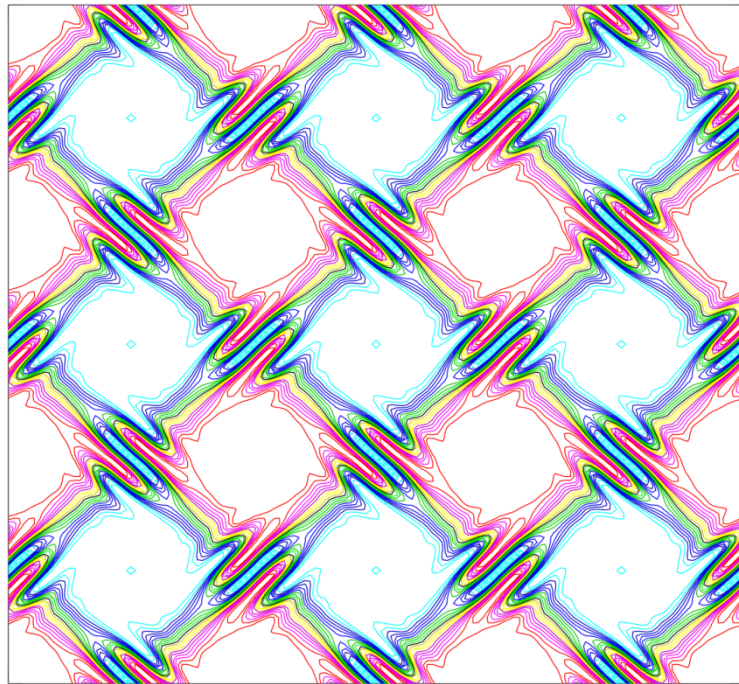
В 2025 г. проведены следующие исследования:

1. Численно и аналитически изучено поведение производной по времени палинстрофии $\|\omega\|_1^2 = (2\pi)^{-2} \int_{\mathbb{T}^2} |\nabla \omega|^2 dx$ двумерного пространственно-периодического течения идеальной жидкости. Аналитически показано, что в суммах, через которые выражается в терминах коэффициентов Фурье завихренности ω эта производная, происходят существенные сокращения. Соответственно, можно предположить, что вследствие этого производная палинстрофии по времени ограничена величинами вида $C \|\omega\|_1^2 \max_{\mathbb{T}^2} |\omega|$, откуда следовали бы более реалистичные, чем известные на настоящий момент, оценки экспоненциального вида временного роста палинстрофии.

В рамках численного исследования указанных оценок естественно вычислять максимумы отношений $C_p = |d\|\omega\|_1^2/dt| / (\|\omega\|_1^2 \max_{\mathbb{T}^2} |\omega|)$ по ω , являющихся конечными рядами Фурье по пространственным переменным с волновыми числами $|n_j| \leq 2^p - 1$. Написана программа расчета C_p и вычислены максимумы C_p для $p = 3$ и $p = 4$, равные 0.5112 и 0.7797, соответственно. (Эти максимумы обязаны увеличиваться с ростом

параметра p .) Найдено, что ω_p , реализующие максимум отношения C_p для данного p , инвариантны относительно поворота на угол $\pi/2$ вокруг точки глобального максимума $|\omega_p|$ (см. Рис. 11). Аналитически выявлен механизм роста C_p при обращении в ноль центрально-антисимметричной части ω_p , и далее части ω_p , антисимметричной при повороте на угол $\pi/2$ вокруг точки глобального максимума $|\omega_p|$, объясняющий эту особенность.

Проект находится в стадии выполнения. Расчеты для больших p продолжаются. Независимость C_p от p укажет на экспоненциальный рост энтропии, в противном случае характер роста C_p с p укажет на более правдоподобную оценку скорости её роста.



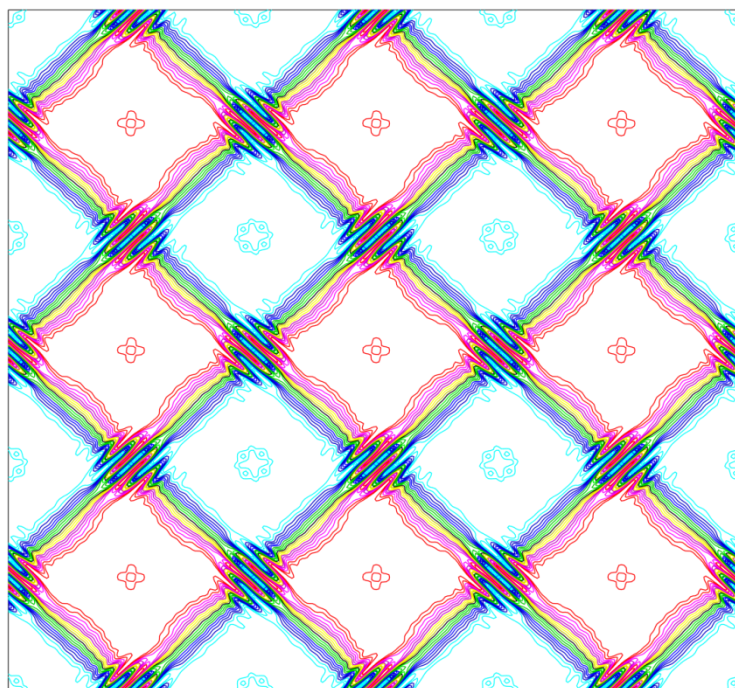


Рисунок 11 – Изолинии завихренности, реализующей максимум C_p для $p = 3$ (верхняя панель) и $p = 4$ (нижняя панель).
Показано по 9 смежных ячеек периодичности течения

2. Продолжено численное исследование доминирующих магнитных мод, т.е. собственных функций оператора магнитной индукции с максимальным (для данных параметров задачи) инкрементом роста, когда поле скорости течения электропроводной жидкости квазипериодично по пространству.

Решаемая задача имеет крайне высокую вычислительную сложность: Задача о кинематическом динамо представляет физический интерес в трехмерной постановке. Если использовано разрешение N гармоник Фурье для каждой периодичности, магнитное поле описывается конечным рядом Фурье с N^6 коэффициентами (ср. с N^3 гармоник в случае пространственно-периодических поля скорости течения и магнитной моды). Это определяет очень высокие требования к объему оперативной памяти компьютера уже (для весьма скромного разрешения!) при $N=32$. Даже для этого относительно малого N задачу невозможно решать на кластере ИТПЗ. Такой очень значительный объем данных определяет медленную сходимость итерационных методов расчета доминирующего собственного значения и, соответственно, большие объем и длительность расчетов.

Рассматривается кинематическая генерация магнитного поля квазипериодическим течением несжимаемой жидкости с полем скорости $\mathbf{V}=\alpha\mathbf{u}+(1-\alpha)\mathbf{w}$, где поля \mathbf{u} и \mathbf{w} имеют равную энергию и пространственно периодичны, но периоды \mathbf{u} и \mathbf{w} взаимно несоизмеримы. Расчет доминирующих магнитных мод для $0\leq\alpha\leq 1$ и коэффициента магнитной диффузии $\eta=0.1$ закончен. Для сравнения результатов также проводятся

аналогичные расчеты для $\eta=0.25$. Впервые в нашей практике расчеты для большего коэффициента магнитной диффузии оказались более громоздкими, чем расчеты для меньшего коэффициента (по-видимому, сказывается тот факт, что в квазипериодическом случае спектр оператора Лапласа не отделен от нуля, хотя на уровне точных утверждений это явление ещё нами не понято).

Поскольку при использовании степенного метода Арнольди вычисления доминирующего собственного значения и его оптимизированных модификаций, которые мы применяли ранее для численного решения задач динамо, сходимость оказалась крайне медленной, приходится исследовать применимость других численных методов (обратный степенной метод, интегрирование резольвенты оператора магнитной индукции). Это, однако, также весьма времязатратный процесс ввиду необходимости программирования тщательно распараллеленных алгоритмов. При этом на определенном этапе оказалось необходимым отказаться от использования параллельных версий кодов быстрого преобразования Фурье библиотеки FFTW, поскольку они не позволяют распределить данные по узлам кластера оптимальным образом, что также потребовало дополнительных усилий в части программирования. Новые коды разработаны Р. Чертовским и начато их использование для расчетов.

Результаты вычислений показывают, что развитая квазипериодичность не способствует генерации магнитного поля - при α в средней части рассматриваемого интервала $0 \leq \alpha \leq 1$ инкременты роста имеют минимум. Это может быть связано с потерей когерентности квазипериодического генерирующего действия течения в разных областях пространства.

3. Численно решалась задача об адвекции пассивного скаляра квазипериодическим течением несжимаемой жидкости с полем скорости вида $\mathbf{V} = \alpha \mathbf{u} + (1-\alpha) \mathbf{w}$, где поля \mathbf{u} и \mathbf{w} имеют равную энергию и периодичны по пространству, но их периоды взаимно несоизмеримы. Параметр α изменяется от 0 до 1. По построению, при $\alpha=0$ и $\alpha=1$ течение периодично по пространству, а при $\alpha=1/2$ вклад обоих слагаемых одинаков, что отвечает максимальной квазипериодичности течения. Таким образом, параметр α можно интерпретировать как степень квазипериодичности течения. Поля \mathbf{u} и \mathbf{w} синтезируются как ряды Фурье с псевдослучайными коэффициентами и экспоненциально затухающим энергетическим спектром.

Цель работы - понять, улучшает ли наличие у потока жидкости пространственной квазипериодичности его перемешивающие свойства.

На языке C++ была написана параллельная программа для расчета доминирующей моды этой задачи с максимальным (в алгебраическом смысле) инкрементом роста (на

самом деле, это инкремент затухания моды, т.к. все собственные значения этого оператора имеют неположительные действительные части). Переносимая течением скалярная примесь представлена в виде конечного ряда Фурье по каждой пространственной переменной данной периодичности. Соответственно, когда течение имеет размерность d , и использовано разрешение N гармоник Фурье для каждой периодичности, это скалярное поле описывается N^{2d} коэффициентами Фурье. Для упрощения вычислительной сложности расчетов рассматриваются двумерные течения ($d=2$).

Доминирующий (для данной величины параметра α) инкремент роста λ_{max} , т.е. действительная часть собственного значения оператора переноса пассивного скаляра, вычисляется посредством интегрирования резольвенты оператора по интерактивно выбираемым замкнутым контурам формы окружностей, диаметр которых в процессе расчетов уменьшается. Применение резольвенты к заданному вектору реализовано с помощью программы BICGStab.

Проведены предварительные расчеты для одной пары \mathbf{u} и \mathbf{w} и $N=32$ на кластере "Ломоносов" МГУ. Их результаты приведены на графике Рис. 12. В целом можно сделать вывод, что квазипериодичность улучшает (по крайней мере для выбранных полей \mathbf{u} и \mathbf{w}) перемешиваемость переносимого скаляра, т.к. собственные значения (оказавшиеся в данном случае действительными) λ_{max} минимальны по абсолютной величине при α около $1/2$. Однако остаётся необходимым выяснить, почему они не ложатся на гладкую кривую (недостаточное число точек на заданном контуре при интегрировании резольвенты оператора адвекции скаляра? недостаточная точность вычисления резольвенты? недостаточное пространственное разрешение доминирующих мод? или на графике "перемешаны" инкременты роста мод из двух близких, но различных ветвей?).

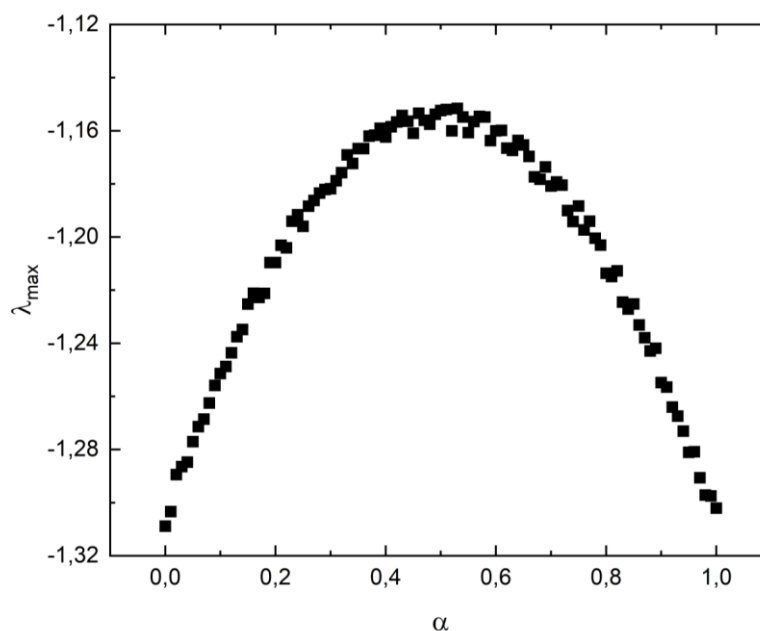


Рисунок 12 – Доминирующее собственное значение λ_{max} как функция параметра степени квазипериодичности α

4. Продолжена оптимизация вычислительного алгоритма для численного решения задачи о конвективном динамо в слое электропроводной жидкости с наклонной осью вращения. Приняты геофизически обоснованные граничные условия. Предполагается использовать данную программу для поиска аттрактора, демонстрирующего существенное число инверсий магнитного поля, для последующего поиска их предвестников по предшествующим временным рядам. Для увеличения скорости интегрирования уравнений конвективного динамо по времени, в 2025 г. модифицировано использование в программе алгоритма явно- неявного метода Рунге-Кутты 2/3 порядка IMEXRKCB3c с контролем точности интегрирования и автоматическим выбором шага интегрирования.

Результаты исследований опубликованы в работе [27] и доложены на конференциях [28-32].

3.2 Модификации метода дополнительных подпространств и его применение для численного решения уравнений конвекции

Метод дополнительных подпространств позволяет уменьшить количество вычислений при численном интегрировании дифференциальных уравнений с использованием метода Галеркина. Для случая физических граничных условий, например, условия прилипания для жидкости, использование традиционного алгоритма требует решения системы линейных уравнений на каждом шаге интегрирования. При использовании метода дополнительных подпространств решение системы уравнений

заменяется проектированием на пространство небольшой размерности, или же решением измененной системы уравнений, которое требует меньшего количества операций, и вычислением коррекции. При вычислении коррекции используются вспомогательные массивы, посчитанные в начале выполнения программы. Представлено несколько модификаций метода, которые, в зависимости от решаемой задачи, позволяют минимизировать объем вычислений или количество памяти, требующееся для хранения вспомогательных массивов.

Метод применен для решения уравнений конвекции в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу и вращающемся относительно наклонной оси. На горизонтальных границах температура постоянна, а для жидкости предполагаются условия прилипания (Рис.13). Для рассмотренных значений параметров временное поведение решения состоит из повторяющихся событий, в каждом из которых можно идентифицировать два плато, соответствующие временным интервалам, на которых решение близко к неустойчивым стационарным состояниям. Такое поведение решений, возможно, связано с существованием гетероклинических траекторий между этими стационарными состояниями.

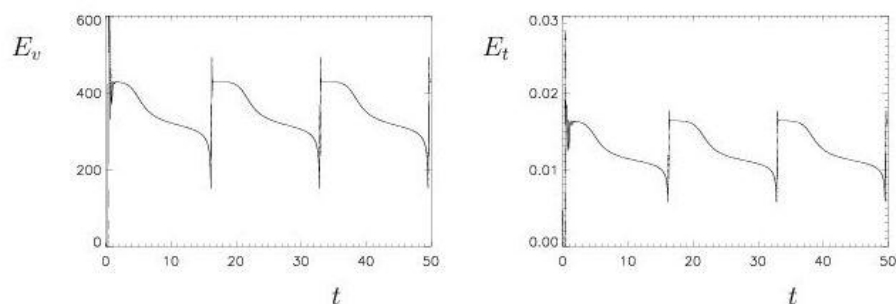


Рисунок 13 – Зависимость от времени кинетической энергии (слева) и температуры (справа)

3.3 Механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков

Рассмотрен вопрос о генерации магнитного поля во внешних областях галактик, т.е., на большом удалении от центра галактического диска. В то время как формирование магнитного поля на относительно небольшом расстоянии до центра галактики происходит под действием механизма динамо (альфа-эффекта), и этот процесс изучен в литературе достаточно хорошо, вопрос о существовании и механизмах генерации поля на большом удалении от центра оставался открытым.

Численно исследовалось поведение системы, которая описывается дифференциальным уравнением, полученным из уравнений Навье-Стокса и уравнения

магнитной индукции, в которых учитываются дифференциальное вращение, в приближении плоского слоя с учетом расширения галактического диска по мере удаления от центра. Для изучения возможности и результата генерации магнитного поля была сформулирована и решена задача на собственные значения с использованием методов теории возмущений. Численное решение данной задачи было найдено путем использования классического степенного метода и метода прогонки. Несмотря на то, что поле на большом расстоянии от центра существенно меньше, оно также может сформироваться в регулярную структуру, не затухнув. Показана возможность существования магнитного поля противоположной полярности (инверсий) для внешних областей галактик. Генерация магнитного поля возможна как за счет механизма динамо, так и за счет магниторотационной неустойчивости, в линейной и нелинейной постановках. Поскольку природа магнитогидродинамических явлений в геофизике и астрофизике схожи, а уравнения Максвелла, лежащие в основе моделей, одни и те же, методы, применяемые для изучения космического магнетизма, могут быть применены для изучения магнитного динамо Земли.

Результаты опубликованы в [33-34].

4 Задачи теории упругости

В 2025 г. продолжены исследования по дальнейшему развитию теории разложений по собственным функциям Папковича–Фадля и построению новых точных решений важнейших, с точки зрения приложений к задачам геодинамики, краевых задач теории упругости в декартовой системе координат.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью развития методов решения краевых задач теории упругости и механики разрушения для конечных областей с неоднородными включениями и трещинами. Эти решения необходимы для верификации численных методов расчетов в областях с сингулярностями, а также для построения принципиально новых численных методов расчетов остаточных напряжений в горной породе.

Научная новизна заключается в разработке математического аппарата, предназначенного для решения таких задач, и его апробации, включая сравнение аналитических решений с численными.

Практическая значимость. Было показано, что в некоторых случаях в окрестности сингулярностей невозможно даже качественно оценить характер особенностей, опираясь на приближенно-аналитические методы. Вместе с тем некоторые вычислительные

комплексы дают очень хорошее совпадение аналитических и численных решений, хотя и не отвечают на вопрос о характере особенности (степенная, логарифмическая).

Построено точное решение краевой задачи теории упругости для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты (полосы) с центральной поперечной трещиной, расположенной на вертикальной оси симметрии. Задача решается в двух постановках: классической (на основе представлений Шермана, когда решение удовлетворяет всем уравнениям теории упругости) и неклассической (на основе представлений Гольденבלата, когда не выполняются условия совместности деформаций т.е. решения с остаточными (начальными, собственными) напряжениями). В первом случае задан профиль трещины, а во втором случае известно, что в результате сброса остаточных напряжений в полосе образуется поперечная трещина с тем же профилем, что и в первой задаче. Решения обеих задач представляются в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых определяются в явном виде. Метод решения не зависит от вида однородных граничных условий на сторонах плиты.

Решение в классической постановке (Рис. 14а) предполагает, что бесконечная плоскость разделяется на одинаковые полосы. Вдоль границ полос проводятся разрезы и делаются симметричные вкладки. В пределах каждой полосы вдоль вертикальной оси дополнительно создаются одинаковые вкладки. Создание вкладок предполагает добавление или удаление материала (нет напоздания сторон). Профили вертикальных и горизонтальных вкладок (сплошные линии) согласованы так, что при задании на осях вертикальных вкладок нормальных напряжений или разрыва продольных перемещений нормальные напряжения на осях горизонтальных вкладок (штриховые линии) будут равны нулю. Отсюда следует, что в модели Шермана граничные условия не «сносятся условно на недеформируемую поверхность», а ставятся на прямолинейных сторонах полосы, совпадающих с осями вкладок. Следовательно, поперечные перемещения сторон полосы – это профиль горизонтальных вкладок. Таким образом, по Шерману стороны полосы, прямолинейные до деформации, остаются прямолинейными и после. Поэтому уравнения совместности деформаций выполняются (нет пустот и напоздания материала). В том случае, когда на разрезе заданы продольные перемещения, неизвестные коэффициенты разложений легко находятся с помощью классического соотношения ортогональности Папковича. В том случае, когда на разрезе заданы нормальные напряжения, решение задачи усложняется, т.к. сначала потребуется найти перемещения на разрезе, соответствующие заданным там напряжениям, и только потом воспользоваться соотношением ортогональности Папковича. Чтобы определить неизвестные перемещения, вводится функция, сконструированная определенным образом из собственных функций

Папковича–Фадля так, что она допускает аналитическое продолжение во всю полосу, кроме точек разреза. Для построения аналитических продолжений используется преобразование Бореля. Рассмотрены примеры двух решений, которые сравниваются с соответствующими решениями для неограниченной плоскости, а также с численными решениями, полученными на основе метода конечных элементов в упругой постановке с использованием сертифицированного программно-вычислительного комплекса ZSoil. Сравнение аналитических и численных решений показало хорошее согласование. Показана эквивалентность задачи с разрывом перемещений и неоднородной задачи теории упругости в свободной полосе.

Решение в неклассической постановке (Рис. 14б) предполагает, что бесконечная плоскость разделяется на одинаковые правые и левые полуполосы. Каждая из них заменяется на деформированные правые и левые полуполосы с симметрично искривленными длинными сторонами и торцами (штриховые линии). Левые полуполосы являются зеркальным отображением правых относительно вертикальной оси. К границам каждой деформированной полуполосы прилагаются некоторые нормальные и касательные напряжения, которые придадут им первоначальный вид (сплошные линии). После этого все полуполосы склеиваются. В результате получится плоскость, в которой есть остаточные напряжения. Профили длинных сторон и торцов деформированных полуполос согласованы так, что в зависимости от профиля длинных сторон можно так подобрать профиль торцов, что после склеивания полуполос в плоскость поперечные нормальные напряжения на длинных сторонах полуполос будут равны нулю. Задача для плоскости с остаточными напряжениями эквивалентна неоднородной задаче для неограниченной плоскости, в которой приложены внешние нагрузки. При этом нагрузки на торце полуполос можно выразить через форму профиля торцов деформированных полуполос, а нагрузки на длинных сторонах – через форму профиля горизонтальных сторон деформированных полуполос. Если из плоскости вырезать полуполосу, то ее стороны искривятся и она приобретет первоначальный вид деформированной полуполосы, что говорит о том, что в плоскости есть остаточные напряжения.

Сравнение решений для полосы с трещиной в классической и неклассической постановках показывает, что они принципиально отличаются. В первом случае выполняется условие совместности деформаций, поэтому стороны полосы прямолинейные до деформации остаются прямолинейными и после. Во втором случае условия совместности деформаций не выполняются (они никогда не выполняются, если речь идет об остаточных напряжениях). Причина значительных отличий в перемещениях для первого и второго решений кроется в том, что в первом решении стороны полосы не

могут искривляться (этого требует условие совместности). Они неподвижны в поперечном направлении. Поэтому перемещения в первом решении существенно меньше, чем во втором, а это сказывается и на напряжениях. Напряжения имеют схожий характер распределения, но разные знаки т.к. в первом случае берега разреза раздвигаются, а во втором они стягиваются.

Полученное решение для полосы с трещиной может быть использовано в теории очага землетрясений точно так же, как ранее использовалось для этих целей классическое решение для плоскости с трещиной.

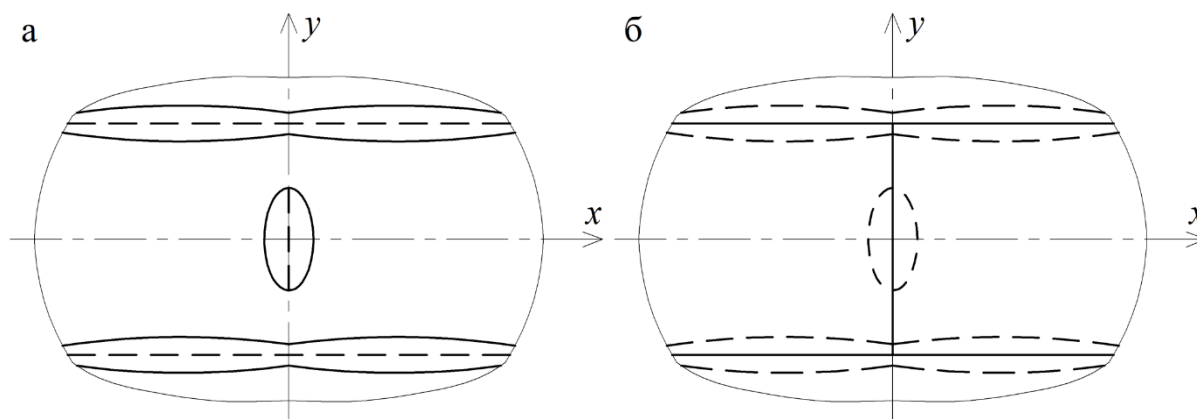


Рисунок 14 – Схема краевой задачи для длинной прямоугольной плиты с трещиной: а) классическая постановка (сплошные линии – профили горизонтальных и вертикальных вкладок, штриховые линии – оси вкладок); б) неклассическая постановка (штриховые линии – профили длинных сторон и торцов деформированных полуполос, сплошные линии – стороны полуполос после приложения напряжений и склеивания)

Результаты опубликованы в [35-37].

Построено точное решение неоднородной задачи для достаточно длинной тонкой прямоугольной плиты со свободными сторонами (четно-симметричная деформация). Вдоль ее вертикальной оси имеется прослойка (ребро жесткости), к которой приложена нагрузка (Рис. 15). Прослойка характеризуется жесткостью на растяжение-сжатие EF (E – модуль упругости материала прослойки, F – площадь поперечного сечения прослойки). Подробно изложен метод решения задач двумерной упругости с линейными включениями, который основан на двух фундаментальных результатах по теории базиса собственных функций Папковича–Фадля: 1) соотношении ортогональности Папковича и 2) разложениях Лагранжа по собственным функциям Папковича–Фадля. Решение задачи состоит из двух этапов. На первом этапе строится решение неоднородной задачи для тонкой прямоугольной плиты со свободными длинными сторонами, в которой внешняя нагрузка действует вдоль оси y . На втором этапе из условия равновесия элементарного участка ребра с помощью разложений в ряд Лагранжа по собственным функциям

Папковича–Фадля определяются контактные напряжения между ребром жесткости и плитой, которые необходимо подставить в решение неоднородной задачи для плиты. Таким образом, решения на каждом из этапов представляются рядами по собственным функциям Папковича–Фадля, коэффициенты которых определяются в явном виде. Благодаря этому удастся построить точное решение задачи. Проведено сравнение полученного решения с решением для неограниченной упругой плоскости с бесконечным одномерным ребром жесткости и с численным решением, полученным методом конечных элементов в упругой постановке в сертифицированном программно-вычислительном комплексе ZSoil. Сравнение аналитических и численных решений показало хорошее согласование. С помощью предложенного метода круг решаемых в замкнутом виде задач может быть существенно расширен. В частности, можно учесть изгибную жесткость ребра. Если длина ребра жесткости меньше, чем ширина полосы, то в этом случае нужно использовать аналитические представления для собственных функций Папковича–Фадля.

Полученное решение описывает, в том числе, остаточные напряжения в тонких прямоугольных плитах с учетом массовых сил и те перемещения, которые возникают в результате их сброса с образованием разрывов. В зависимости от соотношения жесткостей плиты и прослойки связь между сбрасываемыми напряжениями и возникающими при этом деформациями будет различной. Из полученного решения легко получаются предельные случаи: когда прослойки нет и когда она абсолютно жесткая. Результаты получены впервые и могут быть использованы при анализе напряженно-деформированного состояния горных пород.

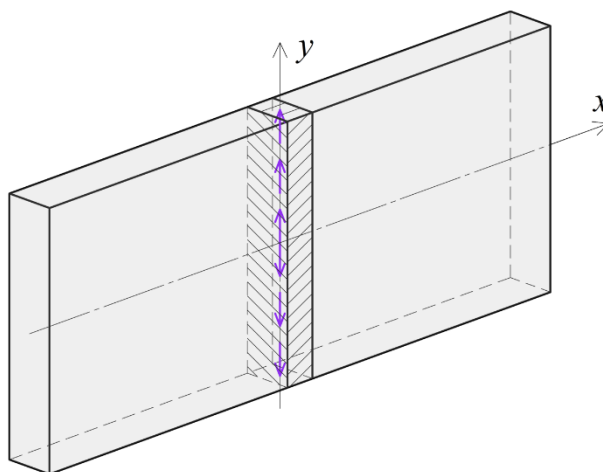


Рисунок 15 – Прямоугольная плита со свободными сторонами и прослойкой, к которой приложена нагрузка

Результат опубликован в [38-41].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные по теме исследования вносят вклад мирового уровня в решение проблем геодинамики и геофизики, изучавшихся в рамках темы. В 2025 году были получены следующие основные результаты.

Продолжено изучение линеаментно-блокового строения земной коры с помощью морфоструктурного районирования (МСР). Составлена схема МСР острова Сахалин, который характеризуется проявлениями сильной сейсмичности. Установлено, что землетрясения с $M_b +$ приурочены к морфоструктурным узлам, выделенным в результате проведенного МСР. На этой основе с помощью методов распознавания образов в пределах Сахалина определены места сильных землетрясений с $M_b +$. Полученные данные о положении потенциальных сейсмогенных узлов позволят значительно улучшить оценки сейсмической опасности Сахалина.

Проведено обобщение многолетних исследований, направленных на идентификацию сейсмоопасных узлов в горно-складчатых областях Средиземноморского сейсмоактивного пояса с помощью методов распознавания образов на основе данных МСР. Данные о выявленных сейсмоопасных узлах в пределах изученных территорий необходимы для разработки более адекватных моделей сейсмической опасности.

Завершены исследования по выявлению потенциально рудоносных узлов методами распознавания образов в Кавказском регионе. Результаты подтверждают узловую контроль полиметаллического оруденения на Кавказе и могут быть полезны при планировании и проведении поисковых работ в этом регионе.

Разработано реальное обобщение тектоники литосферных плит для современного этапа развития Земли на основе конвективной 3D модели современной глобальной геодинамики, которая, опираясь на реальные плотностные неоднородности Земли, полученные по данным сейсмической томографии, дает расчетную картину горизонтальных движений поверхности Земли, близко соответствующую кинематическим моделям тектоники плит и данным спутниковой геодезии.

Изучение аномальных вариаций геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля на примере двух сильных землетрясений в Армении показало, что выявленные аномальные вариации могут рассматриваться как возможные предвестники сильных землетрясений. В дальнейшем геофизический мониторинг вариаций геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля может использоваться для выявления возможных предвестников сильных землетрясений в различных сейсмоопасных регионах России.

Рассмотрена проблема деградации многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) в Чукотском автономном округе (ЧАО), которая вызывает необходимость создания системы спутникового геодезического мониторинга за состоянием ММГ. Предложена концепция комплексной системы мониторинга, основанной на интеграции ГНСС- и InSAR-наблюдений, позволяющая осуществлять высокоточный контроль деформаций земной поверхности, фундаментов зданий, промышленных объектов, аэропортов и протяжённых линейных сооружений. Система позволит получать непрерывные оценки динамики деградации ММГ и оперативно предупреждать об опасных процессах в местах размещения промышленных и инфраструктурных объектов.

Проведен анализ геодинамики двух активных зон Дальнего Востока – Сахалинской системы разломов и Алеутской островной дуги в районе Командорских островов, позволивший выявить существенные различия в реакции структур на сильные сейсмические события в этих областях. выявлены существенные различия в реакции на сильные сейсмические события структур рассмотренных участков контакта плит на Дальнем Востоке. Установлено, что распределение механического сцепления и связанные с ним поверхностные деформации в Сахалинской зоне демонстрируют относительную стабильность после реализации сильных сейсмических событий, что может указывать на дефицит выделения сейсмического момента и высокую вероятность новых сильных землетрясений в регионе. В то же время, в районе Командорских островов за период наблюдений зафиксирована многократная перестройка режима межплитового взаимодействия, сопровождавшая каждое сильное землетрясение за рассмотренный период и отразившаяся в значительных изменениях оценок скоростей смещений земной поверхности.

Были проанализированы соотношения между вертикальным поднятием Балтийского щита, определенным по наблюдениям ГНСС, и изменением гравитационного поля, зарегистрированным спутниковыми гравиметрическими проектами. Полученные результаты могут служить базой для прогнозирования дальнейшей динамики в вертикальной и горизонтальной составляющих движения земной коры и формирования стратегий по совершенствованию высокоточного координатного обеспечения в районах постледниковой изостатической компенсации.

В области магнитогидродинамики:

продолжено численное исследование доминирующих магнитных мод, т.е. собственных функций оператора магнитной индукции с максимальным (для данных параметров задачи) инкрементом роста, когда поле скорости течения электропроводной жидкости квазипериодично по пространству;

численно и аналитически изучено поведение производной по времени палинстрофии двумерного пространственно-периодического течения идеальной жидкости;

численно решалась задача об адвекции пассивного скаляра квазипериодическим течением несжимаемой жидкости, чтобы понять улучшает ли наличие у потока жидкости пространственной квазипериодичности его перемешивающие свойства;

получены модификации метода дополнительных подпространств и его применение для численного решения уравнений конвекции; представлено несколько модификаций метода, которые, в зависимости от решаемой задачи, позволяют минимизировать объем вычислений или количество памяти, требующееся для хранения вспомогательных массивов;

рассмотрен вопрос о генерации магнитного поля во внешних областях галактик, т.е., на большом удалении от центра галактического диска. Поскольку природа магнитогидродинамических явлений в геофизике и астрофизике схожи, методы, применяемые для изучения космического магнетизма, могут быть применены для изучения магнитного динамо Земли.

Продолжены исследования по дальнейшему развитию теории разложений по собственным функциям Папковича–Фадля и построению новых точных решений важнейших, с точки зрения приложений к задачам геодинамики, краевых задач теории упругости в декартовой системе координат.

По результатам исследований в 2025 г. опубликовано 10 статей в рецензируемых изданиях, а также сделано 26 докладов на международных и российских научных конференциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Родников А.Г., Туезов И.К., Харахинов В.В. (отв. ред.) Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона, Геофизический комитет, Москва. 1996.
2. Новикова О.В., Горшков А.И., Семка М.А., Ливинский А.И. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений (M6+) на Сахалине // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 127-128.
3. Gorshkov A., Kuznetsov I., Panza G., Soloviev A. Identification of Future Earthquake Sources in the Carpatho-Balkan Orogenic Belt Using Morphostructural Criteria // Pure Appl. Geophys. 2000. V.157. P.79-95.
4. Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicili// JSEE Spring. 2002. V.4(1). P.1-24.
5. Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A. Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // Bolletino della Societa Geologica Italiana. 2004. V.123. P.3-18.
6. Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A. et al. Delineation of the geometry of the nodes in the Alps-Dinarides hinge zone and recognition of seismogenic nodes ($M \geq 6.0$) // Terra Nova. 2009. V. 21(4). P.257-264. DOI:10.1111/j.1365-3121.2009.00879.x.
7. Gorshkov A.I., Soloviev A.A. Recognition of Possible Locations of Future $M \geq 6.0$ Earthquakes: The Mediterranean Mountain Belts // Journal of Volcanology and Seismology. 2009. V.3(3). P.210–219. DOI:10.1134/S0742046309030075.
8. Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Jiménez M.J. et al. Recognition of earthquake-prone areas ($M \geq 5.0$) in the Iberian Peninsula // Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali. 2010. V.21(2). P.131-162. DOI:10.1007/s12210-010-0075-3.
9. Gorshkov A., Gaudemer Y. Seismogenic nodes defined with pattern recognition in the French Massif Central // Journal of Iberian Geology. 2019. V. 45. № 1. P. 63-72. DOI:[10.1007/s41513-018-0087-x](https://doi.org/10.1007/s41513-018-0087-x).
10. Горшков А.И., Новикова О.В., Гаудемер И. Потенциальные места сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений в Эллинидах (Греция) // Физика Земли. 2020. № 1. С. 53-61. DOI:[10.31857/S0002333720010032](https://doi.org/10.31857/S0002333720010032) [Gorshkov A.I., Novikova O.V., Gaudemer Y. Strong ($M \geq 7.0$) Earthquake-Prone Areas in Hellenides, Greece // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 1. P. 45-52. DOI:[10.1134/S1069351320010036](https://doi.org/10.1134/S1069351320010036)].

11. Gorshkov A., Panza G.F., Soloviev A., Brandmayr E. On the seismic potential of the Corsica-Sardinia block // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2021. V. 32. № 4. P. 715-728. DOI:[10.1007/s12210-021-01014-z](https://doi.org/10.1007/s12210-021-01014-z).
12. Gorshkov A., Novikova O., Dimova L., Raykova R., Dimitrova S. Potential Locations of Strong Earthquakes in Bulgaria and the Neighbouring Regions // *International Journal of Geophysics*. 2024. V. 2024. Article 8103337. DOI:[10.1155/2024/8103337](https://doi.org/10.1155/2024/8103337).
13. Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G.F. The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2015. V. 56. № 2. P. 295-328. DOI:[10.4430/bgta0141](https://doi.org/10.4430/bgta0141).
14. Gorshkov A., Panza G.F., Novikova O. Seismogenic nodes in south Europe // In *Reliable Seismic Hazard Assessment and Earthquake Engineering: a New Horizon* (Eds.: Junbo Jia, Zhongliang Wu, Mihaela Kouteva-Guentcheva). 2025. CRC press, USA, 2025. P. 48-65.
15. Горшков А.И., Ливинский А.И. Использование ГИС-технологий и методов распознавания образов для определения рудоносных структур Кавказа по морфоструктурным данным // *Геоинформатика*. 2025. № 3. С. 21–29. DOI:10.47148/1609-364X-2025-3-21-29. EDN:JANPWI.
16. Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. - М.: КРАСАНД, - 2010. 472 с.
17. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Трехмерная модель конвекции в реально неоднородной мантии как основа количественного обобщения тектоники плит для современного этапа развития Земли // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2025. № 523. С. 1–5.
18. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М., Чуваев А.В. Термоконвективная трехмерная сферическая модель современной геодинамики Земли: применение в исследовании тектоники и региональной геологии // *Геотектоника*. 2025. № 1. С. 3–20. DOI:10.31857/S0016853X25010012 EDN: DAKPEL.
19. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и Северо-Восточной Азии // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 3. С. 476–495. DOI:10.15372/GiG20160302 EDN: VPERTX.
20. Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X. ITRF2014 plate motion model // *Geophysical Journal International*. 2017. V. 209. P. 1906–1912.
21. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Современная глобальная геодинамика с позиций 3D-модели конвекции в мантии земли и ее приложения к

региональным тектоническим процессам. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: IV Всероссийская конференция, Москва, 22–23 октября 2025 года.

22. Григорян А.Г., Баранов А.А. Аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля, как возможные предвестники сильных землетрясений на примере Армении // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17, № 2. С. 28-40. DOI:10.26006/29490995_2025_17_2_28. EDN:WCAVYN.

23. Гридчина М.С., Стеблов Г.М., Владимирова И.С., Басманов А.В. Исследование зоны сочленения литосферных плит в пределах о. Сахалин по данным спутниковой геодезии // Геофизические исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 81–96. DOI:10.21455/gr2023.4-5 EDN: KDEGAA.

24. Kogan M.G., Frolov D.I., Vasilenko N.F., Freymueller J.T., Steblov G.M., Ekström G., Titkov N.N., Prytkov A.S. Plate coupling and strain in the far western Aleutian arc modeled from GS data // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. № 7. P. 3176–3183. DOI:10.1002/2017GL072735 EDN: WJMDOI.

25. Гридчина М.С., Стеблов Г.М. Активные разломы дальнего востока. Новые данные // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 60-61.

26. Стеблов Г.М., Мельник Г.Э., Погорелов В.В. Постледниковые движения и вариации гравитационного поля в пределах Балтийского щита // Доклады РАН. Науки о Земле. 2025. Т. 525, № 1. С. 127-134.

27. Желиговский В.А. Вырождение нелинейности для пространственно-аналитических пространственно-периодических решений уравнений гидродинамического типа. Доклады РАН, Физика, Технические науки. 2025, том 522, с. 10-15.

28. Михайлов Е.А., Желиговский В.А., Таранюк А.А., Фролова М.В. Спектральные задачи в теории галактического динамо: асимптотические и вычислительные подходы. Журнал технической физики, 2025, выпуск 12, 2359-2362. (Принята к печати 23 июля 2025 г., Выставление онлайн 10 ноября 2025 г.).

29. Толмачев Д.С. Конвективное динамо в слое электропроводной жидкости с наклонной осью вращения. VII Молодежная конференция-школа "Природные процессы и катастрофы: изучение и адаптация", 13-16 октября 2025, Южно-Сахалинск. Стендовый доклад (<http://books.imgg.ru/atlasfull/proc6.pdf>, 71-72).

30. Желиговский В.А. Оценка скорости роста палинстрофии в двумерной гидродинамике: опыт подхода на основе вычислительного эксперимента. Современные

методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, 22-23 октября 2025, Москва.

31. Толмачев Д.С. Численное моделирование магнитного динамо во вращающейся электропроводной жидкости с наклонной осью. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, 22-23 октября 2025, Москва.

32. Таранюк А.А. Адвекция скалярной примеси двумерным течением с пространственно квазипериодическим полем скорости. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений, 22-23 октября 2025, Москва. Устный доклад.

33. Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А. Условия и механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков // Журнал технической физики. 2025. Выпуск 12. С. 2377-2380. DOI:10.61011/JTF.2025.12.61798.245-25.

34. Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А. Роль магниторотационной неустойчивости в появлении магнитного поля на периферии галактического диска // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2025. Т. 89. № 7. С. 1091-1096. DOI:10.31857/S0367676525070134. EDN:ENKKQS.

35. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Власов Д.А., Мороз А.И. Классические и неклассические решения краевых задач теории упругости // Материалы 15-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 2–4 декабря 2025 г. Москва. 2025 (в печати).

36. Kovalenko M.D., Kerzhaev A.P., Menshova I.V., Vlasov D.A. An elastic strip with a transverse stiffener: An exact solution // Mechanics of Solids. 2025. Vol. 60. P. 3350–3366. DOI: 10.1134/S0025654425602605.

37. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Власов Д.А., Мороз А.И. Классические и неклассические решения краевых задач теории упругости. 15-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 2–4 декабря 2025 г. Москва, Россия.

38. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Власов Д.А. Растяжение свободной полосы с абсолютно жестким включением. 52 школа-конференция «Актуальные проблемы механики» памяти Н.Ф. Морозова, Санкт-Петербург, 23–27 июня 2025 г.

39. Меньшова И.В., Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Власов Д.А. Растяжение свободной полосы с поперечным ребром жесткости. 52 школа-конференция «Актуальные проблемы механики» памяти Н.Ф. Морозова, Санкт-Петербург, 23–27 июня 2025 г.

40. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Власов Д.А. Полоса с двумя соосными трещинами. XXIV Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2025), Алушта, 7–13 сентября 2025 г.

41. Меньшова И.В., Коваленко М.Д., Кержаев А.П., Власов Д.А. Напряжения и перемещения в полосе с остаточными напряжениями и в полосе с трещиной. XXIV Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2025), Алушта, 7–13 сентября 2025 г.

Приложение А. Публикации по теме НИР в российских и международных журналах, входящих в Web of Science, Scopus, ядро РИНЦ

1. Горшков А.И., Ливинский А.И. Использование ГИС-технологий и методов распознавания образов для определения рудоносных структур Кавказа по морфоструктурным данным // Геоинформатика. 2025. № 3. С. 21–29. DOI:10.47148/1609-364X-2025-3-21-29. EDN:JANPWI.
2. Григорян А.Г., Баранов А.А. Аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля, как возможные предвестники сильных землетрясений на примере Армении // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17, № 2. С. 28-40. DOI:10.26006/29490995_2025_17_2_28. EDN:WCAVYN.
3. Желиговский В.А. Вырождение нелинейности для пространственно-аналитических пространственно-периодических решений уравнений гидродинамического типа // Доклады РАН. Физика. Технические науки. 2025. Т. 522. С. 10-15. DOI:10.31857/S2686740025030023. EDN:PVJTIJ.
4. Михайлов Е.А., Желиговский В.А., Таранюк А.А., Фролова М.В. Спектральные задачи в теории галактического динамо: асимптотические и вычислительные подходы // Журнал технической физики. 2025. Выпуск 12. С. 2346-2349. DOI:10.61011/JTF.2025.12.61791.235-25.
5. Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Селюцкая О.В. Отечественный научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. ES5026. DOI: 10.2205/2025es001035. EDN: KXWTNY.
6. Стеблов Г.М., Мельник Г.Э., Погорелов В.В. Постледниковые движения и вариации гравитационного поля в пределах Балтийского щита // Доклады РАН. Науки о Земле. 2025. Т. 525, № 1. С. 127-134. DOI: 10.7868/S303450652510147.
7. Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А. Условия и механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков // Журнал технической физики. 2025. Выпуск 12. С. 2377-2380. DOI:10.61011/JTF.2025.12.61798.245-25.
8. Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А. Роль магниторотационной неустойчивости в появлении магнитного поля на периферии галактического диска // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2025. Т. 89. № 7. С. 1091-1096. DOI:10.31857/S0367676525070134. EDN:ENKKQS.

9. Kovalenko M.D., Kerzhaev A.P., Menshova I.V., Vlasov D.A. An elastic strip with a transverse stiffener: An exact solution // *Mechanics of Solids*. 2025. Vol. V. 60. P. 3350–3366. DOI:10.1134/S0025654425602605 EDN:PVWNSO.

10. Gorshkov A.I., Panza G.F., Novikova O.V. Seismogenic nodes in south Europe. The edited book entitled "Reliable Seismic Hazard Assessment and Earthquake Engineering: a New Horizon" (on the 80th anniversary of Professor Giuliano F. Panza), CRC press, Taylor & Francis Group, USA. 2025. ISBN 978-1-041-11298-3. P.203-216.

Приложение Б. Доклады по теме НИР на российских и международных конференциях

1. Андреева Н.В., Баранов А.А. Сейсмичность Антарктиды и Южного океана // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 12-13.
2. Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М. Термоплотностные неоднородности и картина современных течений в мантии под океанами на основании 3D-модели современной геодинамики // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 17–21 ноября 2025 года. Москва, 2025. С. 89-92. EDN:FCVAUU.
3. Баранов А.А., Лобковский Л.И., Чуваев А.В., Бобров А.М. Численная модель современной Земли – моделирование плитной тектоники для Северной Евразии // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 17-18.
4. Бобров А.М., Лобковский Л.И., Баранов А.А. Глубинное строение мантии на основе модели глобальной геодинамики // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 17–21 ноября 2025 года. Москва, 2025. С. 109-112. EDN:GEWXEV.
5. Бобров А.М., Лобковский Л.И., Баранов А.А. Строение мантии: анализ сечений трехмерной численной модели // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 23-24.
6. Брикова С.А., Гридчина М.С., Басманов А.В. Геодинамический мониторинг Байкальской рифтовой зоны // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 26-27.
7. Гридчина М.С., Стеблов Г.М. Активные разломы дальнего востока. Новые данные // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 60-61.
8. Желиговский В.А. Оценка скорости роста палинстрофии в двумерной идеальной гидродинамике: опыт подхода на основе вычислительного эксперимента // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений:

Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 66-68.

9. Кержаев А.П., Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Власов Д.А., Мороз А.И. Классические и неклассические решения краевых задач теории упругости // Материалы 15-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 2–4 декабря 2025 г. Москва. 2025.

10. Ливинский А.И., Горшков А.И. Использование параметра фрактальности рельефа в задачах распознавания рудоносных узлов // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 93-94.

11. Ливинский А.И., Горшков А.И. Оценка информативности индекса фрактальной размерности рельефа для распознавания потенциально рудоносных морфоструктурных узлов на Кавказе и Алтай-Саянском регионе // Новое в познании процессов рудообразования: Четырнадцатая Российская молодёжная научно-практическая Школа, Москва, 17 – 21 ноября 2025 г. Сборник материалов. М.: ИГЕМ РАН, 2025. С. 139-142.

12. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Обобщение теории тектоники плит на основе 3D-модели конвекции в мантии Земли // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 17–21 ноября 2025 года. Москва, 2025. С. 206-210.

13. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Бобров А.М. Современная глобальная геодинамика с позиций 3D-модели конвекции в мантии Земли и ее приложения к региональным тектоническим процессам // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 99-101.

14. Лобковский Л.И., Гарагаш И.А., Шебалин П.Н., Владимирова И.С. К вопросу об аномально коротком промежутке времени между очагами мегаземлетрясений 30.08.2025 и 05.11.1952 в Курило-Камчатской зоне субдукции // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 102-105.

15. Мазова Р.Х., Артемьев А.Д., Баранов А.А., Denisov E.F., Van Den Bosch J.F. Катастрофические волны цунами при возможном обрушении фронтального края ледника

Туэйтса // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 108-109.

16. Мельник Г.Э., Стеблов Г.М., Погорелов В.В. О связи постледниковых движений и вариаций гравитационного поля Фенноскандии // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2025. С. 326. DOI:10.21046/23DZZconf-2025a

17. Новикова О.В., Горшков А.И., Семка М.А., Ливинский А.И. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений (M6+) на Сахалине // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 127-128.

18. Подвигина О.М. Устойчивость конвективных валов в горизонтальном слое, вращающемся относительно наклонной оси // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 133-134.

19. Подольская Е.С., Некрасова А.К., Прохорова Т.В., Селюцкая О.В., Трубенков А.В. Актуальный российский научный опыт использования веб-геоинформационных систем в сейсмологии // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 135-136.

20. Таранюк А.А. Адвекция скалярной примеси двумерным течением с пространственно квазипериодическим полем скорости // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 162-163.

21. Толмачев Д.С. Конвективное динамо в слое электропроводной жидкости с наклонной осью вращения // Природные процессы и катастрофы: изучение и адаптация: тезисы докладов VII Молодежной научной конференции-школы, Южно-Сахалинск, Южно-Сахалинск, 13–16 октября 2025 года. – Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, 2025. С. 71-72. DOI:10.30730/978-5-6044483-7-3.2025-10. EDN:UFZRLS.

22. Толмачев Д.С. Численное моделирование магнитного динамо во вращающейся электропроводной жидкости с наклонной осью // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV

Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 182-183.

23. Хасаева Т.Т. Решение спектральной задачи генерации магнитного поля во внешних областях галактики с учетом расширения галактического диска // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы докладов IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г., г. Москва). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 182-183.

24. Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А. Условия и механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков // Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции, 20–24 октября 2025 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. С. 26-27. <https://physica.spb.ru/data/uploads/2025/theses2025.pdf>

25. Хохлов А.В. О связи значений MAD и точности определения направления остаточной намагниченности в образце // Всероссийская школа-конференция «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» 01.04.2025.

26. Mikhailov E., Khasaeva T., Frolova M. Magnetic field growth in galactic discs of various thickness // Proceedings of the 14th Serbian Bulgarian Astronomical Conference. 23 – 27 September, 2024, Vrnjačka Banja, Serbia. Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade. No. 107. P. 81-86. DOI:10.69646/14sbac12p.