

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

—

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

—

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук

О Т Ч Е Т

о деятельности Геофизического центра РАН за 2024 год.

Результаты научных исследований

и международных проектов

Москва 2025

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

—

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

—

GEOPHYSICAL CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

R E P O R T
OF THE GEOPHYSICAL CENTER RAS
for 2024
Results of Scientific Research
and International Projects

Moscow 2025



This volume presents information on the scientific activities of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences in 2024. It contains the main results obtained from projects funded by the budget. It also includes the results of scientific research supported by projects of the Russian Science Foundation (RSF). This volume provides an overview of the international activities of the Geophysical Center, including those of the National Geophysical Committee of the Russian Academy of Sciences (NGC RAS). The report also contains a list of publications and information on the intellectual property of the Geophysical Center for the year 2024.

Editors in chief:

A. A. Soloviev, Corr. Member RAS, Dr., Director of GC RAS

R. I. Krasnoperov, Scientific Secretary of GC RAS

Editorial board:

A. D. Gvishiani, Academician RAS, Chief Scientist of GC RAS

E. O. Kedrov, Cand. Sci. (physics and mathematics)

Approved for publishing on 17.10.2025

Layout Production:

E. O. Kedrov

<https://doi.org/10.2205/2025BS059>

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2025), Report of Geophysical Center RAS for 2024. Results of Scientific Research and International Projects, M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 176 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2025 Geophysical Center RAS



В настоящем издании представлены сведения о научной деятельности Геофизического центра Российской академии наук в 2024 г. Описаны основные результаты, полученные в рамках государственного задания по темам научно-исследовательских работ, а также результаты исследований, выполненных по грантам Российского научного фонда (РНФ). Включена информация о международной деятельности Центра, включая работу Национального геофизического комитета Российской академии наук (НГК РАН). Отчет содержит перечень публикаций и результатов интеллектуальной деятельности Геофизического центра за 2024 г.

Ответственные редакторы:

А. А. Соловьёв, чл.-корр. РАН, директор ГЦ РАН

Р. И. Краснопёров, учёный секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

А. Д. Гвишиани, академик РАН, научный руководитель ГЦ РАН

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Утверждено к печати 17.10.2025 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

<https://doi.org/10.2205/2025BS059>

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснопёров (ред.) (2025) Отчет о деятельности Геофизического центра РАН за 2024 год. Результаты научных исследований и международных проектов. М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 176 с.

ISSN: 2308-5983

© ГЦ РАН, 2025

Содержание

Содержание	5
1 Научная деятельность ГЦ РАН	6
2 Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей	28
3 Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства	41
4 Структурирование, визуализация, анализ и распространение геофизических данных.....	63
5 Разработка теоретических основ и экспериментальных методик системного анализа для комплексного изучения геофизических, геодезических и метеорологических данных	94
6 Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях	107
7 Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта	124
8 Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)	134
9 Определение пространственно-временной структуры магнитного поля Земли в окрестностях геомагнитных обсерваторий РФ с применением БПЛА	144
10 Международная деятельность ГЦ РАН в 2024 году	151
11 Деятельность НГК РАН	155
Список основных научных публикаций за 2024 год	157
Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН.....	174



1 Научная деятельность ГЦ РАН

1.1 Государственное задание

Научная деятельность подразделений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) в 2024 г. была сосредоточена на выполнении государственного задания № 075-00443-24-01, утвержденного 5 апреля 2024 г. Исследования проводились в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.). Направление науки: 1.5. Науки о Земле.

Согласно государственному заданию, в ГЦ РАН проводились фундаментальные исследования по 5 темам НИР:

- 1 Тема НИР: «Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей»

Шифр темы: FMWG-2022-0005

Регистрационный номер: 122080300206-4

Структурное подразделение: Лаборатория геодинамики

Руководитель: чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов

- 2 Тема НИР: «Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства»

Шифр темы: FMWG-2022-0006

Регистрационный номер: 122080300204-0

Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований

Руководитель: чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв

- 3 Тема НИР: «Структурирование, визуализация, анализ и распространение геофизических данных»

Шифр темы: FMWG-2022-0007

Регистрационный номер: 122080300191-3

Структурное подразделение: Лаборатория геофизических данных;
Лаборатория электронных публикаций

Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев



- 4 Тема НИР: «Разработка теоретических основ и экспериментальных методик системного анализа для комплексного изучения геофизических, геодезических и метеорологических данных»
Шифр темы: FMWG-2022-0008
Регистрационный номер: 122080300190-6
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Лаборатория геодинамики; Сектор геофизического мониторинга
Руководитель: к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров
- 5 Тема НИР: «Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях» (тема молодежной лаборатории)
Шифр темы: FMWG-2024-0001
Регистрационный номер: 124071200016-6
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и Больших данных Арктики
Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов

1.2 Проекты научных фондов

В 2024 г. в ГЦ РАН выполнялись исследования по 3 грантам Российского научного фонда (РНФ):

- 6 Грант РНФ № 21-77-30010: «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»
Регистрационный номер: 121041200191-6
Руководитель: д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко
<https://rscf.ru/project/21-77-30010/>
- 7 Грант РНФ № 23-17-00176: «Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)»
Регистрационный номер: 123070600012-8
Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов
<https://rscf.ru/project/23-17-00176/>
- 8 Грант РНФ № 24-17-00346: «Определение пространственно-временной структуры магнитного поля Земли в окрестностях геомагнитных обсерваторий РФ с применением БПЛА»
Регистрационный номер: 124071200020-3
Руководитель: чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв
<https://rscf.ru/project/24-17-00346/>



1.3 Важнейшие результаты фундаментальных научных исследований

Модель границы между Североамериканской и Евразийской литосферными плитами

Д.ф.-м.н. М. К. Кабан, академик РАН А. Д. Гвишиани, к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров, к.ф.-м.н. А. Г. Петрунин

(Грант РНФ № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»)

Границы между литосферными плитами могут быть концентрированными вдоль узкой линии, а также представлять широкие диффузные зоны распределённых деформаций. До настоящего времени предполагалось, что граница между Североамериканской и Евразийской литосферными плитами в Сибири является концентрированной, хотя характер распределения деформаций здесь практически не изучен ввиду почти полного отсутствия регулярной сети наблюдений GNSS. В рамках проекта было рассчитано для Сибири и сопредельных областей распределение эффективной мощности упругой литосферы, которая используется как прокси её прочности (рис. 1.1). На основании анализа этой карты и распределения сейсмичности [Gvishiani et al., 2022] было впервые показано, что граница между Североамериканской и Евразийской плитами не является концентрированной, как считалось ранее, а представляет в Сибири широкую диффузную зону распределённых деформаций, которая характеризуется крайне низкими значениями мощности упругой литосферы [Kaban et al., 2024]. Это полностью соответствует распределению землетрясений и фокальным механизмам [Gvishiani et al., 2022]. Основная часть землетрясений сосредоточена на западной и восточной границах этой зоны (восточный склон Верхоянского хребта с одной стороны и восточный склон хребта Черского – с другой). В центре диффузной зоны имеют место только слабые землетрясения с небольшой глубиной.

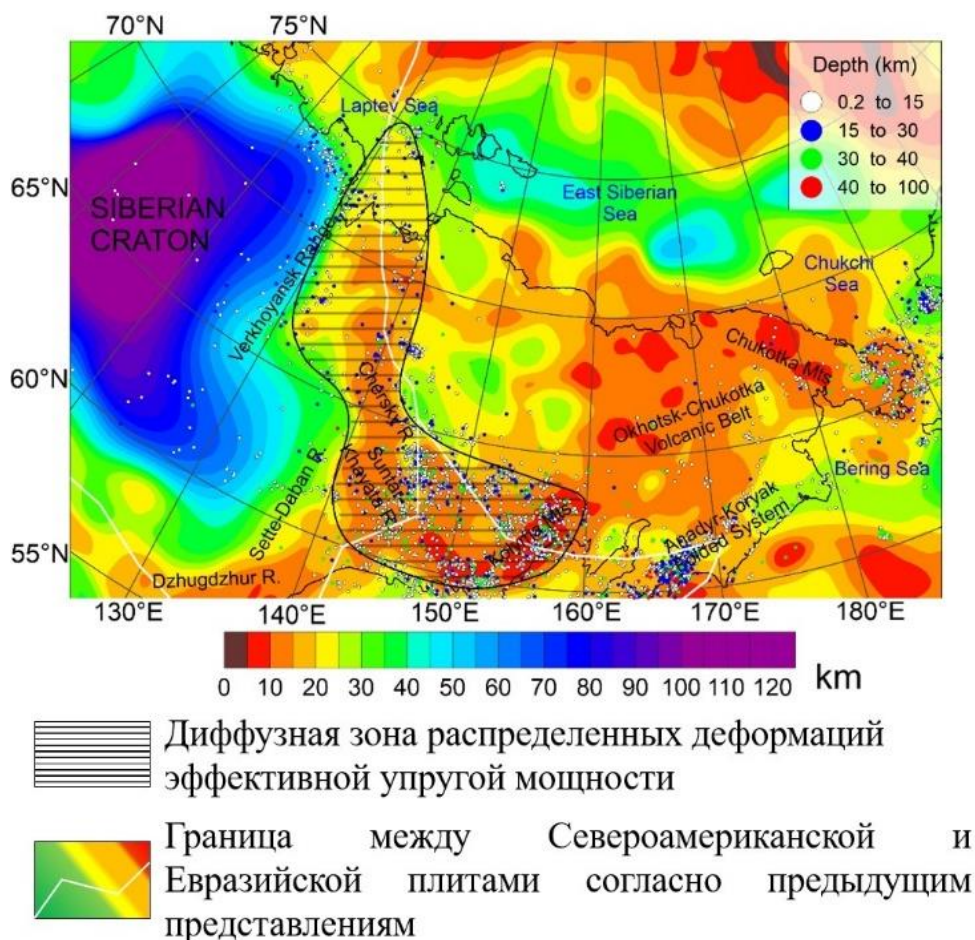


Рисунок 1.1 – Вариации эффективной мощности литосферы и сейсмичность

Kaban M. K., Chen B., Sidorov R. V., Petrulin A. G. Variations of the effective elastic thickness evidence for a wide diffusive boundary between the North American and Eurasian plates in Siberia // Journal of Geodynamics. 2024. Vol. 159. Art. 102015. PP. 1–7. DOI: 10.1016/j.jog.2023.102015.

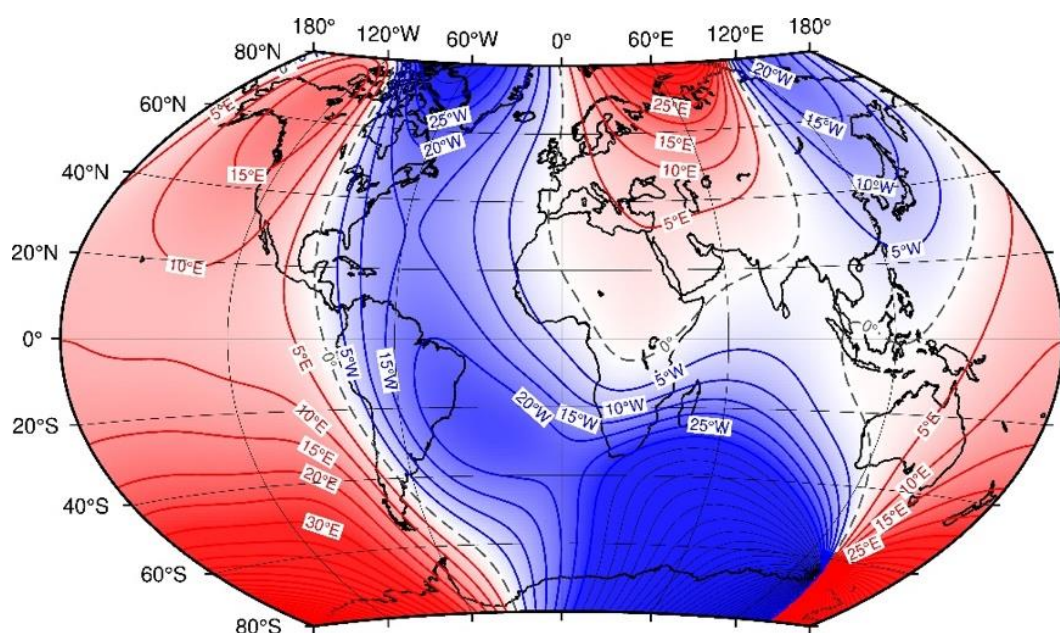
Модель международного геомагнитного аналитического поля 14-го поколения IGRF-14

Чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, к.т.н. Д. В. Кудин, И. А. Фирсов, PhD, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёров, к.ф.-м.н. М. Н. Добровольский, С. В. Пресняков

(Тема НИР «Разработка теоретических основ и экспериментальных методик системного анализа для комплексного изучения геофизических, геодезических и метеорологических данных»)

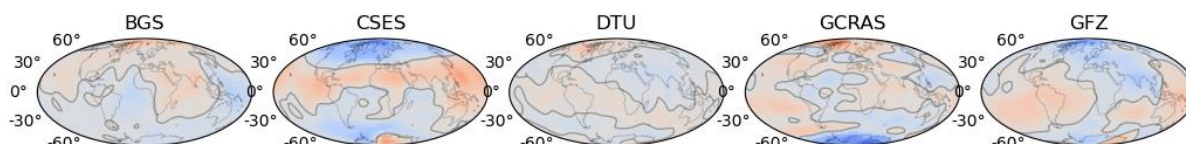
Международное геомагнитное аналитическое поле (IGRF) – это стандартное математическое описание главного магнитного поля Земли. Оно широко используется в исследованиях глубоких недр Земли, коры, ионосферы и магнитосферы. Модель

разработана и поддерживается Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронамики (IAGA). Коэффициенты для 14-го поколения модели IGRF были окончательно рассчитаны целевой группой IAGA в ноябре 2024 года. IGRF – это продукт совместных усилий разработчиков моделей магнитного поля и институтов, занимающихся сбором и распространением данных о магнитном поле, собранных со спутников, обсерваторий и полевых изысканий по всему миру. Финальные коэффициенты получены путем усреднения моделей-кандидатов, представленных 19 исследовательскими командами из научных институтов России, Алжира, Великобритании, Германии, Дании, Испании, Китая, США, Франции и Японии. Модель обновляется каждые пять лет. Единственной командой из России стала группа ученых ГЦ РАН.



а)

Difference in Br between Candidate Median / IGRF 2025 candidates



б)

Рисунок 1.2 – а) Карта склонения магнитного поля D модели IGRF-14 на эпоху 2025.0; б) Диаграмма сравнения моделей-кандидатов IGRF-14

Beggan C., ... Soloviev A., Kudin D., Krasnoperov R., et al. International Association of Geomagnetism and Aeronomy. «IGRF-14». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14218973>.

Высокотехнологичный сервис геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения на основе концепции Больших данных

Академик РАН А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, к.т.н. Д. В. Кудин, д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев, А. А. Груднев, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёков

(Тема НИР «Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях»)

На базе инфраструктуры Аналитического центра геомагнитных данных ГЦ РАН с использованием технологии Больших данных развернут вычислительный кластер, агрегирующий данные наземных и спутниковых наблюдений магнитного поля Земли. Комплекс авторских алгоритмов, работающих на кластере в непрерывном режиме, обеспечивает функционирование сервиса поддержки геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения при добыче углеводородов. В сравнении с традиционными подходами применение технологии Больших данных позволило уменьшить на порядок задержку обработки геомагнитных наблюдений, поступающих в режиме реального времени. Последнее обеспечивает достижение качественно нового уровня точности подземной навигации бурового инструмента, что крайне важно для повышения эффективности извлечения нефтегазового сырья при кустовом бурении в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

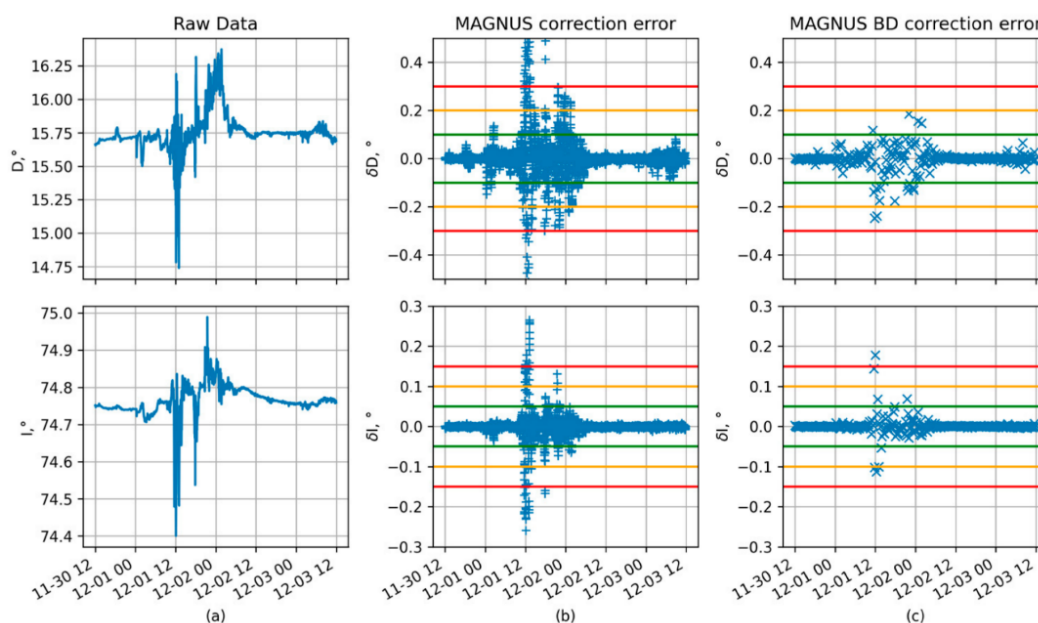


Рисунок 1.3 – Оценка погрешности подземной навигации бурового инструмента:
а) склонение и наклонение полного вектора МПЗ во время магнитной бури;
б) ошибка коррекции с использованием традиционных подходов; в) ошибка коррекции с использованием сервиса на основе технологии БД

Kudin D. V., Gvishiani A. D., Nikitina I. M., Belov I. O., Dzeboev B. A., Grudnev A. A., Dzeranov B. V., Krasnoperov R. I. Storage and Processing of Big Data for Geomagnetic Support of Directional Drilling // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Is. 21. 9730. DOI: 10.3390/app14219730.

Монография «Математическое моделирование напряженно деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений»

Д.т.н. В. Н. Морозов, чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов, А. И. Маневич

(Тема НИР «Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей»)

Подготовлена монография, представляющая результаты многолетних исследований по разработке методологии математического моделирования НДС земной коры в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений с $M > 6$.

Сравнение модельной функции сейсмического момента с данными инструментальных измерений показывает высокий уровень соответствия. Данный подход позволяет получать синтетические сейсмограммы и акселерограммы на стадии предварительной оценки опасности возможного землетрясения.

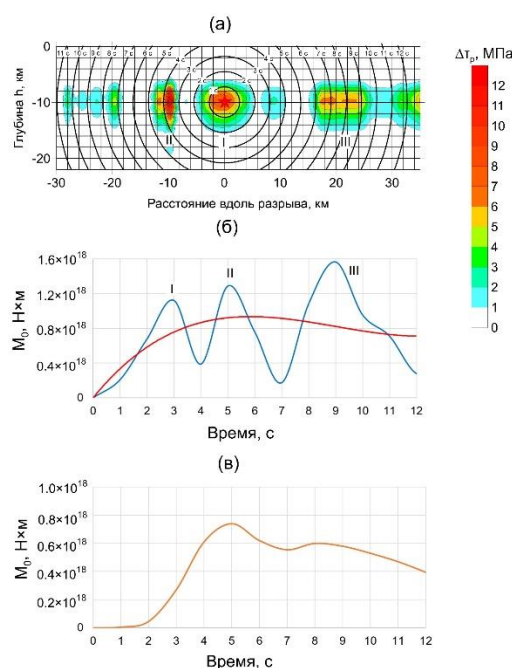


Рисунок 1.4 – Пример иллюстрации из монографии. Сопоставление временной функции сейсмического момента, полученной на основе моделирования и сейсмологических данных

Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Колесников И. Ю., Маневич А. И. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений – М.: РАН, Издательство «Наука», 2024. – 243 с.

**Геоиндуцированные токи, вызванные геомагнитными пульсациями:
Количественное описание и контролирующие параметры**

Д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко, к.ф.-м.н. Н. В. Ягова, к.ф.-м.н. Я. А. Сахаров

(Грант РНФ № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»)

Наиболее опасным для технологических систем проявлением возмущений космической погоды является возбуждение ГИТ в наземных проводниках. На основе системы измерений ГИТ в трансформаторах на Кольском полуострове и сравнения их амплитуд с геомагнитными пульсациями было создано количественное описание ГИТ-эффективности пульсаций во время и вне магнитной бури. Наиболее важным условием возникновения ГИТ-эффективных пульсаций является существование в течение нескольких часов повышенных скоростей солнечного ветра. Показано, что длительное умеренное повышение столь же эффективно, как кратковременное более сильное.

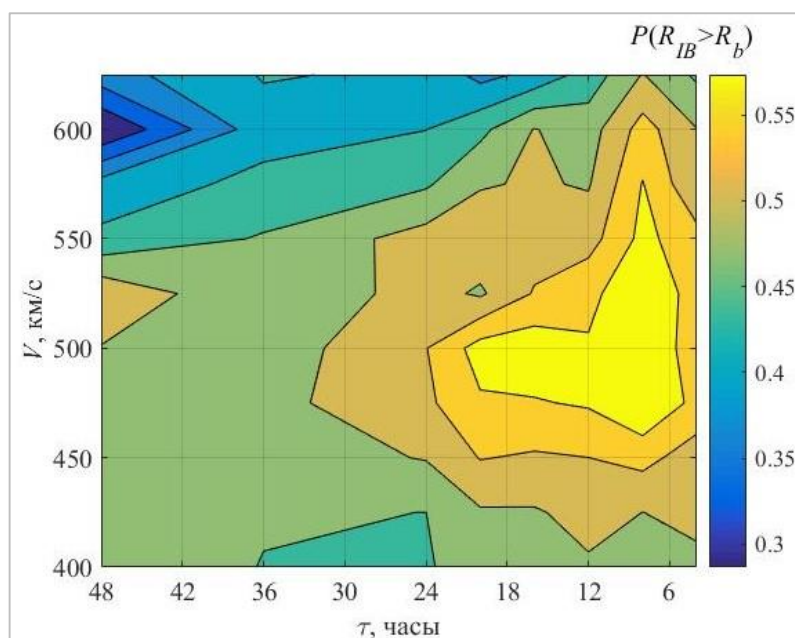


Рисунок 1.5 – Влияние скорости солнечного ветра V на появление ГИТ-эффективных пульсаций. R – отношение амплитуд пульсаций ГИТ и широтной компоненты магнитного поля, τ – время осреднения для V



Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Билин В. А., Селиванов В. Н., Аксенович Т. В., Пилипенко В. А. Параметры, влияющие на эффективность возбуждения геоиндуцированных токов геомагнитными пульсациями Pc5-6/Pi3 вне магнитной бури // Известия РАН. Серия физическая. 2024. Т. 88. С. 340–346. DOI: 10.31857/S0367676524030016

Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Пилипенко В. А., Селиванов В. Н. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10. № 3. С. 146–156. DOI: 10.12737/szf-103202415

Атлас прогноза климатических изменений основных гидрометеорологических параметров центральной и западной части российской Арктики за период 2023–2064 гг.

Академик РАН А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН И. Н. Розенберг, д.ф.-м.н. А. Г. Костяной, д.ф.-м.н. С. А. Лебедев, О. О. Шевалдышева, С. А. Гвоздик, И. А. Дубчак, Ю. И. Николова, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёров, к.т.н. И. М. Никитина

(Грант РНФ № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»)

В атласе рассмотрена территория, включающая в себя центральную и западную части Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в границах 55°–80° с. ш. и 30°–100° в. д. Для построения и анализа прогностических значений климатических параметров использовались результаты экспериментов модели CNRM-CM6-1-HR, входящей в шестую фазу Международного проекта по сопоставлению моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 6). Модель CNRM-CM6-1-HR разработана объединённой командой Национального центра метеорологических исследований (CNRM) и Европейского центра исследований и образования в области научных вычислений (CERFACS). В атлас включены данные по трем сценариям возможного изменения климатических параметров в период с 2022 по 2064 гг. Выбраны три иллюстративных сценария, характеризующие низкий, средний и высокий уровень эмиссии парниковых газов, которые будут достигнуты к 2100 г.: SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5, соответствующие общим социально-экономическим путям развития общества. Атлас состоит из трёх основных разделов: пространственных схем прогностических временных характеристик основных гидрометеорологических параметров (температура воздуха у поверхности, общее

количество осадков, скорость ветра у поверхности, температура почвы, влагосодержание почвы, влажность воздуха и толщина снежного покрова), диаграмм Хофмюллера по семи выбранным веткам железных дорог, и климатических данных по узлам сопряжения железная дорога – река – море. Работы выполнялись в сотрудничестве с АО «НИИАС» ОАО «РЖД».

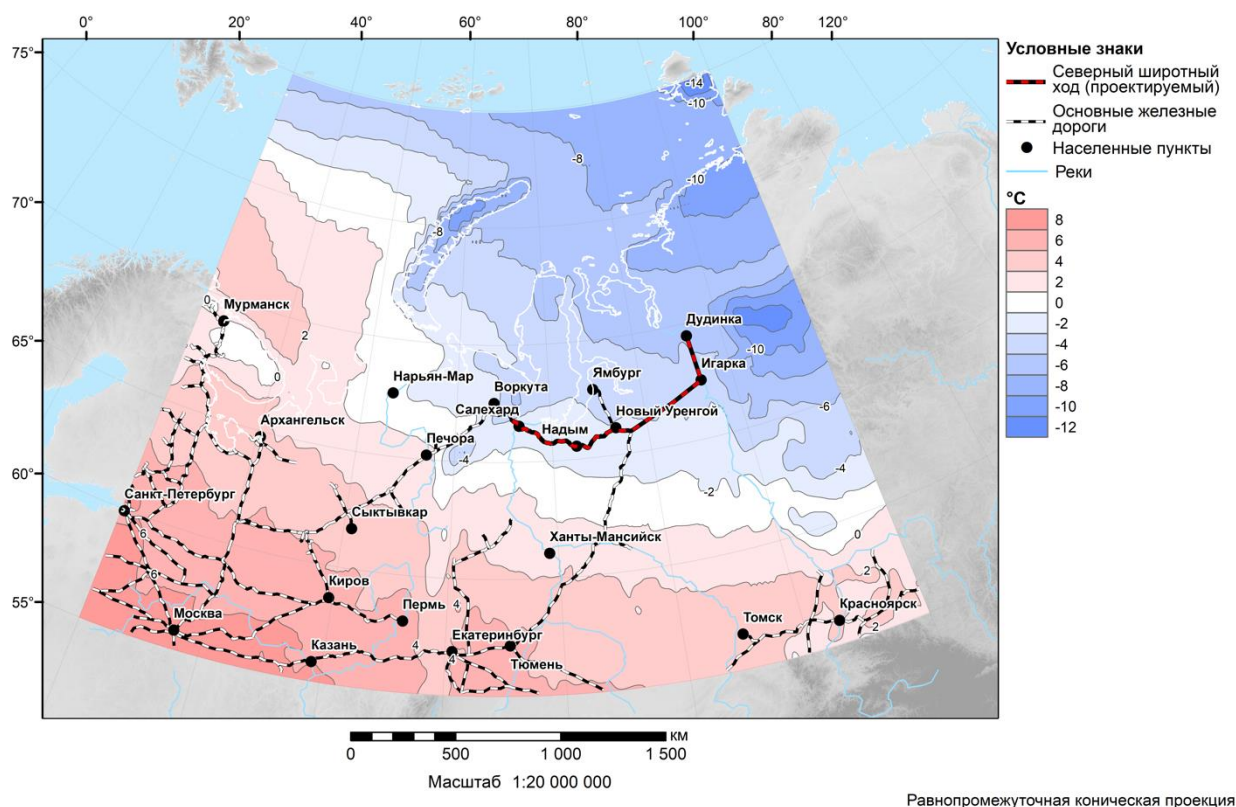


Рисунок 1.6 – Пример карты из атласа со средними прогностическими значениями температуры воздуха у поверхности за период 2023–2064 гг. по сценарию SSP5-8.5

Гвишиани А. Д., Розенберг И. Н., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Шевалдышева О. О., Гвоздик С. А., Дубчак И. А., Николова Ю. И., Краснопёров Р. И., Никитина И. М. Атлас прогноза климатических изменений основных гидрометеорологических параметров центральной и западной части российской Арктики за период 2023–2064 гг. – М.: ГЦ РАН, 2024. – 417 с.

1.4 Награды и премии

В 2024 г. сотрудники ГЦ РАН были удостоены многих высоких государственных и ведомственных наград.

Государственными наградами награждены:

- А. Д. Гвишиани, академик РАН – Орден Почёта
А. А. Соловьёв, чл.-корр. РАН, профессор РАН – Медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени
И. А. Шеремет, академик РАН – Медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» I степени

Юбилейной медалью «300 лет Российской академии наук» награждены:

- | | |
|---|------------------------------|
| А. Д. Гвишиани, академик РАН | И. А. Шеремет, академик РАН |
| А. А. Соловьёв, чл.-корр. РАН,
профессор РАН | С. М. Агаян, д.ф.-м.н. |
| В. Н. Татаринев, чл.-корр. РАН | Б. А. Дзедзиев, д.ф.-м.н. |
| | Р. И. Краснощёков, к.ф.-м.н. |

Ведомственными наградами Минобрнауки России награждены:

- В. И. Кафтан, д.т.н. – Звание «Почетный работник науки и высоких технологий»
С. А. Лебедев, д.ф.-м.н. – Медаль «За безупречный труд и отличие»
О. Б. Семёнова – Благодарность Минобрнауки России
Т. А. Татаринев – Благодарность Минобрнауки России

Почетной грамотой Российской академии наук награждены:

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| Ю. В. Барыкина | А. И. Маневич |
| Ш. Р. Богоутдинов, к.ф.-м.н. | В. Н. Морозов, д.т.н. |
| В. Г. Гетманов, д.т.н. | А. А. Одинцова |
| Э. О. Кедров, к.ф.-м.н. | Н. А. Сергеева, к.ф.-м.н. |
| А. А. Лушников, д.ф.-м.н. | Р. В. Сидоров, к.ф.-м.н. |

Благодарностью Отделения наук о Земле РАН награждены:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Д. Ж. Акматов, к.т.н. | А. А. Королькова |
| А. Е. Асеева | Т. А. Крылова, к.г.-м.н. |
| Е. П. Бойко | А. С. Кудашин, к.и.н. |
| Г. С. Бояринов | Д. В. Кудин, к.т.н. |
| А. А. Груднев | И. М. Никитина, к.т.н. |
| В. П. Дасаева | М. А. Пасишниченко |
| Б. В. Дзеранов, к.г.-м.н. | Е. Ю. Фирсова |
| М. Н. Добровольский, к.ф.-м.н. | Н. А. Фоменко, к.т.н. |
| Л. П. Забаринская | О. О. Шевалдышева |
| В. В. Кабров | Р. В. Шевчук, к.т.н. |



а)

б)

Рисунок 1.7 – Вручение государственных наград сотрудникам ГЦ РАН:

а) Вручение Ордена Почёта научному руководителю ГЦ РАН академику РАН А. Д. Гвишиани. Награду вручает Президент РАН академик РАН Г. Я. Красников. Справа – помощник Президента Российской Федерации А. А. Фурсенко.

б) Вручение медали ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени директору ГЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Соловьёву. Награду вручает вице-президент РАН академик РАН С. М. Алдошин



Рисунок 1.8 – Вручение юбилейной медали «300 лет Российской академии наук».

Верхний ряд: чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, академик РАН А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН В. Н. Татарinov.

Нижний ряд: д.ф.-м.н. С. М. Агаян, д.ф.-м.н. Б. А. Дзедзоев, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёков. Награду вручает член Президиума РАН академик РАН А. О. Глико



**Рисунок 1.9 – Вручение ведомственных наград Минобрнауки России
д.т.н. В. И. Кафгану и д.ф.-м.н. С. А. Лебедеву**



**Рисунок 1.10 – Вручение почетных грамот РАН.
Верхний ряд: Ю. В. Барыкина, к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов, д.т.н. В. Г. Гетманов.
Средний ряд: к.ф.-м.н. Э. О. Кедров, А. И. Маневич, А. А. Одинцова.
Нижний ряд: к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева и к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров.
Грамоты вручает член Президиума РАН академик РАН А. О. Глико**



Рисунок 1.11 – Вручение благодарностей Отделения наук о Земле РАН.
Верхний ряд: к.т.н. Д. Ж. Акматов, Е. П. Бойко, Г. С. Бояршинов,
к.г.-м.н. Б. В. Дзеранов.
Средний ряд: А. А. Королькова, к.т.н. Д. В. Кудин, М. А. Пасишниченко.
Нижний ряд: к.т.н. Н. А. Фоменко, О. О. Шевалдышева, к.т.н. Р. В. Шевчук.
Благодарности вручают заместители академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН чл.-корр.
РАН А. Л. Собисевич и к.г.н. И. Н. Сократова

1.5 Договорная деятельность

В 2024 году договорная деятельность ГЦ РАН включала выполнение обязательств по 14 договорам.

1 Договор на выполнение НИР

Предмет: Прикладные и экспериментальные исследования методов и средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС в части уточнения параметров магнитного поля Земли

Заказчик: АО «ЦНИИмаш» / ГК «Роскосмос»



- 2 Договор на выполнение НИР
Предмет: Проведение ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры в районе строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов
Заказчик: ИБРАЭ РАН, ГК «Росатом»
- 3 Договор на выполнение НИР
Предмет: Анализ климатических изменений на основе атласа основных гидрометеорологических параметров центральной и западной части российской Арктики за период 1980–2021 гг. и прогноз на 2023–2064 гг.
Заказчик: АО «НИИАС» / ОАО «РЖД»
- 4 Договор на выполнение НИР
Предмет: Обоснование методики прогноза оседаний земной поверхности при разработке месторождений калийно-магниевых солей.
Заказчик: Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
- 5 Договор на выполнение НИР
Предмет: Создание магнитной обсерватории на полуострове Ямал (пос. Сабетта) для проведения геомагнитных исследований в арктическом регионе
Заказчик: Компания Schlumberger
- 6 Договор на выполнение НИР
Предмет: Литолого-фациальная интерпретация верхнетюменских отложений
Заказчик: ООО «НК «Югранефтепром» / ПАО «Лукойл»
- 7 Договоры на оказание услуг
Предмет: Проведение оценочно-разведывательных работ в окрестностях Ковыктинского месторождения для определения местоположения магнитной обсерватории для поддержки наклонно-направленного бурения на месторождении
Заказчик: Научно-Технический Центр «ТПМ» / ПАО «Газпром»
- 8 Договор на оказание услуг
Предмет: Организация передачи в реальном времени измерений, получаемых от магнитной обсерватории «Иркутск»
Заказчик: Научно-Технический Центр «ТПМ» / ПАО «Газпром»
- 9 Договор на выполнение НИР
Предмет: Услуги по расчету опорных значений компонентов геомагнитного поля
Заказчик: АО «ИГиРГИ» / ПАО «НК „Роснефть“»



- 10 Договор на выполнение НИР
Предмет: Исследование и анализ параметров магнитного поля Земли по результатам площадной съемки на территории месторождений
Заказчик: АО «ИГиРГИ» / ПАО «НК „Роснефть“»
- 11 Договор на выполнение НИР
Предмет: Расчет референсных значений геомагнитного поля
Заказчик: ООО «Интеллектуальные системы» / ПАО «НК „Роснефть“»
- 12 Лицензионные договоры
Предмет: Разработка авторского программного обеспечения и тематического контента для работы мультимедийного комплекса визуализации данных на сферическом светодиодном экране диаметром 3 метра
Заказчик: Музей Мирового океана, г. Калининград

1.6 Экспедиции и полевые работы

В 2024 г. сотрудники ГЦ РАН приняли участие в целом ряде экспедиций и выезжали на научные полевые работы (рис. 1.10). Среди прочих следует выделить:

- Работа на магнитных обсерваториях «Санкт-Петербург», Ленинградская область (А. Л. Котиков), «Климовская» Архангельская область (В. В. Кабров), «Белое море», Республика Карелия (Н. А. Вершинин), «Арти», Свердловская область (П. Б. Бородин), «Новосибирск», Новосибирская область (Н. Н. Семаков)
- Обсерватория «Михнево», Московская область (январь, октябрь, декабрь)
Участники: А. А. Груднев, В. В. Дьяков, Д. В. Кудин, В. Н. Сергеев, Р. В. Сидоров
Задачи: Работы по модернизации системы отопления павильонов. Регламентные работы
- Калужская область (февраль)
Участники: Д. В. Кудин, Р. В. Сидоров, В. Н. Сергеев, А. А. Груднев, В. В. Дьяков
Задачи: Исследование обсерваторских павильонов для обсерватории на Ковыктинском ГКМ
- Республика Карелия и Ленинградская область (май)
Участники: И. М. Алёшин, Ф. В. Передерин, К. И. Холодков
Задачи: Аэромагнитная съемка



- Обсерватория «Климовская», Архангельская область (май, июнь – июль, октябрь, декабрь)
Участники: А. А. Соловьев, А. А. Груднев, Р. И. Красноперов, Д. В. Кудин, М. А. Пасишниченко, Р. В. Сидоров, Д. В. Габышев, Д. К. Мокров, Р. В. Сидоров, К. И. Холодков, О. О. Шевалдышева, В. М. Щербаков
Задачи: Регламентные работы. Исследование территории обсерватории для определения места строительства нового павильона. Аэромагнитная и наземная геомагнитная съемки
- Обсерватория «Санкт-Петербург», Ленинградская область (июнь, декабрь)
Участники: А. А. Груднев, Р. И. Красноперов, Д. В. Кудин
Задачи: Регламентные работы. Установка векторного магнитометра (вариометра) китайского производства (GM-4)
- Иркутская область (июнь – июль, ноябрь)
Участники: Ф. В. Передерин, Д. С. Сапронов, В. Н. Сергеев, К. И. Холодков, Р. В. Шевчук
Задачи: Определение участков для развертывания магнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ в районе Ковыктинского ГКМ. Контроль строительства павильонов
- Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (июнь, декабрь)
Участники: А. А. Груднев, В. В. Кабров, А. А. Камаев, Д. К. Мокров, Ф. В. Передерин, В. Н. Сергеев, К. И. Холодков
Задачи: Проведение локальной аэромагнитной и наземной геомагнитной съёмки на территории месторождения
- Республика Северная Осетия – Алания (август)
Участники: Д. Ж. Акматов, Б. В. Дзеранов, А. А. Камаев, К. А. Кочубей, И. В. Лосев, А. И. Маневич, М. А. Пасишниченко, Р. В. Шевчук
Задачи: Геодезическая съёмка на геодинамическом полигоне в районе Восточных ветвей Владикавказского разлома в рамках гранта РНФ № 23-17-00176
- Обсерватория «Норильск», Красноярский край (август)
Участники: Д. Н. Габышев, Д. В. Кудин.
Задачи: Установка магнитометра POS-4
- г. Железногорск, Красноярский край (сентябрь)
Участники: А. И. Маневич, Р. В. Шевчук, И. В. Лосев
Задачи: Повторные съёмки на геодинамическом полигоне

- Обсерватория «Борок», Ярославская область (август, сентябрь)

Участники: Д. В. Кудин, Р. В. Сидоров, Ф. В. Передерин, К. И. Холодков, В. М. Щербаков

Задачи: Аэромагнитная съёмка. Всероссийская сверка обсерваторских магнитометров

- Грузия (октябрь)

Участники: А. С. Кудашин, Ю. В. Ростовцева

Задачи: Экспедиция по исследованию циклостратиграфии неогена Восточного Паратетиса



Рисунок 1.12 – Экспедиции ГЦ РАН в 2024 г.

1.7 Научные мероприятия

1.7.1 Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике»

4–7 июня 2024 г. в городе Видное (Московская область) состоялась IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике». В мероприятии приняли участие 40 студентов,



аспирантов и молодых ученых. География участников была обширной: от Мурманска до Иркутска, от Санкт-Петербурга до Петропавловска-Камчатского.

Молодые ученые прослушали лекции об исследованиях в области геофизики, климатологии, океанологии, дистанционного зондирования, геоинформатики и системного анализа, практического освоения ресурсов, природопользования и транспорта. Лекторами выступили крупные ученые и специалисты, представляющие Российскую академию наук, ведущие исследовательские организации и вузы страны: ГЦ РАН, Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Фёдорова (Росгидромет), Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Уфимский университет науки и технологий и другие.

В программу вошли мастер-класс на тему работы с данными и разработки программ, а также деловая игра, в ходе которой участники сняли видеоролики об изучении и освоении Арктики. В ходе экскурсии об экспонатах Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана РАН рассказал его директор, профессор РАН П. Ю. Плечов.

Школы молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» проходят с 2021 г. Организатором выступает Геофизический центр РАН. Серия мероприятий проводится при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта».



Рисунок 1.13 – Логотипы и участники IV Всероссийской школы молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике»

Информация о Школе оперативно размещалась на сайте: <https://school2024.gcras.ru/>. Для эффективного общения со слушателями активно использовался Telegram-канал Школы: <https://t.me/geoarctic>.

1.7.2 Международная конференция «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли»

С 25 по 27 сентября 2024 г. в Суздале проходила Международная конференция «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (далее – Конференция). Мероприятие было посвящено 70-летию ГЦ РАН и 300-летию Российской академии наук. Спонсорами мероприятия выступили Российская академия наук, Министерство науки и высшего образования РФ, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ) и ООО НТЦ «ТПМ».

Конференция проходила три дня и включала пленарное заседание, девять тематических сессий, постерную сессию и выставку научного оборудования и услуг. Общее количество участников и гостей составило почти 200 человек, среди которых – 19 членов РАН. В Суздаль прибыли исследователи из 30 городов Российской Федерации. Почетными гостями стали ученые из Австрии, Индии, Китая и ЮАР. На 11 научных сессиях было сделано более 130 докладов.

Конференция прошла успешно, подтвердив важность постоянного обмена знаниями и опытом среди ученых. Мероприятие привело к установлению новых контактов и связей между различными научными коллективами и организациями. Это событие стало вехой

интеграции Российской академии наук и реального сектора экономики в свете дальнейшего развития научно-технического потенциала страны. Эта связь включает в себя сотрудничество между научными учреждениями и промышленными предприятиями, направленное на внедрение передовых научных исследований и разработок в производственную практику. Полученные знания будут способствовать дальнейшему развитию наук о Земле. По итогам Конференции в 2025 г. опубликован специальный выпуск журнала «Russian Journal of Earth Sciences».

Подробная информация о Конференции размещена на сайте: <https://suzdal2024.gcras.ru/>.



Рисунок 1.14 – Открытие Международной конференции «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли». Слева направо: учёный секретарь программного комитета к.т.н. Н. А. Фоменко, член программного комитета академик РАН А. О. Глико, сопредседатели программного комитета чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв и академик РАН А. Д. Гвишиани

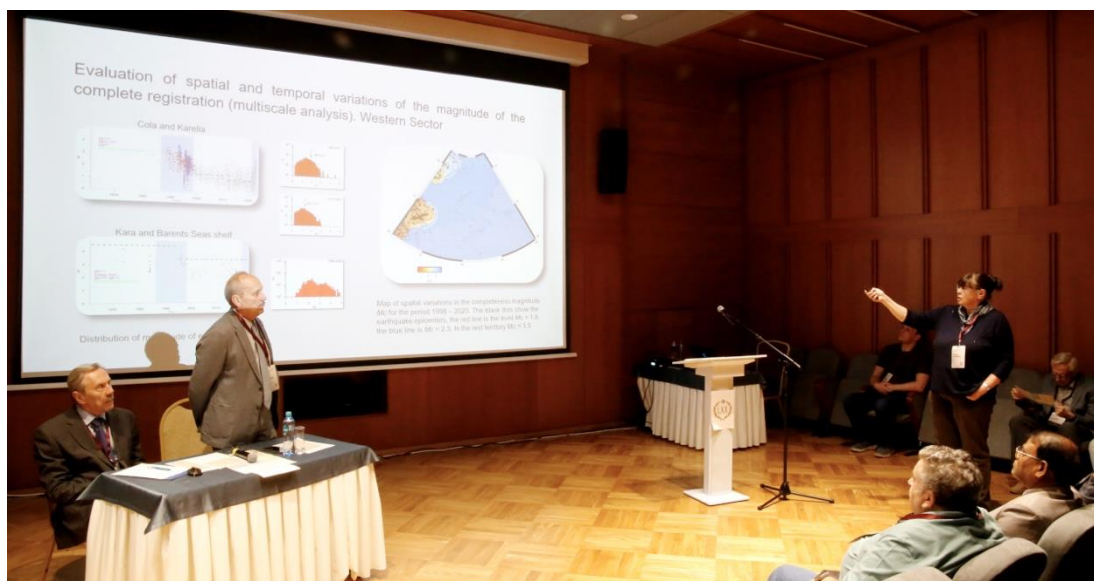


Рисунок 1.15 – Секционное заседание. Доклад к.ф.-м.н. И. А. Воробьёвой



Рисунок 1.16 – Постерная сессия. Беседуют проф. Дайа Шанкер (Индия) и к.ф.-м.н. Д. Н. Габышев (Россия)

1.8 Популяризация науки

В 2024 г. сотрудники ГЦ РАН также вели активную работу в сфере популяризации и широкого распространения научного знания в СМИ. ГЦ РАН принял участие в работе Международной выставке-форуме «Россия», проходившей в г. Москве на ВДНХ с 4 ноября 2023 г. по 8 июля 2024 г.



Рисунок 1.17 – Освещение деятельности ГЦ РАН в СМИ



2 Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей

Шифр темы: FMWG-2022-0005

Регистрационный №: 122080300206-4

Руководитель: зав. лабораторией чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов

2.1 Прогнозирование сильных сейсмических событий на основе системного анализа данных ГНСС-наблюдений, результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния и каталогов сейсмических событий в сейсмически активных районах

В 2024 г. были продолжены исследования, направленные на изучение фундаментальных закономерностей деформаций земной поверхности в сейсмически опасных районах. Особый научный интерес представляет собой явление, названное нами *«дефицит внутренних смещений»* земной коры. Были изучены закономерности современных движений земной коры (СДЗК) в окрестностях Авачинского вулкана (п-ов Камчатка) по временным рядам с 2015 по 2023 гг. В настоящее время на территории г. Петропавловск-Камчатский и юго-западного склона Авачинского вулкана функционирует сеть ГНСС-наблюдений из 11 пунктов. Методика обработки приведена в отчетах за 2022–2023 гг. Вычислялись и анализировались т. н. «внутренние» смещения земной поверхности. Эволюция дилатации земной коры в 2017–2023 гг. представлена в виде последовательности кадров на рис. 2.1. Совокупность кадров дилатации и деформации полного сдвига (рис. 2.2,а) указывает на двухгодичную цикличность современных движений с постоянным нарастанием.

Рисунок (рис. 2.2,б) демонстрирует сброс накопленных сейсмотектонических напряжений в этой части участка, о чем свидетельствует скачкообразное смещение экстремума дефицита смещений на север. Такая картина типична для многих других изученных сильных сейсмических событий.

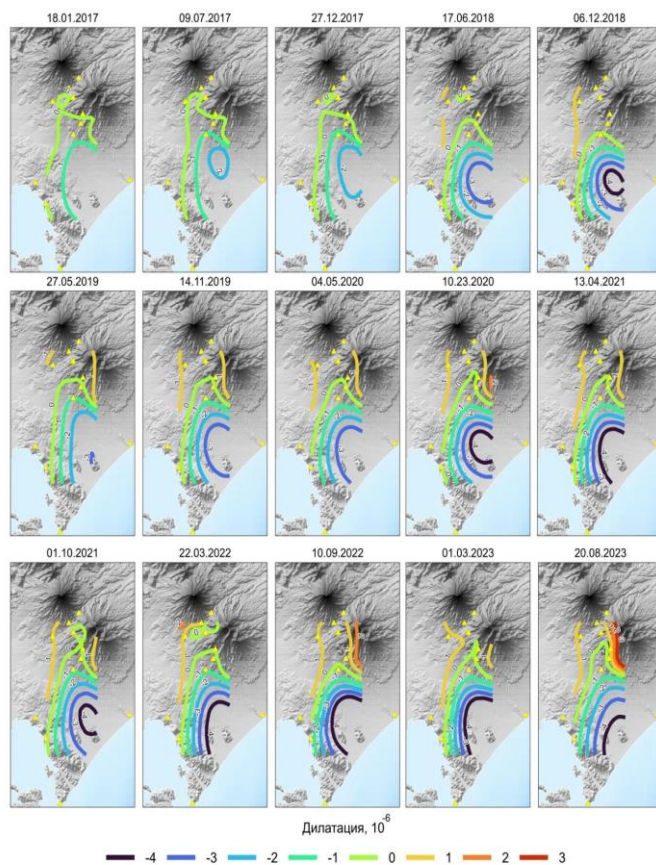


Рисунок 2.1 – Изменения дилатации с 2017 по 2023 гг. Точность определения $\sim 10^{-7}$

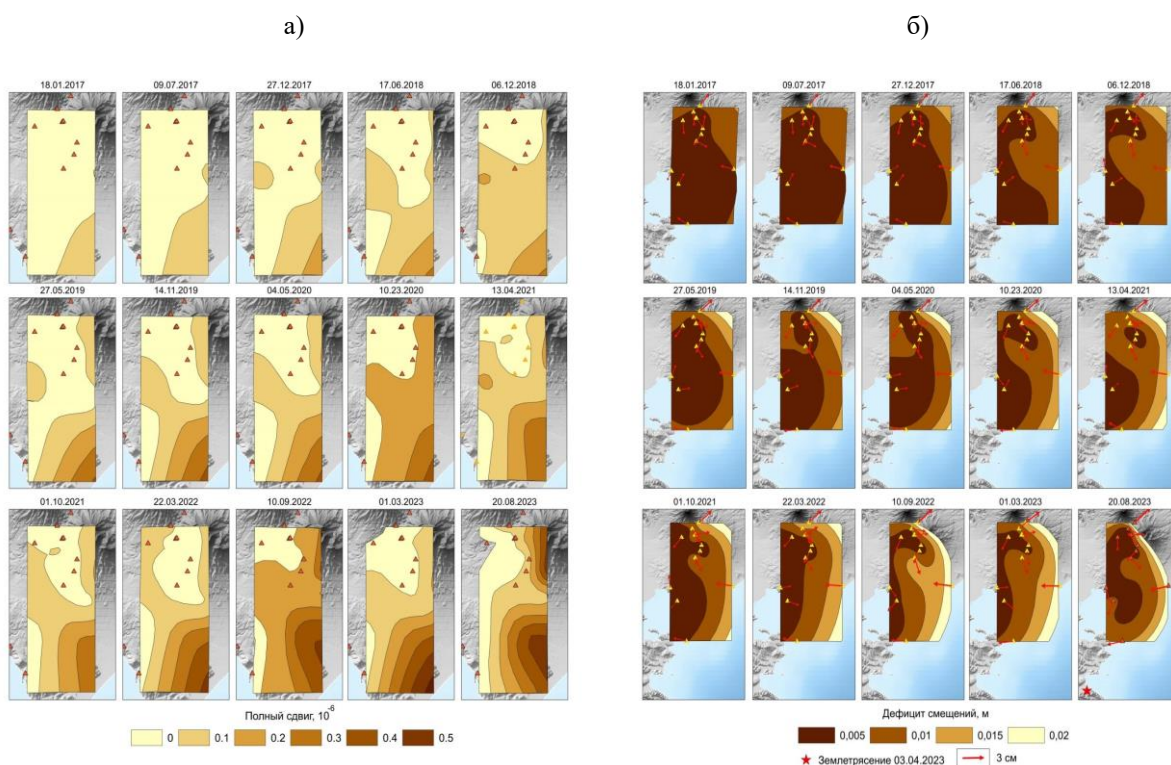


Рисунок 2.2 – Изменения накопленной деформации полного сдвига (а) и накопленного дефицита смещений с 2017 по 2023 гг.

2.2 Численное моделирование НДС эпицентральной зоны землетрясения Акетао 25.11.2016 $M_w 6.6$ (Китай)

В 2024 г. были продолжены работы по численному моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) в районах сильных коровых землетрясений. Идея моделирования основана на том, что сейсмогенный разрыв зарождается в области высокой интенсивности напряжений σ_i и определенного соотношения главных напряжений. Это условие выполняется, когда изобара $\sigma_i > 30$ МПа входит в область отношения главных напряжений $\sigma_1/\sigma_3 = \alpha > 3 \div 4$. Разрыв распространяется в направлении максимального градиента накопленной упругой потенциальной энергии $|\text{grad}(U_{\max})|$. Связь между протяженностью разрыва, его площадью и параметрами землетрясений (сейсмическим моментом M_0 , магнитудой M_w , энергией сейсмических волн E_s) позволяет априорно определять эти параметры, исходя из результатов моделирования НДС в рамках ретроспективного прогноза.

25 октября 2016 г. в провинции Акетао (Китай) произошло сильное землетрясение с M 6.6 (рис. 2.3.а). Эпицентр землетрясения с координатами 39.273 с.ш., 73.978 в.д. находился недалеко от разлома Мудзи. Глубина гипоцентра ~ 10 км. 26 октября 2016 г. последовал сильный афтершок с M 5 к юго-востоку от эпицентра, а в последующие 5 дней зарегистрировано еще около 386 афтершоков с магнитудами $M < 5$.

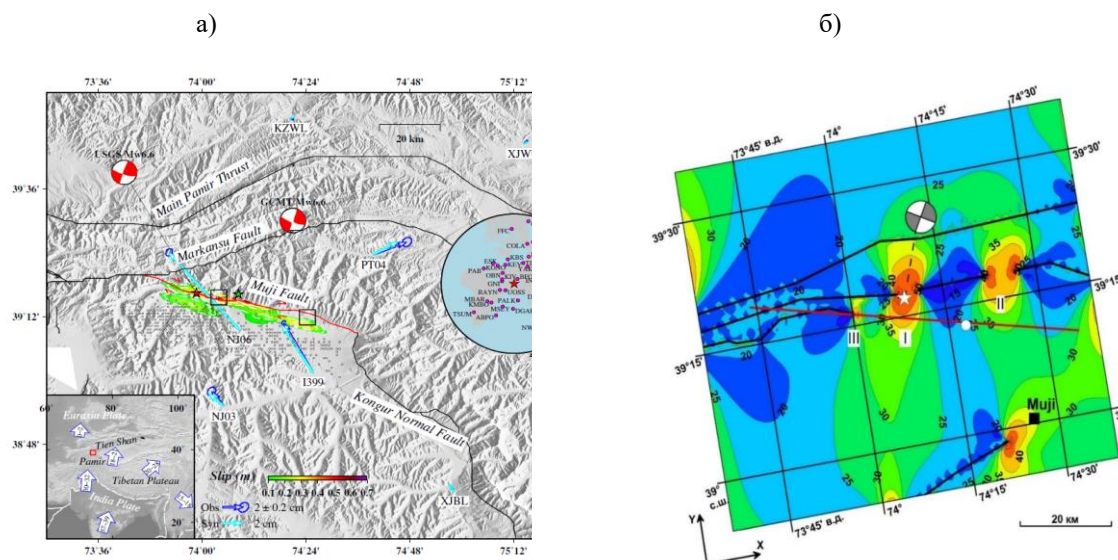


Рисунок 2.3 – Тектоническая позиция землетрясения Акетао (а). Черные линии обозначают региональные разломы; красная линия – разрыв; белые стрелки – косейсмические смещения. Карта интенсивности напряжений σ_i до землетрясения (б)

На рисунке 1.10 представлена карта интенсивности напряжений до землетрясения. Выделяются две значительные зоны высокой интенсивности напряжений, достигающих

65 МПа в центральной зоне I и 50–60 МПа в зоне II, расположенной восточнее зоны I на расстоянии ~ 15 км. На рис. 2.4 приведены карты отношения между главными напряжениями α и интенсивности напряжений σ_i после землетрясения.

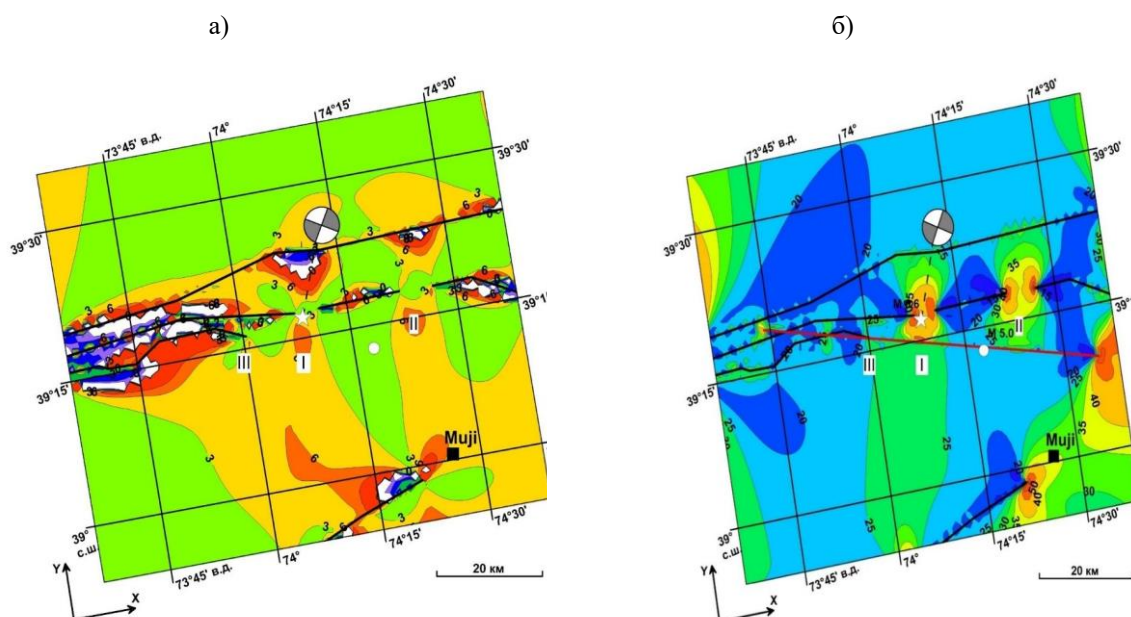


Рисунок 2.4 – Карты отношения главных напряжений $\alpha = \sigma_H/\sigma_h$ до землетрясения (а) и интенсивности напряжений σ_i после землетрясения (б)

Полагая, что плотность гипоцентров афтершоков в сейсмогенерирующем слое пропорциональна плотности упругой потенциальной энергии тектонических напряжений, накопленных до момента землетрясения, представим интенсивность напряжений по глубине как функцию нормального распределения гипоцентров афтершоков. Принимая значения $a = 12$ км и $b = 7$ км, получаем функцию «свертки» интенсивности напряжений в зависимости от глубины в виде:

$$\Phi(h) = \frac{1}{7\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-12)^2}{2 \times 7^2}} \quad (1)$$

Интенсивность напряжений как функцию глубины представим в виде:

$$\sigma_i(h) = \Phi(h) \times \sigma_i. \quad (2)$$

По сейсмологическим данным на рис. 2.5 приведена карта сброшенной интенсивности напряжений

$$\Delta\sigma_i = \sigma_0 - \sigma_p. \quad (3)$$

где σ_0 – интенсивность напряжений в произвольной точке до момента землетрясения, МПа; σ_p – интенсивность напряжений после момента землетрясения, МПа.

Для модели круговой сейсмической дислокации величину сейсмического момента можно представить в следующем виде:

$$M_o = \mu S \underline{D} = \frac{16}{7} \times \underline{\Delta\tau_p} \times a^3 = \frac{16 \times \underline{\Delta\tau_p}}{7 \times \pi^{\frac{3}{2}}} \times S^{\frac{3}{2}} \approx 0.41 \times \underline{\Delta\tau_p} \times S^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

где $\underline{\Delta\tau_p}$ – среднее сброшенное напряжение сдвига (в среднем, принимаемое равным 6–10 МПа) для внутриплитовых (континентальных) землетрясений, Па; a – радиус дислокации, м; S – площадь разрыва, м².

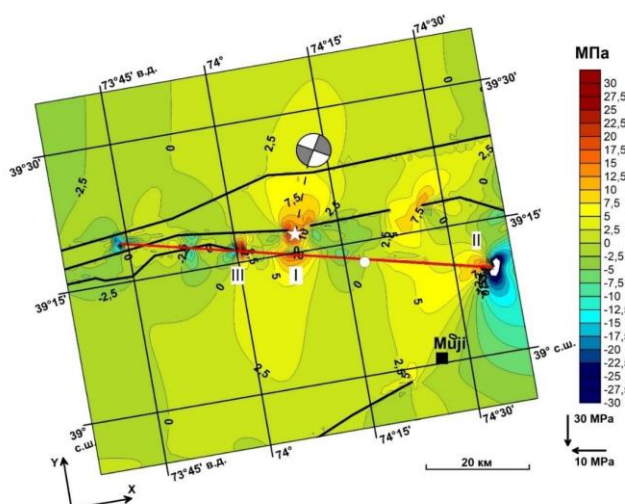


Рисунок 2.5 – Карта разности интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i$ до и после землетрясения

Исходя из результатов моделирования, сейсмический момент можно представить в виде совокупности сейсмических моментов ячеек:

$$M_o \approx 0.41 \sum_{i=1}^n \sigma_i \underline{\Delta\tau_p} \times S^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где $\underline{\Delta\tau_p}$ – среднее сброшенное напряжение сдвига в ячейке, Па; S – площадь ячейки, совокупность которых равна площади разрыва, м².

Далее полагая, что известно положение гипоцентра при наиболее вероятной глубине в пределах 8÷12 км (как это показано выше), и радиальном распространении разрыва из его «фокуса» со скоростью 2.8 км/с, можно получить временную функцию сейсмического момента $M_o(t)$. Посекундное суммирование сейсмических моментов окон в интервале площадей между радиусами определяется выражением (как это показано на рис. 2.6):

$$\Delta R(t_i) = (R_{n-1} - R_n). \quad (6)$$

Временная функция сейсмического момента имеет два экстремума в начале графика, соответствующих интервалам максимальной энергии сейсмических волн. В работе отмечено двойное ударное воздействие при землетрясении Акетао, которое можно было бы

увидеть в рамках моделирования распространения разрыва в период сейсмического процесса. На рисунке 6, в представлена функция временного сейсмического момента $M_o(t)$, полученная на основе сейсмологических данных. Видна относительная близость этих моделей по абсолютным значениям. Однако при этом общая морфология графика моделей не совпадает, главное различие заключается в отсутствии на рисунке аномальной зоны в интервале 1–2 секунды.

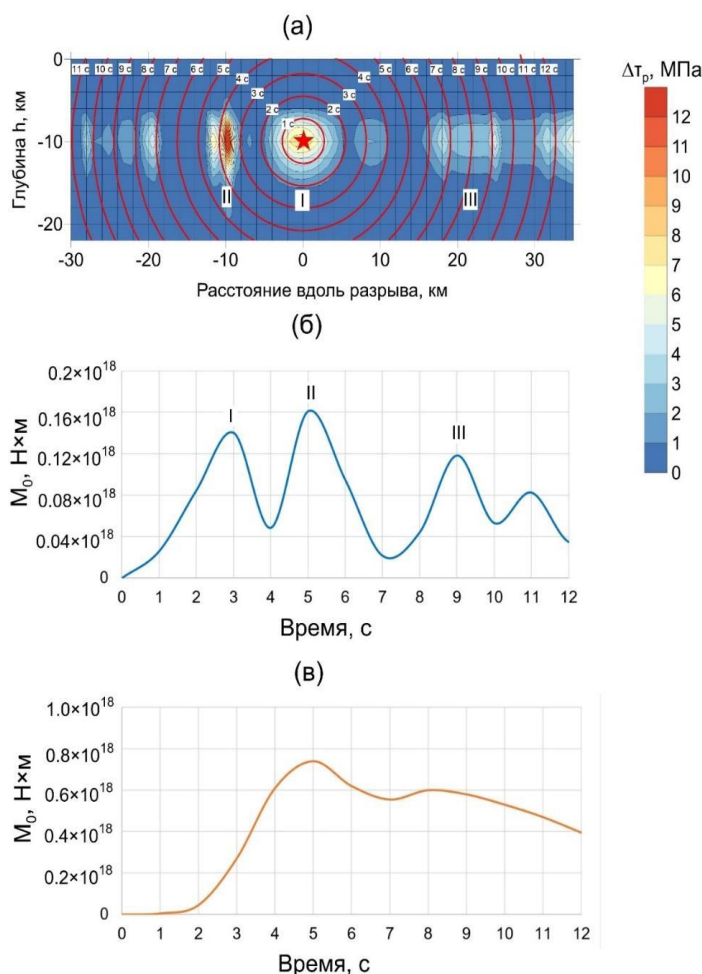


Рисунок 2.6 – Результаты моделирования сейсмического момента. (а) – сброшенные напряжения $\Delta\tau_p$, модель ячеек 2×2 км и распространение разрыва со скоростью 2.8 км/с; (б) – функция временного сейсмического момента $M_o(t)$, полученная на основе результатов моделирования НДС; (в) – функция временного сейсмического момента $M_o(t)$, полученная на основе сейсмологических данных

В табл. 1 приведено сопоставление некоторых инструментальных и модельных оценок в сравнении с сейсмическим моментом, полученным на основе моделирования НДС. Вычислить сейсмический момент на основе модели (рис. 2.6) можно как площадь под графиком путем интегрирования, в этом случае сейсмический момент составляет $M_o = 0.1 \times 10^{19}$ Н·м.



Таблица 1 – Сравнение величины сейсмического момента землетрясения Акетао

№	Сейсмический момент M_0 , $H \times M$	Время, с	Модель решения	Источник	Моментная магнитуда M_w в источнике	Моментная магнитуда M_w по формуле <i>Kanamori</i>
1	0.8746×10^{19}	20	Тензор момента W-фазы	USGS ¹	6.56	6.60
2	1.09×10^{19}	–	Телесейсмические объемные волны	CENC, <i>Ma et al.</i> , 2018	6.6	6.66
3	1.13×10^{19}	–	Телесейсмические объемные волны	GCMT ²	6.6	6.67
4	1.3×10^{19}	25	Телесейсмические объемные волны	<i>Li et al.</i> , 2018	6.7	6.71
5	0.53×10^{19}	12	Телесейсмические объемные волны	<i>Li et al.</i> , 2018	6.4	6.45
6	1.58×10^{19}	–	Геодезический сейсмический момент по данным InSAR	<i>Wang et al.</i> , 2017	6.74	6.77
7	1.31×10^{19}	–	Геодезический сейсмический момент по данным InSAR	<i>Ma et al.</i> , 2018	6.68	6.71
8	1.96×10^{19}	–	Среднее напряжение $\Delta\tau_p = 5$ МПа	–	–	6.82
9	0.1×10^{19}	12	Площадь под графиком временной функции сейсмического момента	–	–	5.97

Дополнительно, принимая среднее сброшенное напряжение сдвига $\Delta\tau_p = 5$ МПа, длину разрыва 45 км, ширину разрыва 10 км, сейсмический момент составляет:

$$M_0 = 0.41 \times \Delta\tau_p \times S^{\frac{3}{2}} = 0.41 \times 5 \times 10^6 \times (45000 \times 10000)^{\frac{3}{2}}, \quad (7)$$

$$M_0 \approx 1.96 \times 10^{19} \text{ Н} \times \text{м}$$

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10007ca5/moment-tensor>

² <https://www.globalcmt.org/>, event name: 201611251424A

Для сравнения моментных магнитуд в таблице приводятся данные их значений из источников и пересчитанные по формуле:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_o) - 10.7, \quad (8)$$

где M_o – сейсмический момент ($\text{Н} \times \text{м}$) $\times 10^7$.

Из табл. 1 видно, что сейсмический момент землетрясения оценивается в различных моделях с существенным разбросом. Значения сейсмических моментов для них составляют 0.1×10^{19} и 0.53×10^{19} $\text{Н} \times \text{м}$ соответственно в пределах 12-ти с интервала. Сейсмический момент, полученный по модели «усредненного» напряжения, наиболее близок по абсолютным значениям к моделям геодезического сейсмического момента, полученным в работах: 1.96×10^{19} , 1.58×10^{19} , 1.31×10^{19} $\text{Н} \times \text{м}$, соответственно.

«Точное» соответствие сейсмического момента, полученного на основе моделирования НДС любой из моделей, приведенных в табл. 1, может быть получено варьированием входных параметров временной функции сейсмического момента: трассой и геометрией сейсмического разрыва, принятым временем реализации сейсмического момента, граничными условиями моделирования НДС, параметрами функции свёртки, абсолютными величинами сброшенных напряжений. Описанный подход дает возможность получить временную функцию сейсмического момента, основываясь на решении прямой задачи – определения выделившейся энергии землетрясения на основе исходного поля напряжений эпицентральной зоны. В этом отношении функция $M_o(t)$ имеет под собой ясную и интерпретируемую физическую основу и может быть использована в практических приложениях детерминистской оценки сейсмической опасности.

2.3 Многовариантное трёхмерное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива на участке «Енисейский» Нижнеканского массива

На основе разработанной в 2023 г. структурно-тектонической модели участка Енисейский в 2024 г. было выполнено моделирование НДС с целью последующего построения цифровой геомеханической модели. При строительстве ПИЛ на её основе планируется решение следующих важных практических задач:

а) выявление потенциальных (ослабленных, нарушенных или сильнонапряженных) зон массива, способных в длительной перспективе стать каналами инфильтрации подземных вод к РАО;

- б) расчёт НДС и устойчивости массива, вмещающего выработки ПИЛ;
- в) планирование и контроль проведения геомеханических экспериментов в ПИЛ;
- г) использование модели в качестве интерактивной базы данных о состоянии породного массива.

В модели были приняты следующие граничные условия:

1. Трехмерная структурно-тектоническая модель участка была разбита на 33 расчетно-геологических элемента (рис. 2.7). Каждый элемент был охарактеризован усреднёнными физико-механическими свойствами. В модель также заложены данные, полученные по результатам анализа геолого-геофизических характеристик, включая схемы разломной тектоники, результаты геофизических и ГНСС-наблюдений, физико-механические свойства пород, результаты изучения трещиноватости пород.

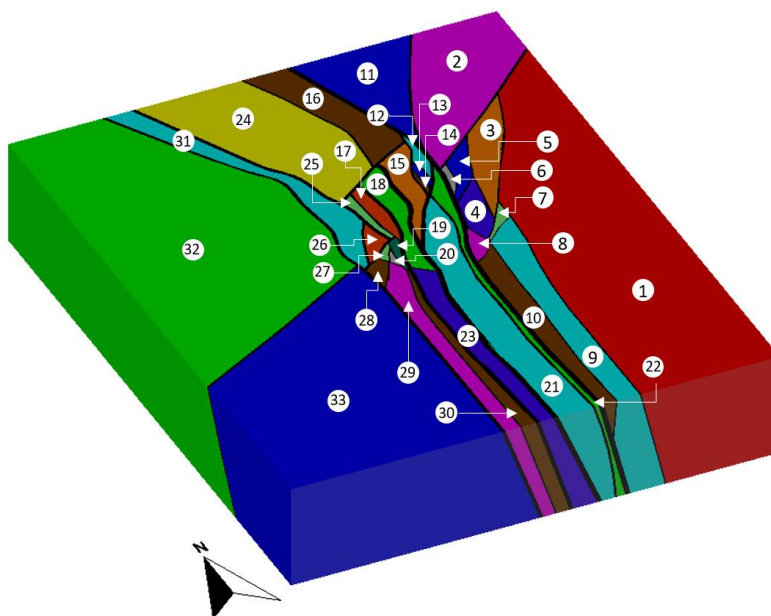


Рисунок 2.7 – Модель расчётно-геологических элементов участка Енисейский

2. Построенная каркасная модель представляет собой объем массива в виде призмы, внутри которой планируется проходка горных выработок ПИЛ. Ее размеры были приняты в плане $\sim 3 \times 2$ км и ~ 1 км по вертикали (рис. 2.8). Модель была разбита на четырехугольные конечные элементы (КЭ). При разбиении минимальный размер КЭ задавался равным 6 м на наиболее важных участках – зонах сочленения разрывных нарушений, изгибах и т. д. Остальные размеры КЭ последовательно увеличивались к границам модели, где её структура становится более однородной. Всего в каркасной модели содержится ~ 125 тыс. КЭ.

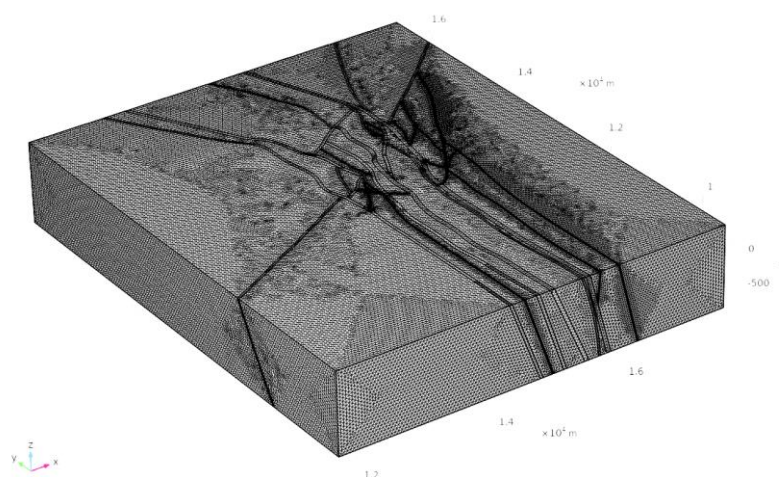


Рисунок 2.8 – Разбиение каркасной модели на КЭ (*COMSOL Multiphysics*)

3. Внешние усилия ввиду неоднозначности и неопределённости как направления действия главных напряжений, так и их абсолютных величин были заданы для 4-х вариантов.

На рис. 2.9 приведены схемы граничных условий для 4-х расчетных вариантов.

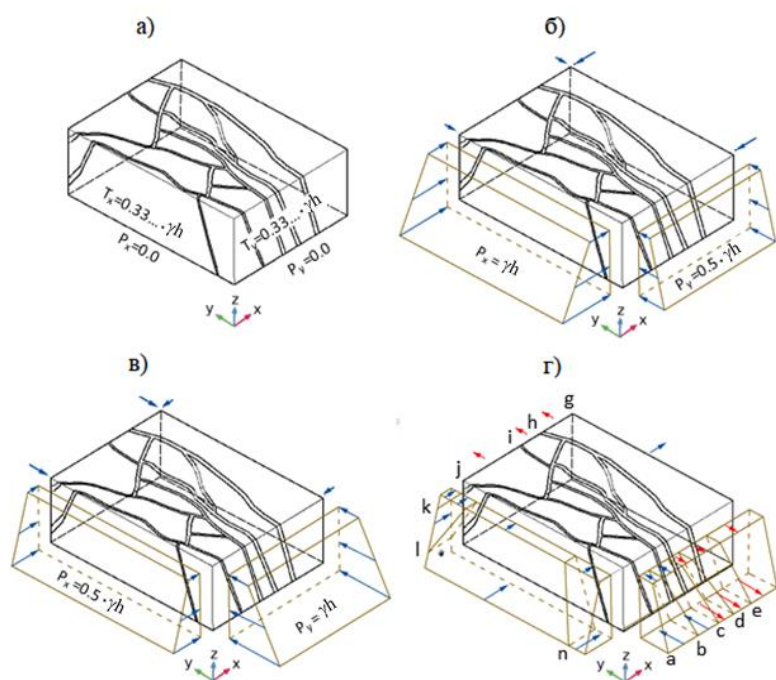


Рисунок 2.9 – Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов: а) – только гравитационное давление γH ; б) – на основе геологических данных $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) – пессимистичный прогноз $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) – дифференцированные усилия по ГНСС-измерениям

4. Условия закрепления модели. Внизу – «Roller», реализующий указанные условия в *COMSOL Multiphysics*. Верхняя плоскость модели остается свободной от закреплений

и нагрузок. Напряжения бокового отпора задавались по вертикальным границам модели, гравитационная составляющая задавалась как площадная нагрузка каждого элемента модели, нарастающая с глубиной. *Вариационное моделирование* было выполнено в программе *Comsol Multiphysic 5.6*, визуализация и статистический анализ результатов – в ГГИС *Micromine*.

На рис. 2.10 показано распределение интенсивности напряжения σ_i для четырёх вариантов. Зоны концентрации напряжений показаны красным цветом. Фоновые напряжения σ_i варьируются от 12 до 14 МПа. Для указанной глубины – это фактически значение гравитационного давления γH при объемной плотности пород 2.8-2.9 т/м³ без учета тектонической составляющей. Все, что выше этих значений σ_i , можно отнести к аномальным зонам.

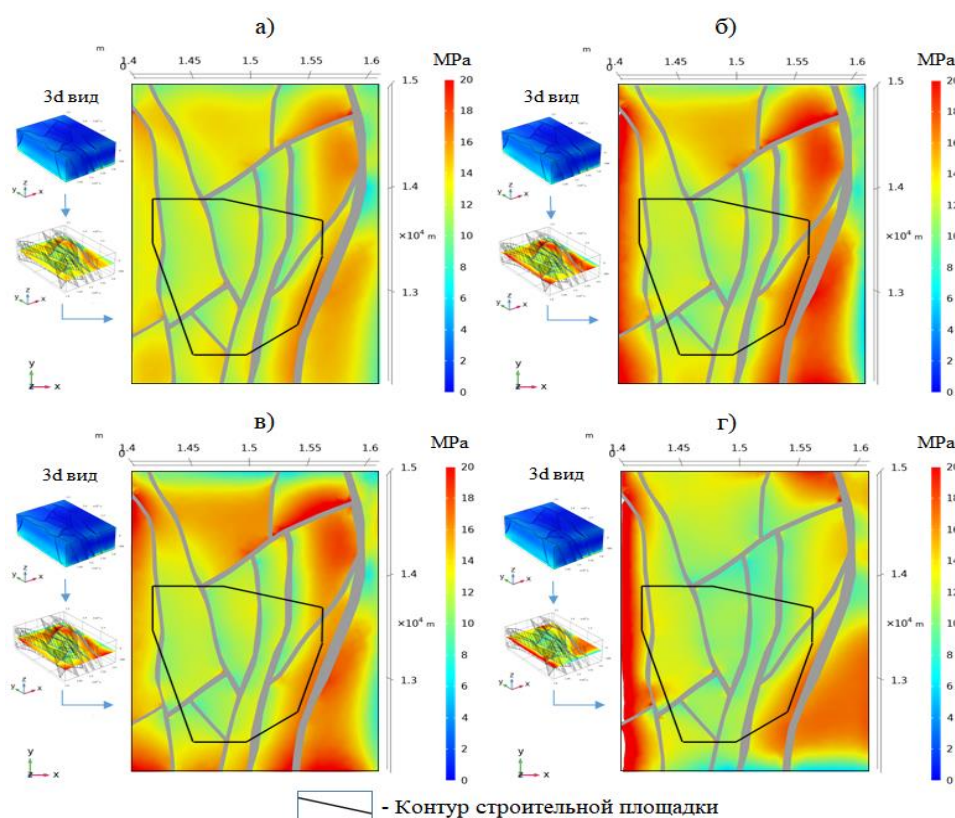


Рисунок 2.10 – Распределение σ_i для указанных выше вариантов

Второй важный параметр – это отношение σ_{yy}/σ_{xx} . Как было показано выше, чем больше это соотношение, тем больше градиент напряжений и вероятность разрушения пород. На рис. 2.11 показано распределение отношения напряжений σ_{yy}/σ_{xx} на глубине 500 м для четырёх вариантов граничных условий. В пределах строительной площадки ПИЛ отношения действующих напряжений находятся в диапазоне от 0,5 до 2, что в целом соответствует стабильным условиям.

На рисунке 2.7 приведены примеры расчетов распределения интенсивности напряжений σ_i в зависимости от глубины на поперечных разрезах участка запад-восток, а на рисунке 2.8 - для продольных разрезов север-юг.

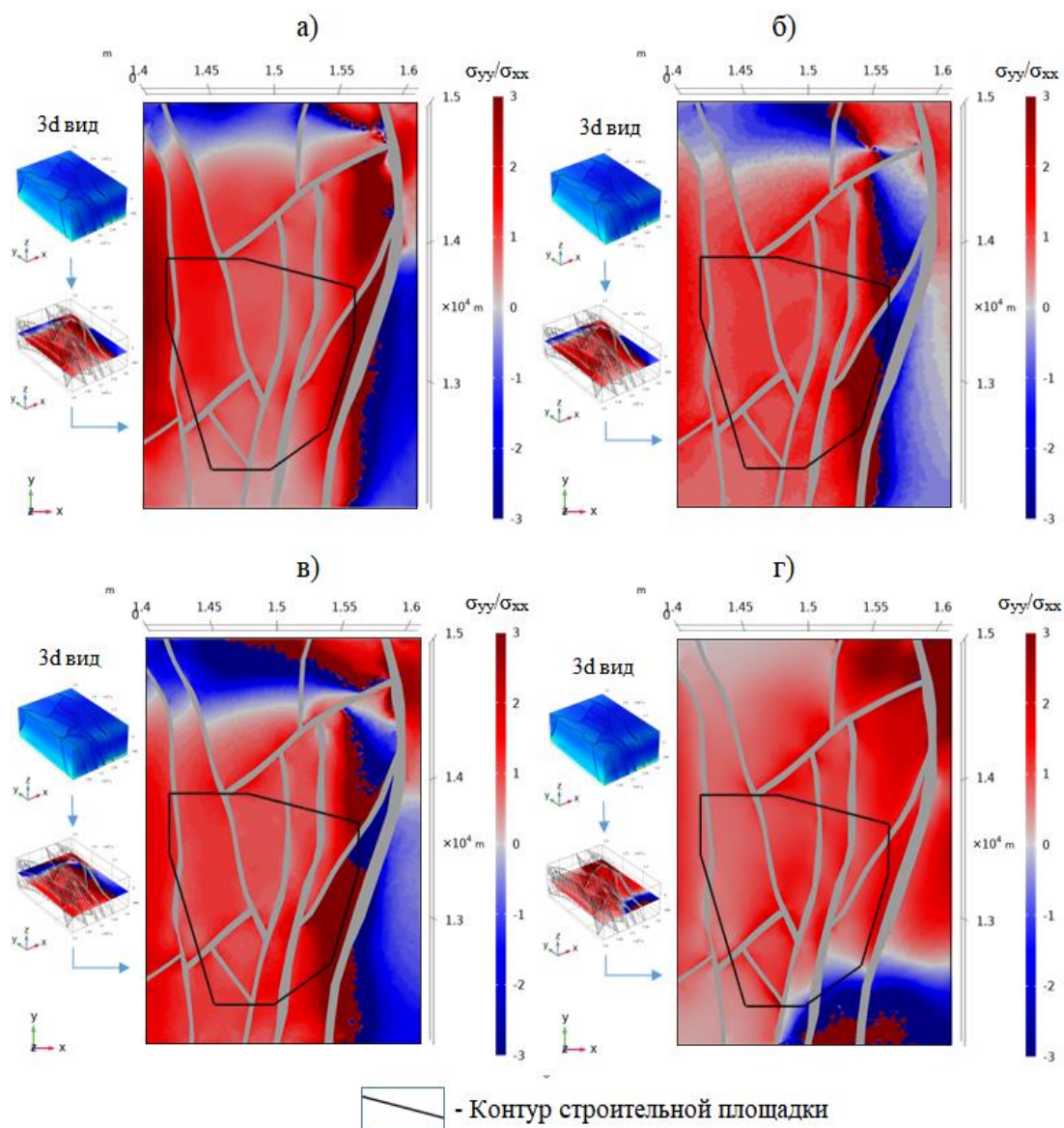


Рисунок 2.11 – Распределение отношения действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} для вариантов: а) – только гравитационное давление; б) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) по результатам ГНСС-измерений

Полученные результаты были проанализированы с использованием известных критериев разрушения горных пород Хука-Брауна и коэффициента FR . На рис. 2.12 показано распределение напряжений по критерию Хука-Брауна. Все варианты демонстрируют относительно большой запас прочности, максимальные значения (18.6 МПа) наблюдаются в северо-восточной части Верхнешумихинского разлома и северной части Безымянного разлома. Рис. 2.12 показывает максимальные значения сжатия (20 МПа) в западной части строительной площадки ПИЛ. Также относительно



небольшие значения напряжений сжатия (18.9 МПа) проявляются в восточной части рядом с Верхнешумихинским разломом.

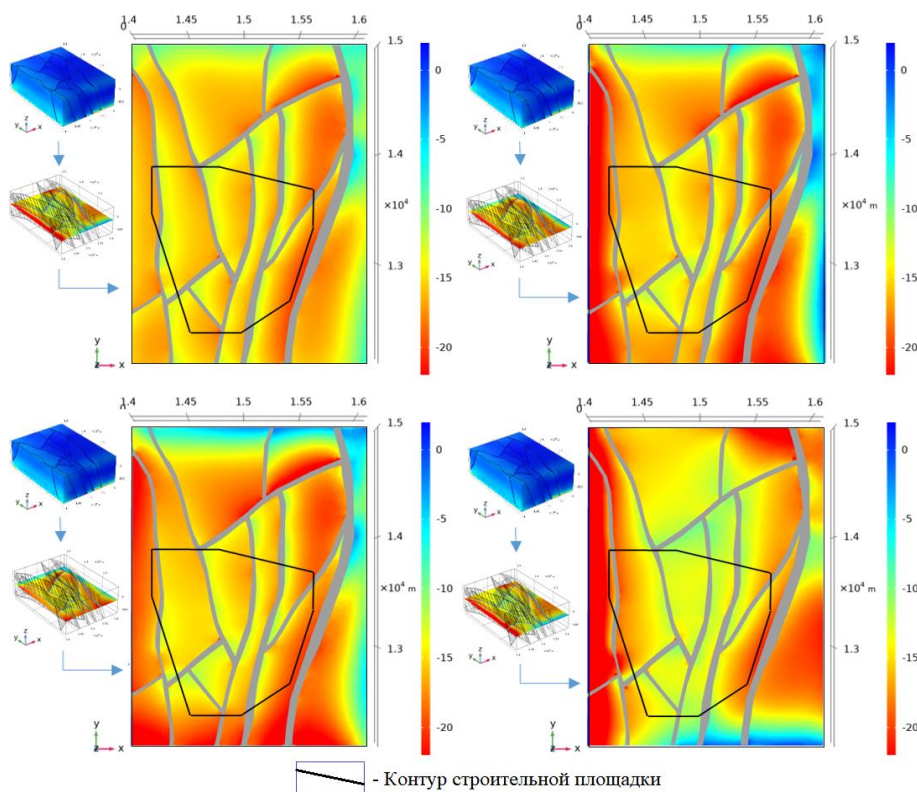


Рисунок 2.12 – Распределение напряжений по критериям Хука-Брауна для 4-х вариантов

В 2024 г. также были продолжены полевые наблюдения с использованием средств ГНСС на геодинамическом полигоне Нижнеканского массива, и начаты исследования по новому направлению – применению геоморфологических методов для выявления направлений действия главных напряжений на новейшем этапе тектонического развития Земли.

3 Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства

Шифр темы: FMWG-2022-0006

Регистрационный №: 122080300204-0

Руководитель: чл.-корр. РАН директор А. А. Соловьёв.

3.1 Изучение эффектов космической погоды по данным геомагнитного мониторинга

Подготовлен подробный обзор современных представлений о физической природе волновых вариаций геомагнитного поля в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне – от долей мГц до первых Гц. Шумы и колебания УНЧ диапазона отражают турбулентный характер взаимодействия плазмы солнечного ветра с земной магнитосферой. Возбуждение некоторых типов УНЧ волн являются проявлением резонансного взаимодействия волн и частиц в околоземной плазме. Физика УНЧ волн опирается на теоретический аппарат физики плазмы и магнитной гидродинамики, а экспериментальной базой исследований являются данные наблюдений на спутниках и наземных станциях. Приведены морфологические характеристики основных типов геомагнитных пульсаций, а затем рассмотрены физические механизмы их генерации и возможная роль в протекании плазменных процессов в околоземной среде. Геомагнитные УНЧ волны оказываются не только одним из основных средств диагностики околоземного пространства, но и активным фактором воздействия как на околоземную среду, так и на наземные и спутниковые технологические системы.

Особое внимание обращено на то, что, хотя космическая погода активизирует глобальные электромагнитные и плазменные процессы в околоземной среде, однако наибольший риск ГИТ связан не непосредственно с крупномасштабными процессами с огромным выделением энергии, а с более локальными и быстрыми процессами. Оказалось, что электрические сети наиболее чувствительны к помехам от естественных геоэлектрических полей, которые вызываются геомагнитными пульсациями $Pi3/Ps6$ с периодами порядка первых мин – десятков мин. Именно они вызывают наиболее интенсивные всплески ГИТ с размахом до сотен А в ЛЭП и способствуют возникновению ГИТ в протяженных инженерных системах, таких как железные дороги и трубопроводы. В качестве примера, на рис. 3.1 приведено сопоставление ГИТ в ЛЭП на Кольском полуострове с магнитными вариациями на близкой магнитной станции во время магнитной

бури 27–28 мая 2017 г. Видно, что возбуждение всплесков ГИТ вызвано воздействием РіЗ пульсаций, наложенных на магнитную бухту, во время развития магнитной бури.

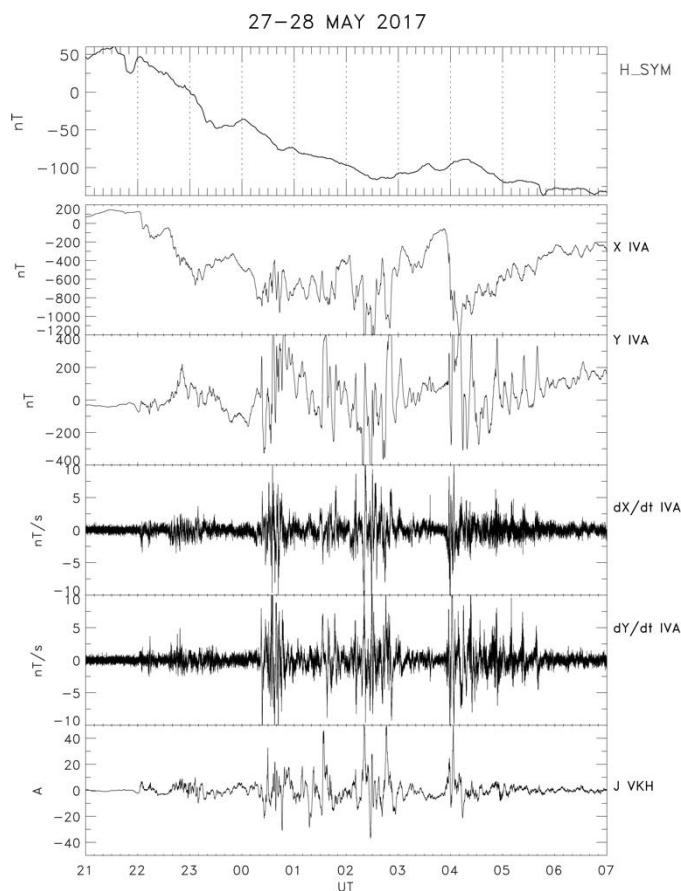


Рисунок 3.1 – Возбуждение ГИТ в ЛЭП «Северный Транзит» геомагнитными пульсациями РіЗ. Сверху вниз показаны вариации индекса SYM-H, магнитограммы горизонтальных компонент и dX/dt и dY/dt на близкой станции IVA и вариации ГИТ на подстанции «Выходной»

3.2 Оценивание параметров нестационарных геофизических сигналов на примере геомагнитных пульсаций Рс1.

Геофизические сигналы (геомагнитные пульсации, сейсмические волны, волновые процессы в атмосфере и др.) в ряде случаев обладают выраженной нестационарностью. Рассматриваемые геомагнитные пульсации представляют собой квазипериодические колебания, характеризуются нестационарными параметрами, занимают диапазоны частот от тысячных долей до нескольких Гц и амплитуд от сотых долей до сотен нТл. Пульсации возникают из-за резонансного взаимодействия магнитосферной плазмы и геомагнитного поля. Оценки нестационарных параметров геомагнитных пульсаций используются для диагностики магнитосферы, могут применяться для определения частот и амплитуд сигналов «серпентинной эмиссии», для нахождения параметров альфвеновских сигналов и т. д. Наиболее применяемым методом анализа сигналов является дискретное

преобразование Фурье (ДПФ), которое плохо приспособлено для нестационарных сигналов из-за его ограниченной разрешающей способности. Достаточно распространённый спектрально-временной анализ с применением преобразования Вигнера имеет погрешности в оценках параметров примерно такого же уровня, что и погрешности ДПФ. При реализации указанных методов может теряться важная информация о свойствах и характеристиках сигналов.

Нами была разработана технология оценивания параметрических функций геомагнитных пульсаций. Использована двухэтапная аппроксимация с локальными аппроксимационными моделями на первом этапе и взвешенными усреднениями на втором. Предложенная технология альтернативна к ДПФ ввиду более точной подгонки используемых аппроксимационных моделей, оказывается в значительной степени универсальной и пригодной для нестационарных сигналов многих вариантов предметных областей. Рассмотрен пример оценивания амплитудных, частотных и трендовых параметрических функций (частотной дисперсии и скорости нарастания/убывания амплитуды со временем) для геомагнитных пульсаций Pc1 (рис. 3.2–3.4).

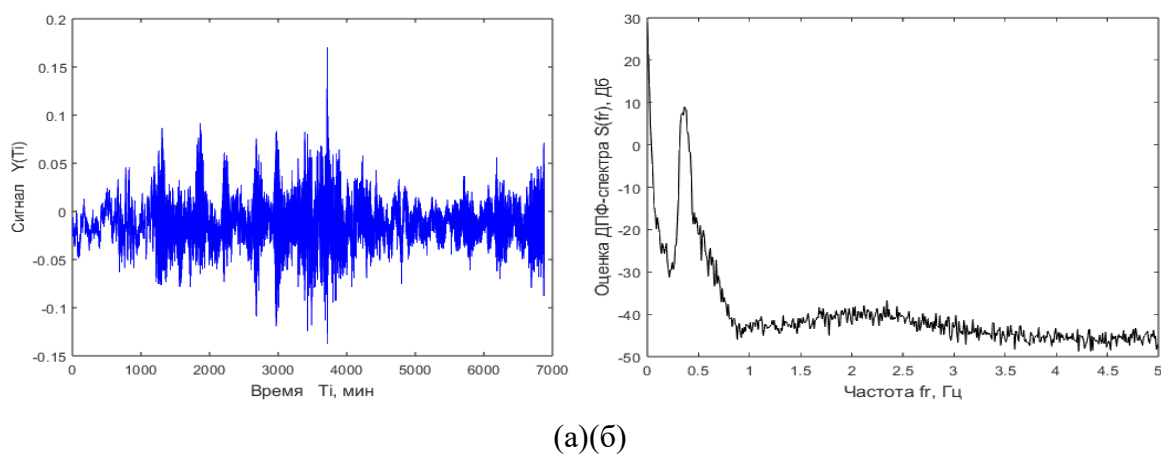
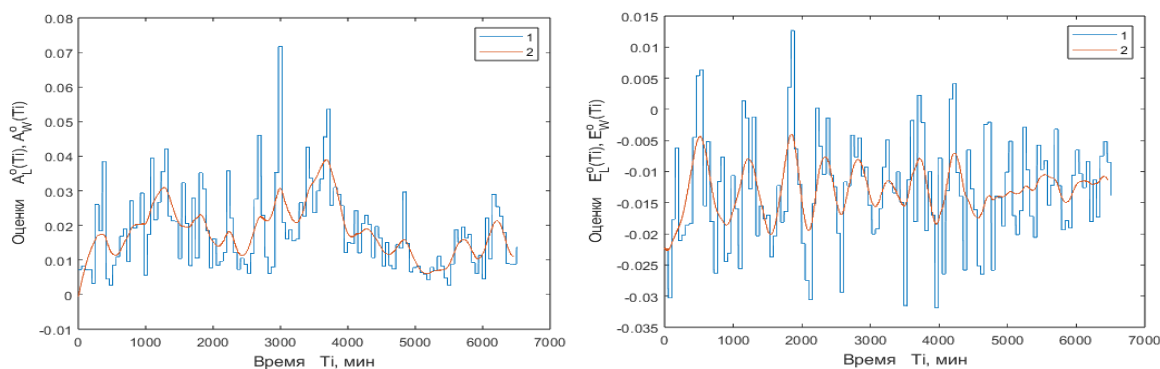
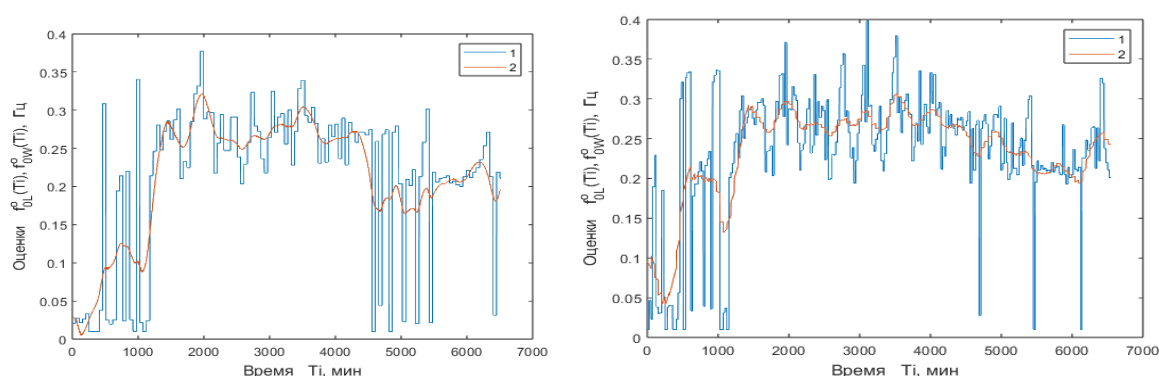


Рисунок 3.2 – Экспериментальный сигнал $Y(Ti)$ с пульсациями Pc1 (а), ДПФ-спектр $S(f_k)$ для $Y(Ti)$, средняя частота $\bar{f}_0 \approx 0.3$ Гц (б)



(а)(б)

Рисунок 3.3 – Оценки амплитуды для 1-ого и 2-ого аппроксимационных этапов (а), оценки тренда для 1-ого и 2-ого аппроксимационных этапов (б)



(а)(б)

Рисунок 3.4 – Оценки частотной функции для 1-ого и 2-ого аппроксимационных этапов, $N = 512$, $N_0 = N * 8$, $N_d = N_0 / 32$ (а), оценки частотной функции для 1-ого и 2-ого аппроксимационных этапов, $N = 512 / 2$, $N_0 = N * 16$, $N_d = N_0 / 8$ (б)

3.3 Разработка и апробация методики верификации аналитической модели Sq-поля по данным полевых наблюдений

Дифференциация источников наблюдаемых в ионосфере явлений является предметом множества современных исследований. В рамках выполненных работ была исследована модель неполярной ионосферы Dedicated Ionospheric Field Inversion (DIFI) [Chulliat et al., 2016], позволяющая рассчитывать вариации магнитного поля на земной поверхности в средних широтах. Временные вариации представлены рядами Фурье с периодами 24 ч, 12 ч, 8 ч и 6 ч, модулированными годовой и полугодовой периодичностью. В целях верификации модели был выполнен комплекс измерений на широте 60° с. ш, включающий абсолютные наблюдения на деклинометре при поддержке непрерывной записи векторного магнитометра ПОС-4. На каждой точке выполнялось

4 серии наблюдений с получением абсолютных значений склонения и наклонения. В ходе наземной части экспедиции были проведены измерения в 6 точках на каждой локации.

Использование модели DIFI-7 совместно с записью векторного магнитометра ПОС-4 дало возможность оценить и учесть ионосферное поле при расчете полных значений вектора МПЗ на определенную дату. Границы применимости модели ограничиваются средними широтами, так как в авроральной зоне ионосферное поле формируется другими процессами. На рис. 3.5 приведены графики вариаций компонент горизонтальной интенсивности H и склонения D по модельным данным и по данным выполненных наблюдений. Вариации H используются для сравнительной оценки вклада ионосферного поля, а также для локализации источников внешних возмущений за пределами ионосферы.

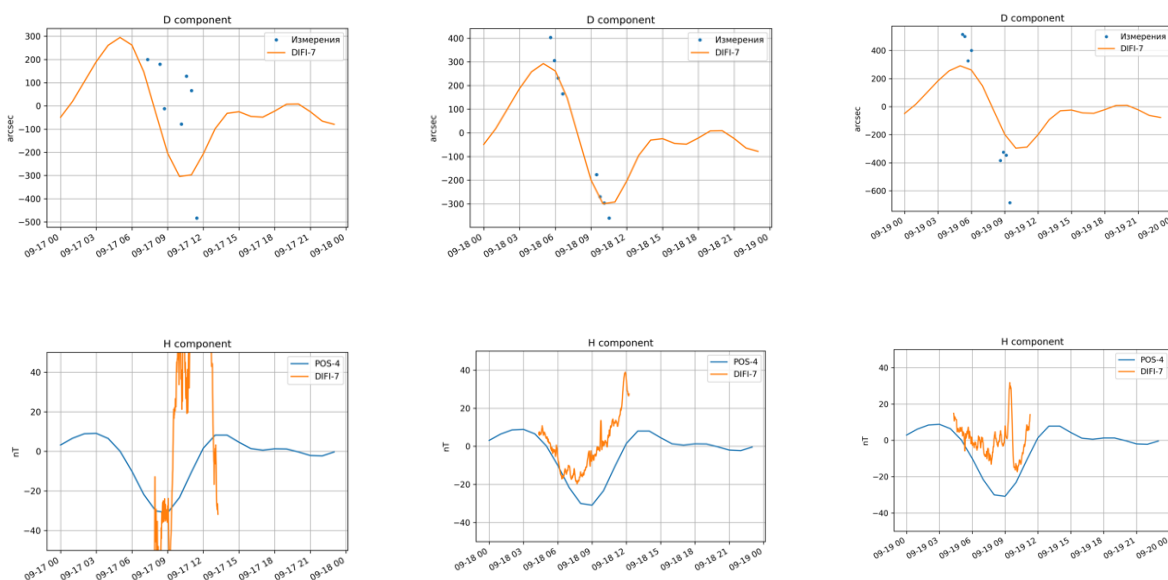
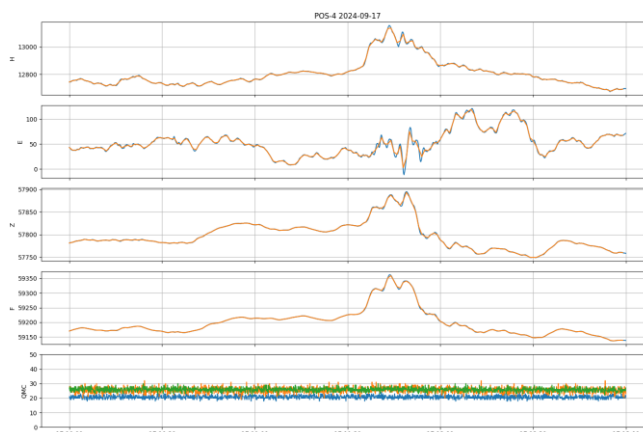


Рисунок 3.5 – Графики вариаций склонения D (сверху) и горизонтальной компоненты H (снизу) по восточному участку (синий цвет) в сравнении с вариациями, полученными по модели DIFI-7 (оранжевый цвет)

Как видно из Рис. 3.5, вариации измерений на восточном участке за 18–19 сентября в достаточной степени соответствуют модели DIFI-7 как по морфологии, так и по абсолютным значениям. 17 сентября наблюдается существенное возмущение, приводящее к искажению наблюдений. При этом, если первая серия наблюдений, выполненная в период до 9 UTC, ещё может быть скорректирована и принята для финального анализа и сравнения с моделью общего поля, то вторая серия выпала на период увеличения потока протонов от Солнца. Этот факт подтверждается записью векторного магнитометра ПОС-4 (рис. 3.6), в которой наблюдается аномальное искажение записи с пиком в районе 11:45 UTC.



На основании этого точка 3 восточного участка была исключена из дальнейшего сравнительного анализа.



Р

и

у

д

о

к

з

6

-

з

а

п

и

с

б

Проведенный сравнительный анализ показал, что использование модели DIFI позволяет повысить точность полевых наблюдений магнитного склонения путем коррекции значений. Наблюдения показывают, что разброс может достигать ± 300 угловых секунд на широтах около 60° с. ш. При этом важно отметить, что коррекция может быть должным образом применена только при локализации интервалов спокойного поля с помощью непрерывной регистрации вариаций компонент векторным магнитометром вблизи точек наблюдений. Кроме того, проведенные работы позволили верифицировать модель по непрерывным записям векторного магнитометра ПОС-4 и определить границы применимости модели.

3.4 Экспериментальное исследование сейсмогенного электромагнитного отклика землетрясений 2020–2023 гг. по данным геомагнитных и сейсмологических наблюдений

Для возможности детального исследования геомагнитного отклика от состоявшихся землетрясений должны быть выполнены три условия: экстремально большая магнитуда землетрясения ($M_w \geq 7$), наличие качественных 1-секундных наблюдений геомагнитного поля на относительно небольших (не более 25 градусов или 3000 км) эпицентральных расстояниях, наличие сейсмической станции рядом с геомагнитной обсерваторией [Соловьев, 2023]. На сегодня преобладают два описания возможного механизма генерации геомагнитного отклика на сейсмическое событие. Первое связано с так называемым «косейсмическим сигналом», предполагающим генерацию электромагнитного сигнала сейсмической волной. Второй механизм предполагает распространение

акустико-гравитационных волн от очага с последующим возбуждением ионосферы и генерацией геомагнитных пульсаций.

Рассматривались комплексные геофизические обсерватории, удовлетворяющие указанным выше критериям. Отобранные в конечном итоге пункты наблюдений представлены на карте на рис. 3.7. Расстояния между парными пунктами наблюдений не превышают 350 км. За период 01/01/2020–15/02/2024 в 3000-километровой окрестности рассматриваемых обсерваторий нашлось три землетрясения с магнитудой $M_w \geq 7$:

1. 30/10/2020 11:51 UT $M_w=7.0$ $H=21$ км, вблизи о. Самос (Греция);
2. 06/02/2023 01:17 UT $M_w=7.8$ $H=10$ км, провинция Кахраманмараш (Турция);
3. 06/02/2023 10:24 UT $M_w=7.5$ $H=7.4$ км, там же.

Обозначим их условно ЗТ-1, ЗТ-2 и ЗТ-3. Их эпицентры отмечены на карте серыми кружками (см. рис. 3.7).

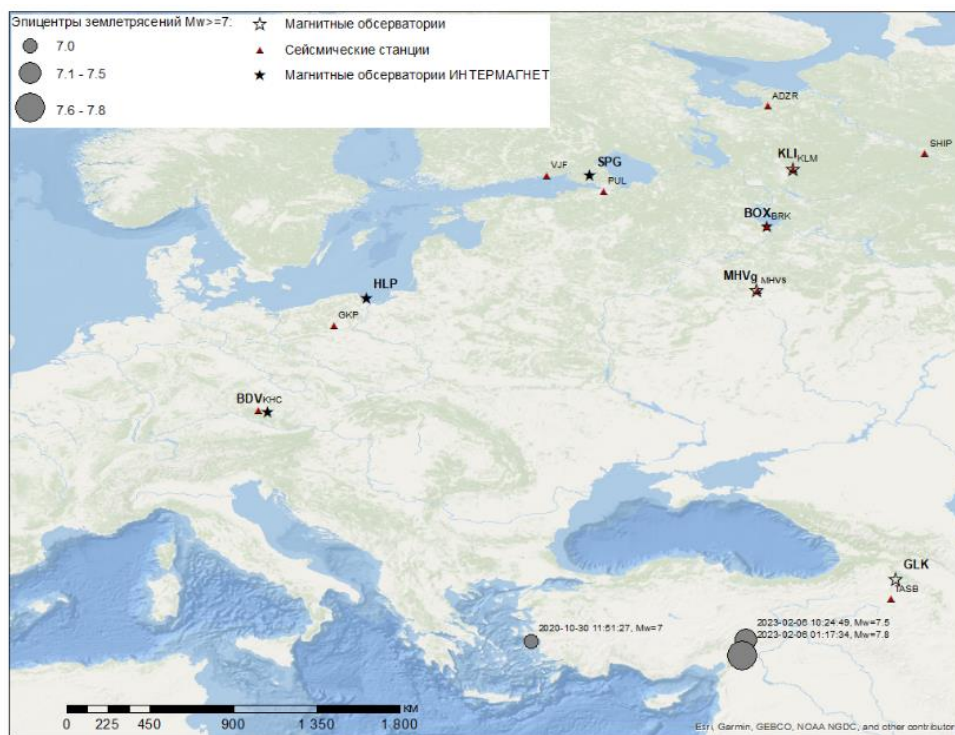


Рисунок 3.7 – Карта эпицентров землетрясений с магнитудой $M_w \geq 7$ за период 01/01/2020–15/02/2024 по данным USGS (серые круги), отобранные магнитные обсерватории, предоставляющие 1-секундные данные (звезды), и сейсмические станции (треугольники)

Для каждой пары наблюдений были построены суточные графики по каждой из трёх компонент смещений и dB/dt , синхронизированные по времени. Пример по отдельной паре наблюдений приведен на рис. 3.8. На графиках сейсмических записей отчётливо видны вступления основных сейсмических фаз, как объёмных – первичной (P) и вторичной (S),

так и поверхностных – Рэлея (RL) и Лява (LV). Для удобства представления и дальнейшего анализа следует перейти к системе координат, в которой одна из горизонтальных осей (радиальная R) лежит в плоскости падения волны, а другая (тангенциальная T) – перпендикулярна этой плоскости. В этом случае, вступление P -волны и SV -волны проявляется на радиальной компоненте, а поперечная волна с поляризацией SH – на тангенциальной. То же относится к поверхностным волнам: запись волны Рэлея содержится на компонентах Z (вертикальная) и R , волны Лява – на T -компоненте. Далее будет рассмотрен электромагнитный отклик среды объёмных и рэлеевских волн.

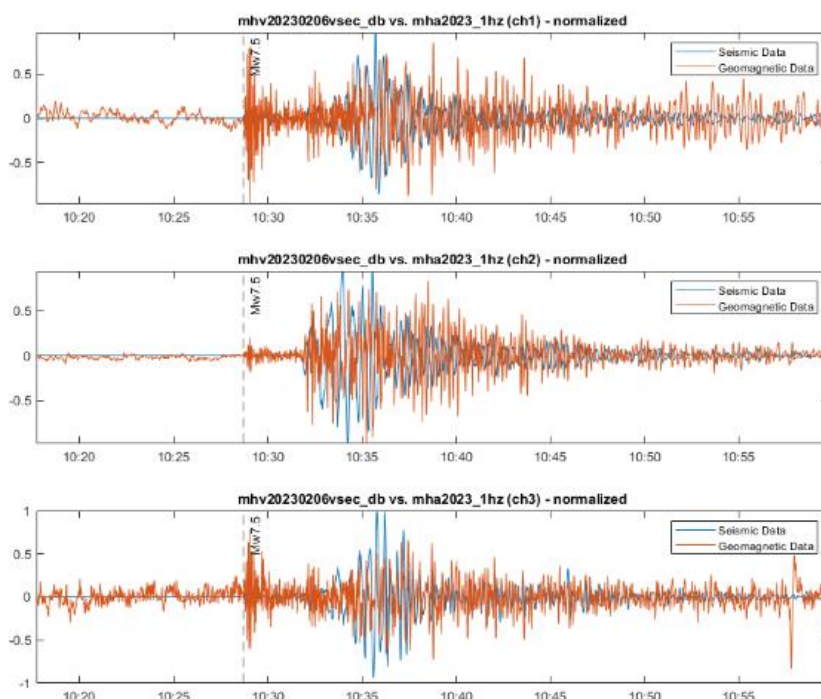


Рисунок 3.8 – Пример совмещенных графиков северной (верхний), восточной (средний) и вертикальной (нижний) компонент смещений (синий) и dB/dt (оранжевый) в нормированном виде за вычетом среднего по данным пары наблюдений МНVs-МНVg для ЗТ-3. Вертикальной пунктирной линией обозначен момент прихода P -волны на соответствующую сейсмическую станцию

Наилучшим образом геомагнитный сигнал от землетрясений выделяется на записях скорости изменения геомагнитного поля dB/dt в виде сильных изолированных всплесков с последующим затуханием. При этом, чем ближе геомагнитная обсерватория к эпицентру, тем сигнал более локализован во времени и его амплитуда выше. Напомним, что при горизонтальной однородности геоэлектрических свойств подстилающей среды ориентация вектора dB/dt соответствует направлению возбуждаемого теллурического поля $\mathbf{E}$ и токов в поверхностных слоях Земли. Пиковые амплитуды dB/dt приведены в табл. 2.1. Так, на ближайшей к эпицентрам ЗТ-2 и ЗТ-3 обсерватории GLK (Армения) амплитуда возмущения $|dX/dt|$, вызванного землетрясением ЗТ-2, достигла почти 17 нТл/с.



Таблица 2.1. Пиковые значения амплитуд dB/dt (нТл/с), вызванные землетрясениями (пустые ячейки свидетельствуют об отсутствии исходных данных либо о наличии в них сильных шумов)

Геомаг. обс-я	ЗТ-1			ЗТ-2			ЗТ-3		
	dX/dt	dY/dt	dZ/dt	dX/dt	dY/dt	dZ/dt	dX/dt	dY/dt	dZ/dt
GLK				-16.9	16.615	9.26	8.855	10.125	-5
BDV	-0.82	0.69	0.395	-0.85	-0.77	0.455	-0.93	-0.835	0.43
HLP	-1.185	1.66							
MHVg	-0.36	-0.41		-0.865	1.195	0.33	-0.895	-1.295	-0.32
SPG				0.765	1.145		-0.85	0.99	
KLI	-0.425	0.25	0.11	0.91	-1.375	-0.235	0.745	1.4	0.245

Для всех событий по всем парам геомагнитных и сейсмических наблюдений начало геомагнитного возмущения совпадает с приходом Р-волны. С приходом S-волны, чья амплитуда в несколько раз больше, геомагнитный сигнал снова интенсифицируется. С приходом рэлеевской волны, имеющей максимальную амплитуду, геомагнитный отклик также усиливается. Такая динамика возмущений вполне очевидна, если рассматривать косейсмический эффект как линейный электромагнитный отклик на механическое воздействие сейсмических волн. Это полностью соответствует теоретической модели косейсмического эффекта [Surkov *et al.*, 2018], что говорит в пользу «косейсмического» механизма возбуждения регистрируемого электромагнитного сигнала. Длительность геомагнитного сигнала увеличивается с расстоянием, что также согласуется с результатами численного моделирования косейсмического эффекта [Molchanov *et al.*, 2001].

Для сопоставления частотного состава сейсмических и геомагнитных записей были построены периодограммы для каждого события на временном интервале существования геомагнитных возмущений. Использовались нормированные данные для сопоставимости спектральной плотности мощности за 15-минутный отрезок с начала вступления Р-волны. Геомагнитный сигнал преимущественно занимает диапазон частот от 0.05 до 0.2 Гц; сейсмический сигнал тяготеет в область более низких частот (меньше 0.1 Гц). Пример приведен на рис. 3.9.

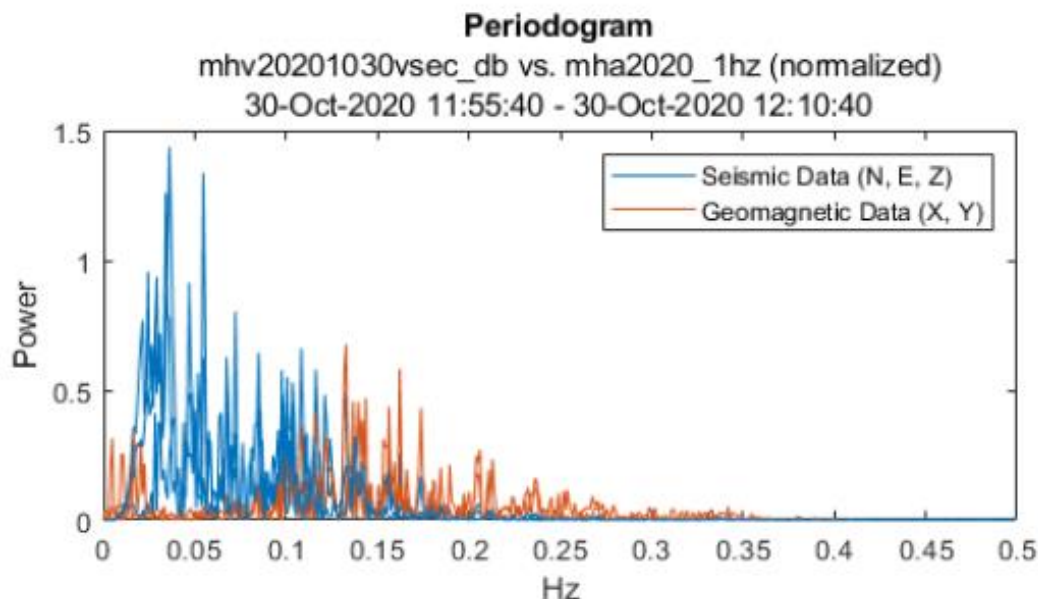
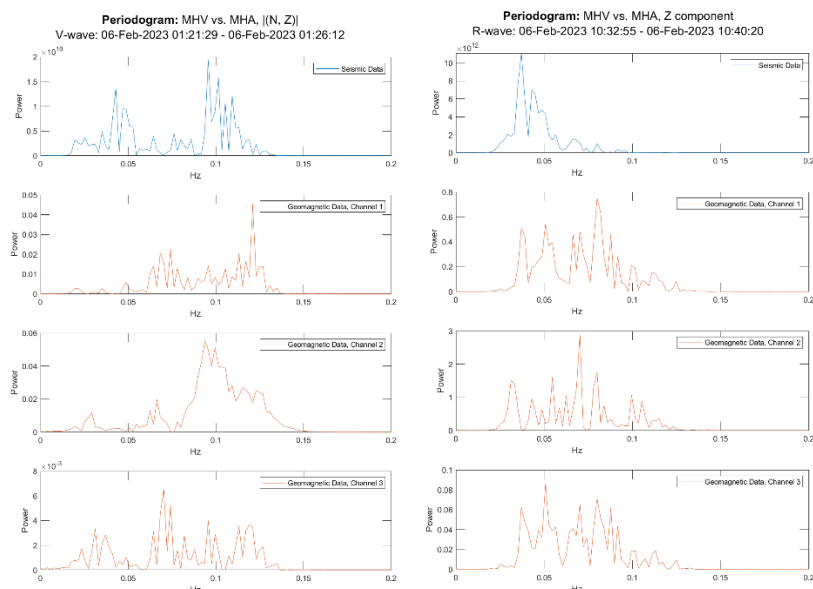


Рисунок 3.9 – Периодограммы по нормированным данным для трех компонент смещений (синий) и двух горизонтальных компонент скорости изменения магнитного поля (оранжевый), зарегистрированных за 15-минутный интервал с момента первого вступления для пары пунктов наблюдений MHVs-MHVg для события ЗТ-1

Спектральные составы сейсмического и электромагнитного сигналов в целом согласуются друг с другом, но имеют существенное различие в деталях. Поэтому нами были рассчитаны спектры отдельно для объёмных P - и S -волн и поверхностных волн Рэлея по отфильтрованным в диапазоне частот от 20 до 125 мГц данным (подавленные фильтром возмущения следует рассматривать как помеху). На рис. 3.10а приведён спектр модуля сейсмического сигнала объёмных волн и три компоненты электромагнитного отклика. Высокочастотная область спектра соответствует продольной волне. Спектр на низких частотах определяется поперечной волной. Здесь основной косейсмический эффект является электрокинетическим и проявляется на Y -компоненте, т. к. объёмные волны возбуждают, главным образом, геомагнитные возмущения, возникающие в результате градиента механического давления. На рис. 3.10б приведены периодограммы, построенные на отрезке прохождения поверхностных волн. Спектр Z -компоненты сейсмического сигнала содержит ряд спектральных линий рэлеевских мод (верхняя панель). Аналогичную структуру имеет спектр R -компоненты. Согласно [Surkov *et al.*, 2018], косейсмический эффект имеет электромагнитную природу и проявляется на X - и Z -компонентах. Наличие многочисленных обертонов говорит о достаточно высокой добротности эффективного резонатора под обсерваторией. Таким образом, нами впервые представлены экспериментальные наблюдения, которые отражают данный эффект.



(a)(б)

Рисунок 3.10 – Периодограммы модуля сейсмического сигнала $|(N, Z)|$ при прохождении объемных P - и S -волн (вверху) для события ЗТ-2 (а) и Z -компоненты сейсмического сигнала при прохождении волны Релея (вверху) для события ЗТ-3 (б) на паре пунктов наблюдений MHVs-MHVg. Соответствующие периодограммы трех компонент (X, Y, Z) электромагнитного отклика dB/dt представлены на остальных графиках (оранжевый)

3.5 Распознавание быстрых вариаций главного магнитного поля Земли по данным обсерваторий за 1932–2022 гг.

Начало спутниковых измерений полного вектора геомагнитного поля с 1999 г. позволило создавать надежные и высокоточные модели ГМПЗ с возможностью их аналитического продолжения вниз до границы ядро-мантия. Они позволили выявить быстрые вариации ГМПЗ на масштабах 1–10 лет. В частности, была обнаружена 6-летняя квазипериодичность всплесков векового ускорения (ВУ) одной полярности. В [Soloviev *et al.*, 2017] был предложен принципиально новый подход, который позволил также выявить эту закономерность по данным только магнитных обсерваторий. Данный метод не подразумевает промежуточного построения модели ГМПЗ. В его основе лежит методика взвешенного гравитационного сглаживания (GrS) [Agayan *et al.*, 2014] для выделения сигнала ГМПЗ. В данном разделе представлены результаты расширенного анализа обсерваторских данных с 1932 г., когда стал доступен планетарный геомагнитный индекс Кр, т. е. задолго до начала геофизической космической эры. На рис. 3.11 показано количество используемых рядов наблюдений по отдельным компонентам МПЗ как функция от времени.

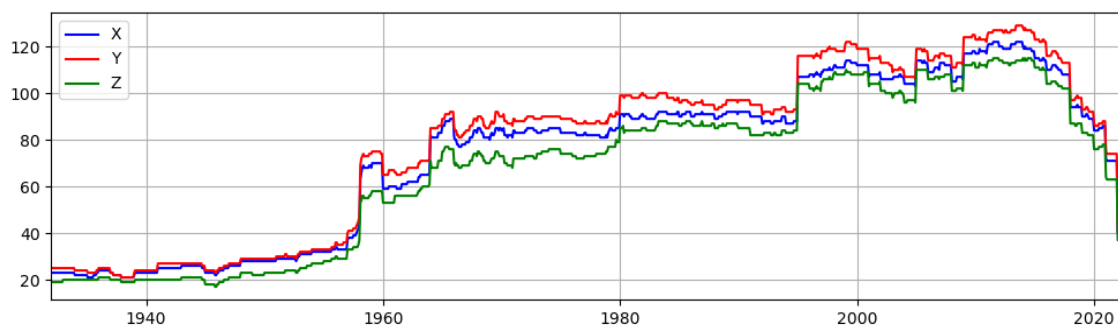


Рисунок 3.11 – Число используемых записей компонент X, Y, Z из разных обсерваторий по месяцам за рассматриваемый период

Для обобщения результатов, полученных для отдельных обсерваторий, были построены средние значения ВУ для каждого месяца и каждой компоненты отдельно для положительных и отрицательных значений ВУ. Результат на рис. 3.12 дает представление о глобальной динамике ВУ за рассматриваемый период. Из рисунка явно прослеживается «пульсирующий» характер глобального ВУ на поверхности Земли. Абсолютная величина всплесков ВУ изменяется в характерном для поверхности Земли интервале от 2 до 7 нТл/год² для каждой компоненты.

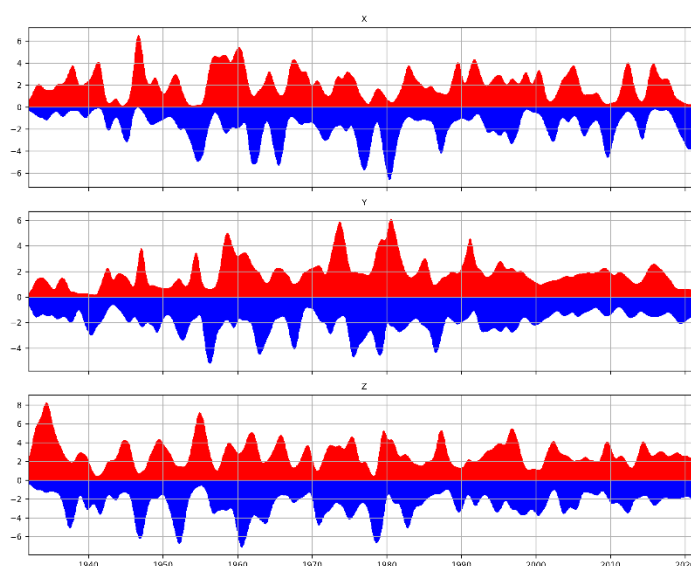


Рисунок 3.12 – Положительные (красные) и отрицательные (синие) средние значения ВУ для компонент X (сверху), Y (по центру) и Z (внизу) ГМПЗ за 1932–2022 гг.

Для установления закономерностей в периодичности всплесков ВУ применён спектральный анализ. Предварительно записи, представленные на рис. 3.12, подверглись полосовой фильтрации в диапазоне 1–10 лет и сплайновому сглаживанию для устранения короткопериодных флуктуаций и долгопериодных трендов, связанных с циклами солнечной активности. Сопоставление полученных огибающих для положительных и

отрицательных значений ВУ приведено на верхнем графике рис. 3.13 на примере X-компоненты. Спектральные характеристики представлены на нижнем графике.

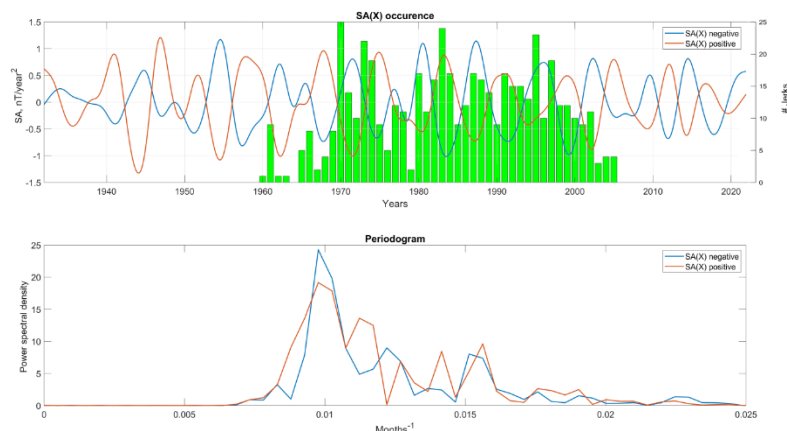


Рисунок 3.13 – Положительные (красные) и отрицательные (синие) огибающие исправленной записи ВУ для компоненты X (сверху) и их спектральная плотность мощности (снизу). Суммарное количество геомагнитных джерков в компоненте X, наблюдавшихся во всем мире в 1957–2008 гг. по данным [Brown et al., 2013], показано на верхнем графике столбчатой диаграммой по годам

Положительная и отрицательная огибающие ВУ для компоненты X изменяются синусоидально. На периодограммах пиковые значения частоты составляют 0.01 и 0.0156 мес⁻¹, что соответствует периодам 8,3 и 5,3 лет. Эти пики совпадают для положительных и отрицательных огибающих. Полученные результаты хорошо согласуются с [Silva et al., 2012], где сообщалось о двух пиках на отметках 5,5 и 7,5 лет в частотном спектре ВУ на поверхности Земли за 1960–2002 гг. по модельным данным. Полученный результат авторы объясняют изменчивостью амплитуды сигнала ВУ во времени, приводящей к расколу энергии на два пика. Однако фактически эти периоды настолько близки, что их можно интерпретировать как составляющие одного колебания с периодом ~6 лет.

В [Duan, Huang, 2020] показана связь 6-летней осцилляции длительности суток с осесимметричными экваториальными альвеновскими волнами на поверхности ядра. Недавно были обнаружены неосесимметричные магнито-кориолисовы волны с периодом 7 лет, также влияющие на вариабельность поля [Gillet et al., 2022]. Обнаруженные нами пары пиков в спектрах ВУ хорошо согласуются с предложенными физическими механизмами.

Анализ спектральной плотности мощности позволяет лишь грубо определить периодичность пиков ВУ примерно в 6–8 лет, что обусловлено несовершенством данных обсерваторий, которое сохраняется даже после изощренной обработки данных. Однако фундаментально важным является установленный факт чередования полярности всплесков ВУ на длительном промежутке времени в 90 лет. Периодичность всплесков, а также сдвиг

фаз между положительными и отрицательными огибающими остаются в целом стабильными в течение всего времени для всех трех компонент. Относительный сдвиг фаз примерно на 3 года между ростом числа джерков и глобальным ВУ в компоненте Y хорошо согласуется с предположением о чередовании джерков и всплесков. [Aubert et al., 2022] объясняют джерки взаимодействием между процессом конвекции и гидромагнитными волнами в жидком ядре.

Наш подход впервые позволил детектировать всплески ВУ чередующейся полярности за 90-летний период (1932–2022 гг.). Это говорит в пользу предположения о волновой природе соответствующего процесса в жидком ядре, которое базируется на существовании устойчивой 6-летней квазипериодичности всплесков ВУ одной полярности. Необходимо отметить, что по мере расширения наблюдений Земли все более активно обсуждается 6-летняя цикличность и в других компонентах геосистемы [Pfeffer et al., 2023].

3.6 Развитие ДМА для решения задач геофизики

3.6.1 Нечеткие спектры временных рядов

Изучение интерпретатором записи f предполагает какое-либо интересующее его свойство P . Исследователю важна динамика выполнения P для f на T , в частности, зоны в T , где P наиболее выражено на f и которые он считает аномалиями (P -аномалиями) для f . В ДМА имеется программа исследования функций, позволяющая формализовать и алгоритмизировать сказанное выше. Она реализована на языке нечеткой математики и включает в себя построение на T нечёткой структуры (меры) $\mu_{P_f}(t)$, выражающей в узле t степень проявления свойства P на записи f . Мера μ_{P_f} является функцией принадлежности на T к нечёткому понятию «проявление P на f » и принимает значения в шкале отрезка $[0,1]$. Возникает фундаментальная для ДМА триада, составляющая основу его подхода к записям (рис. 3.14).

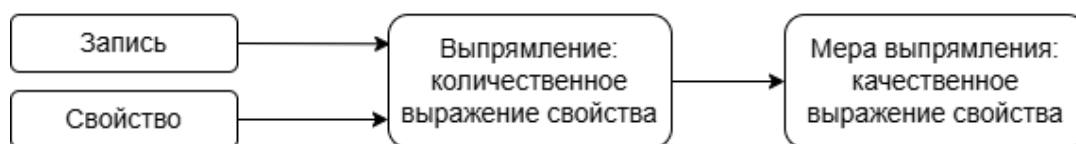


Рисунок 3.14 – Фундаментальная триада ДМА-анализа временных рядов

Соединение меры свойства μ_{P_f} с параметрическим семейством разномасштабных локализаций $\delta(p, r)$

$$\delta_t(\bar{t}) = \delta(p, r)(\bar{t}) = \begin{cases} (1 - \frac{|\bar{t}-t|}{r})^p, & \text{если } |\bar{t} - t| \leq r \\ 0, & \text{если } |\bar{t} - t| > r \end{cases}$$

дает спектр проявления свойства P на записи f в интервале масштаба $\mathfrak{F}$:

$$\mu P_f(t, p) = \mu P_f(t | \delta_t(t, p)).$$

Пример разномасштабного анализа свойства «непрерывность (отклонение от сглаженной)» приведен на рис. 3.15.

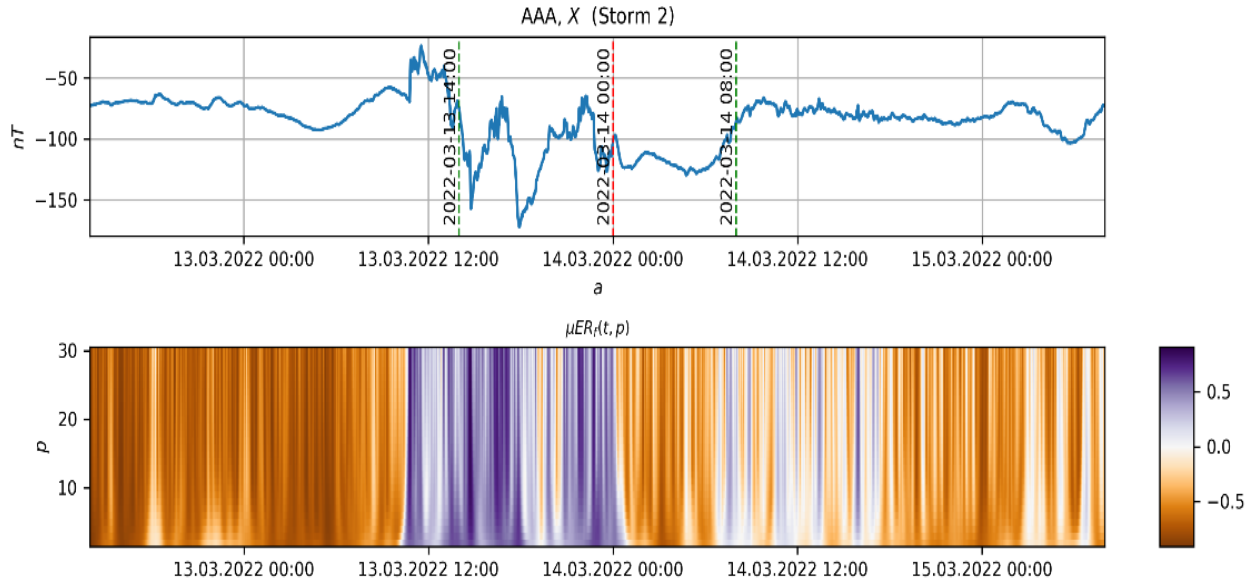


Рисунок 3.15 – Исходная магнитограмма f (а), спектр μER_f (б)

Следующий этап моделирования логики интерпретатора (ЛИ) связан с разномасштабным анализом по системе свойств. Пусть $M_f = \{\mu_f^i, i \in I\}$ – конечная система нечетких структур на T , за каждой из которых стоит свое свойство записи. Система M_f определяет на T I -значную функцию, которую обозначим также:

$$M_f(t) = i: \mu_f^i(t) = \max_{i \in I} \mu_f^i(t).$$

Другими словами, $M_f(t)$ является маркером в t наиболее выраженного свойства из системы M_f . Теперь дополнительно предположим, что система M_f зависит от локализации $\delta(p, r)$, тогда функция $M_f(t, p)$ будет выражать проявление свойств из M_f на T в разных масштабах $\mathfrak{F}$. $M_f(t, p)$ – третий вид нечетких спектров для f . Пример разномасштабного анализа по системе свойств «Тренд+Экстремум» приведен на рис. 3.16.

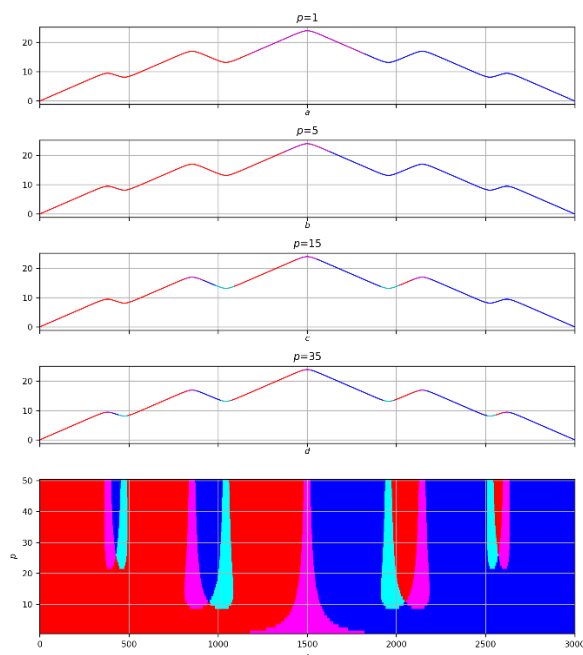


Рисунок 3.16 – Спектр свойства «Тренд+Экстремум» (внизу) и его реализации при разных масштабах обзора p (верхние графики): красный цвет – рост, малиновый цвет – максимум, синий цвет – спад, голубой цвет – минимум

При анализе записи f отдельный интерес представляет визуализация зависимости итогового результата ЛИ от заключённого в неё уровня экстремальности. На рис. 3.17 на выпрямлении $|D|_f$ исходной записи f , которое отражает свойство изрезанности (модуль производной), красным цветом показан результат ЛИ (α -аномальные зоны с точки зрения $|D|_f$) при $\alpha = 0.49, 0.67, 0.76$. Ни нижнем графике представлена общая картина для всех показателей $\alpha \in [0,1]$.

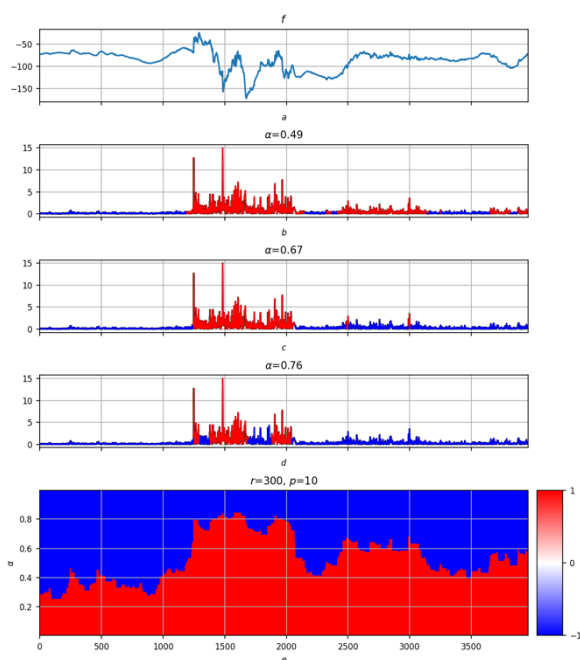


Рисунок 3.17 – исходная запись f (а); аномальные зоны при $\alpha = 0.49$ (б); аномальные зоны при $\alpha = 0.67$ (в); аномальные зоны при $\alpha = 0.76$ (г), спектр аномальных зон для $\alpha \in [0, 1]$ (д)

3.6.2 Векторный анализ на базе ДМА

В данном разделе решается задача обработки данных от двумерной сети магнитных станций с последующим автоматическим (или автоматизированным) распознаванием вихревых токовых структур в ионосфере и оценкой плотности продольных токов, пространственного масштаба вихря и горизонтальной скорости распространения. Распознавание вихревых токовых структур предполагает решение следующих задач: (1) построение на дискретной пространственной сетке наземного магнитного поля по данным сети магнитных станций, (2) построение эквивалентной системы холловских токов на дискретной сетке, моделирующей ионосферу, и (3) обнаружение на дискретной сетке вихревых структур холловских токов. Первая из перечисленных задач решается методами интерполяции с тем условием, что построенное в результате векторное поле должно быть дискретизацией некоторого магнитного поля. Построение дискретизации холловских токов в ионосфере является обратной задачей, которую можно пытаться решать, используя технику векторного потенциала. Поиск вихревых холловских структур на дискретной сетке предлагается выполнять с помощью методов ДМА.

Неформальная логика интерпретатора в поиске вихревых структур следующая. Исследователь, находясь в определённой точке плоскости, понимает, в какой степени вокруг неё вращается заданное на плоскости конечное векторное поле. Это – нечёткая мера вихря, которая является результатом локального этапа. На глобальном уровне исследователь должен найти все глобальные максимумы, которые и будут центрами всех глобальных вихрей в данном поле. Введем обозначения:

$\Pi = \mathbb{R}^2(xOy)$ – плоскость в системе координат xOy ;

I – конечная сетка в Π : $I = \{i\}$; $i = (i_x, i_y)$;

V – векторное поле на I : $V(i) = (V_x(i), V_y(i))$;

$\pi = (\pi_x, \pi_y)$ – точка, в которой находится исследователь.

Исследователь строит для π две меры $\mu_V^+(\pi)$ и $\mu_V^-(\pi)$:

- $\mu_V^+(\pi)$ – степень вращения поля V вокруг точки π против часовой стрелки;
- $\mu_V^-(\pi)$ – степень вращения поля V вокруг точки π по часовой стрелке.

В обоих случаях нужен взгляд исследователя из π на V в виде локализации $\delta_\pi \in Fuzzy\Pi$: она дает возможность интегрально собрать повороты V вокруг π в нужном направлении в каждом узле $i \in I$.



Повороты по (против) часовой стрелке определяются знаком определителя:

$$\left| \begin{matrix} i - \pi \\ V(i) \end{matrix} \right| = \begin{vmatrix} i_x - \pi_x & i_y - \pi_y \\ V_x(i) & V_y(i) \end{vmatrix}.$$

Положим

$$(V, \pi)(i) = \operatorname{sgn} \left| \begin{matrix} i - \pi \\ V(i) \end{matrix} \right|.$$

Тогда

$$\mu_V^+ = \frac{\sum \delta_{\pi|V(i)|: (V, \pi)(i) > 0}}{\sum \delta_{\pi|V(i)|: i \in I}}; \quad \mu_V^- = \frac{\sum \delta_{\pi|V(i)|: (V, \pi)(i) < 0}}{\sum \delta_{\pi|V(i)|: i \in I}}.$$

Модуль $|V(i)|$ играет роль веса узла i в поле V .

Выбор по большому уровню (≥ 0.75) относительно мер μ_V^+ и μ_V^- дает, в общем случае, размытые центры положительных и отрицательных вихрей в V соответственно. Рисунки 4.5-4.7 последовательно показывают работу алгоритма поиска вихрей на некотором заданном поле:

1. исходное поле V (рис. 3.18);
2. построенные по нему меры μ_V^+ и μ_V^- (рис. 3.19а);
3. полученные центры вихрей, как результат выбора по уровню μ_V^+ и μ_V^- (рис. 3.19б);
4. выделение вихрей против часовой стрелки путем редуцирования к п.2 (рис. 3.20а);
5. выделение вихрей по часовой стрелке путем редуцирования к п.2 (рис. 3.20б).

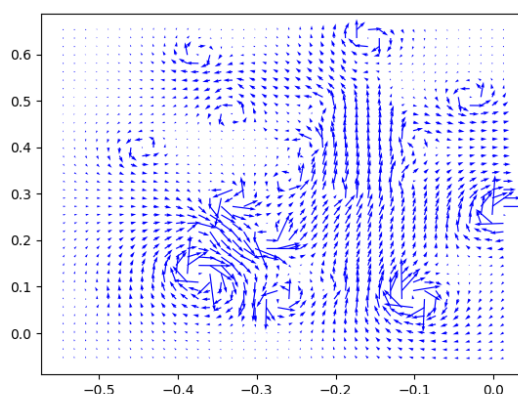


Рисунок 3.18 – Исходное поле V

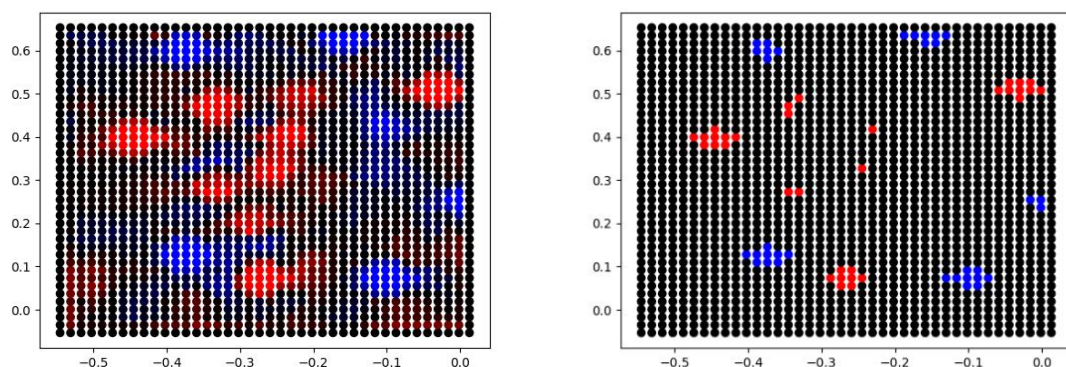


Рисунок 3.19 – Меры μ_V^+ (красный) и μ_V^- (синий) (а), центры вихрей, как результат выбора по уровню (≥ 0.75) (б)

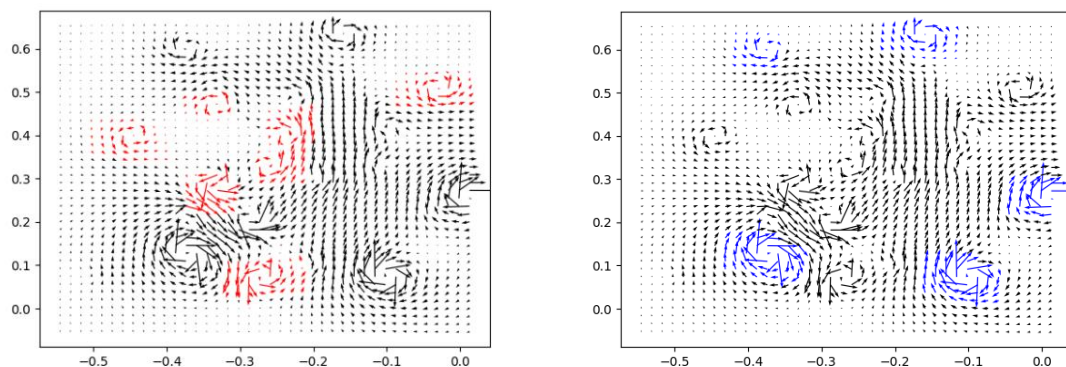


Рисунок 3.20 – Выделение вихрей, направленных против (а) и по часовой стрелке (б) путем редуцирования к рис. 3.19а

3.7 Развитие функционала АПК МАГНУС

В целях усовершенствования real-time мониторинга гелиогеофизической обстановки по секундным данным в работу АПК МАГНУС было интегрировано свободно распространяемое программное обеспечение Autoplot (autoplot.org), использующее специальный скриптовый язык Jython. Autoplot уже стал стандартом де-факто для визуализации космических снимков и временных рядов астрономических наблюдений. В работе АПК МАГНУС это решение позволяет выполнять следующие задачи:

- оперативный и/или ретроспективный контроль температурных режимов вариометра (рис. 3.21);
- оперативное сравнительное отслеживание данных обсерваторий в реальном времени (рис. 3.22);
- мониторинг задержек в поступлении данных на FTP-сервер ГЦ РАН;



- локализация возможных технических проблем передачи и/или приема данных;
- оперативная оценка и анализ геомагнитной обстановки во время сильных проявлений космической погоды (рис. 3.22).

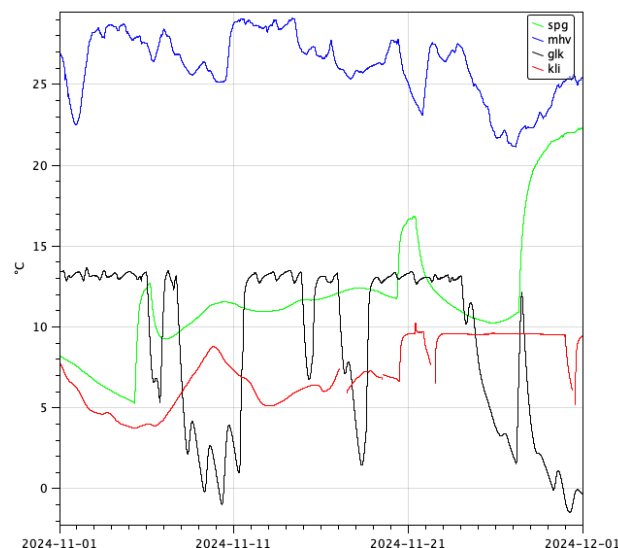


Рисунок 3.21 – Температура датчиков векторных магнитометров на обсерваториях ГЦ РАН

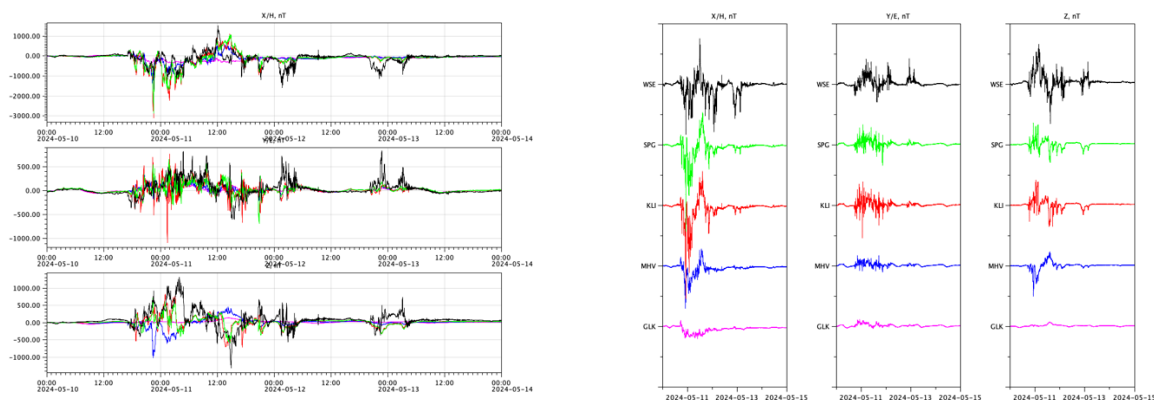


Рисунок 3.22 – Горизонтальная (слева) и вертикальная (справа) визуализация бури 10–12 мая 2024 г. по данным обсерваторий ГЦ РАН

Разработка и добавление в АПК МАГНУС расчета усредненных значений компонент магнитного поля стала очередным шагом повышения качества контроля обсерваторских наблюдений. Для существенного ускорения обработки длинных рядов функция была реализована на компилируемом языке Golang с поддержкой параллельной обработки. В итоге скорость выдачи усредненных данных близка к таковой при построении исходных данных в БД. С помощью добавленной функции была зафиксирована нестабильность постаментов на обсерватории «Белое море» (WSE). На рис. 3.23 приведены графики среднесуточных и среднечасовых измерений обсерваторского магнитометра

ПОС-4. Показано, что дрейф горизонтальной компоненты (стрелка на рисунке) не связан с датчиком магнитометра, следовательно, имеет место движение постаментов, по всей видимости, связанное с климатической обстановкой.

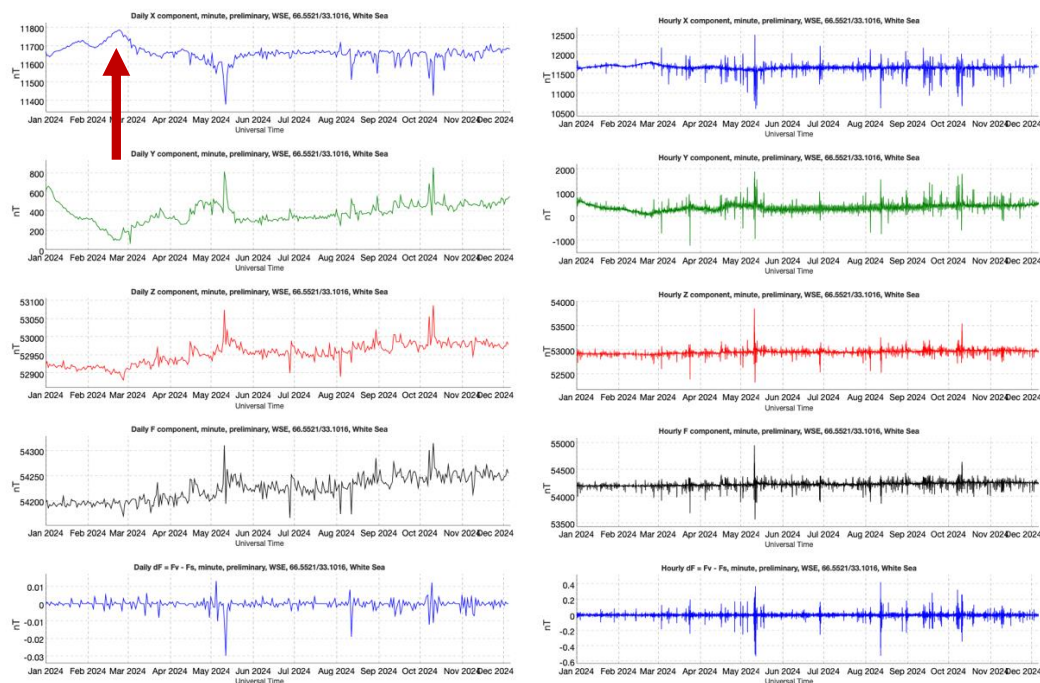


Рисунок 3.23 – Оперативные среднесуточные (слева) и среднечасовые (справа) значения компонент по данным магнитометра на обсерватории «Белое море» (WSE)

По состоянию на 1 декабря 2024 г. общий объем геомагнитных данных, поступивших в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» ГЦ РАН, составил 9 900 Тб.

Список использованных источников

- Соловьев А. А. Геомагнитный эффект землетрясений $M_w = 7.5-7.8$ в Турции 6 февраля 2023 г. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600613>
- S. M. Agayan, Sh. R. Bogoutdinov, M. N. Dobrovolsky, A. I. Kagan (2014). Weighted gravitational time series smoothing. Russ. J. Earth. Sci., 14, ES3002, <https://doi.org/10.2205/2014ES000543>
- Aubert J., Livermore P. W., Finlay C. C., Fournier A., Gillet N. A taxonomy of simulated geomagnetic jerks. Geophysical Journal International, Oxford University Press (OUP), 2022, 231 (1), pp.650-672. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac212ff>. fhal-03719369



- Brown W. J., Mound J. E., Livermore P. W. (2013). Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 223, pp. 62–76, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.06.001>.
- Chulliat, A., Vigneron, P. & Hulot, G. First results from the Swarm Dedicated Ionospheric Field Inversion chain. *Earth Planet Sp* 68, 104 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0481-6>
- Duan P., Huang C. Intradecadal variations in length of day and their correspondence with geomagnetic jerks. *Nature Communications*, 2020, Vol. 11, Art. No. 2273. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16109-8>
- Gillet N., Gerick F., Jault D., Schwaiger T., Aubert J., and Istaş M. Satellite magnetic data reveal interannual waves in Earth's core, *PNAS*, 2022, <https://doi.org/10.1073/pnas.2115258119>
- Molchanov O., Kulchitsky A., Hayakawa M. Inductive seismo-electromagnetic effect in relation to seismogenic ULF emission // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2001. Vol. 1. P. 61–67. <https://doi.org/10.5194/nhess-1-61-2001>
- Pfeffer J., A. Cazenave, S. Rosat, L. Moreira, M. Manda, V. Dehant, B. Couprie (2023). A 6-year cycle in the Earth system. *Global and Planetary Change*, Vol. 229, 104245, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104245>
- Silva, L., L. Jackson, J. Mound (2012), Assessing the importance and expression of the 6 year geomagnetic oscillation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B10101, <https://doi.org/10.1029/2012JB009405>
- Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov Sh. (2017). Detection of secular acceleration pulses from magnetic observatory data. *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 270. P. 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.07.005>. 2017
- Surkov V. V., Pilipenko V. A., Sinha A. K. Possible mechanisms of co-seismic electromagnetic effect // *Acta Geod. Geophys.* 2018. Vol. 53. P. 157–170 <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0211-6>



4 Структурирование, визуализация, анализ и распространение геофизических данных

Шифр темы: FMWG-2022-0007

Регистрационный №: 122080300191-3

Руководитель: зам. директора по науке, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев

4.1 Накопление и организация хранения данных в Мировых центрах данных.

Расширение центрального репозитория «Базы данных по наукам о Земле»

В 2024 году в рамках выполнения Государственного задания по НИР в Мировых центрах данных (МЦД) по солнечно-земной физике (СЗФ) и физике твердой Земли (ФТЗ) проводилась работа по увеличению информационных ресурсов, переводу исторических данных в электронную форму и совершенствованию сложившейся системы управления данными.

4.1.1. Увеличение информационных ресурсов Мировых центров данных

В МЦД по солнечно-земной физике в разделе «Геомагнитные вариации» проведена систематизация и публикация в свободном доступе цифровых изображений магнитограмм, хранящихся в фондах Центра. Магнитограммы представлены в графических форматах TIFF и JPEG. К каждому месячному, квартальному или годовому массиву магнитограмм подготовлен сопроводительный файл с информацией о геомагнитной обсерватории, приборах и базисных значениях. Общее количество подготовленных и опубликованных в 2024 году цифровых изображений магнитограмм приведено в таблице 4.1. В массиве магнитограмм находились сканированные фотографии таблиц среднечасовых значений элементов геомагнитного поля (D , H , Z). Изображения 736 таблиц (1 174 Мб) были отредактированы, преобразованы из формата TIFF в формат PDF и размещены на сайте.

Таблица 4.1 – Цифровые изображения магнитограмм, опубликованные в 2024 году на сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/geomag/magnetogr_list.html

Название обсерватории	Код	Период, год	Количество магнитограмм	Объем, Мб
Тикси	TIK	1966–1970	2 160	22 914
Иркутск	IRT	1957–1965	2 618	24 710
Тбилиси	TFS	1957–1962	2 005	629
Всего:			6 783	48 253



Дополнены массивы значений геомагнитного K -индекса. Все данные проверены, приведены к стандартному формату и опубликованы на сайте в разделе http://www.wdcb.ru/stp/data/Catalog_K/ (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Значения геомагнитного K -индекса, пополнившие в 2024 году массив данных в формате TXT, на сайте МЦД по СЗФ

Название обсерватории	Код	Период, год	Название обсерватории	Код	Период, год
Алма-Ата	AAA	1982	Молодежная	MOL	1982
Владивосток	VLA	1982	Мыс Шмидта	CPS	2021–2024
Воейково	LNN	2020–2024	Новоказалинск	NKK	1982
Восток	VOS	1982	Новолазаревская	NVL	1982
Караганда	KGD	1966–1973, 1982	Новосибирск	NVS	2020–2023
Калининград	KNG	1982	Одесса	ODE	1982, 2000–2009
Магадан	MGD	2021–2024	Паратунка	PET	2021–2024
Мирный	MIR	1982	Улан-Батор	UBA	1966–1972, 1974
Минск	MNK	1982	Хабаровск	KHB	2021–2024

Дополнены ряды геомагнитных индексов aa и Aa ; AE , AU , AL , AO ; Kp , ap и Ap ; am , an , as ; Dst ; PCN ; Q и D на основе определений, представленных в Международной службе геомагнитных индексов (ISGI), в Мировом центре данных по геомагнетизму, Киото и в Немецком исследовательском центре наук о Земле (GFZ).

Продлены ряды среднечасовых и минутных значений элементов D , H , Z геомагнитного поля обсерватории «Красная Пахра» (MOS) данными за 2023 год, полученными из ИЗМИРАН. Таблицы часовых значений элементов геомагнитного поля по обсерватории «Одесса» за периоды 1949–1960, 1992–1998, 2000–2001 гг. переведены из графического формата JPG в формат PDF, а затем в текстовый формат TXT (коды ASCII). Проверены и отредактированы таблицы среднечасовых значений элементов геомагнитного поля после сканирования (PDF файлы) обсерватории «Иркутск» за период 1957–1995 гг.

В разделе «**Ионосферные явления**» опубликованы данные ионосферной станции «Москва» (ИЗМИРАН), содержащие значения 18-ти ионосферных параметров за период 12.2023–11.2024 гг. Проверены переведенные в электронную форму ионосферные данные станции «Алма-Ата» за 1957–1964 и 1968–1970 гг., включающие таблицы среднечасовых значений параметров ионосферы и F -графики.

В разделе «**Солнечная активность и межпланетная среда**» в 2024 году опубликована 7-я версия «Накопительного каталога солнечных вспышечных событий рентгеновского класса $M1 - X > 17.5$ 25-го цикла солнечной активности», содержащая

данные о 1 306 событиях, произошедших на Солнце с января 2020 г. по 14 сентября 2024 г. http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flare_events.ru.html (DOI: 10.2205/ESDB-SAD-FE-03).

Продолжающиеся ряды данных по солнечной активности, такие как «Международное число солнечных пятен, версия 2», «Американское число солнечных пятен», «Поток радиоизлучения $F_{10.7}$ » и данные о смене полярности на секторной границе межпланетного магнитного поля, дополнены информацией за период с июля 2023 по октябрь 2024 года.

В МЦД по физике твердой Земли регулярно публиковались на сайте в свободном доступе данные из «Сейсмологического бюллетеня» и «Сейсмологического каталога», поступающие еженедельно из Единой геофизической службы Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН) <http://www.wdcb.ru/sep/seismology/>. В настоящее время массив данных относится к периоду 1993–2023 гг.

В МЦД по ФТЗ поддерживается версия каталогов землетрясений сейсмических регионов СССР с 1911 по 1991 гг. по данным из [*Атлас ..., Бюллетень ..., Землетрясения в СССР...*] и регионов Северной Евразии с 1992 года по данным из [*Землетрясения Северной Евразии...*] в текстовом формате TXT (в кодах ASCII) http://www.wdcb.ru/sep/seismology/hypocenter_data.ru.html. В 2024 году дополнены данными по 2019 г. каталоги регионов «Приамурье и Приморье», «Сахалин» и «Курило-Охотский регион». Каталог всех сейсмических событий (землетрясений и взрывов) на территории России в текстовом формате по данным из [*Землетрясения России...*], сформированный в 2023 г., в 2024 году продлен и содержит данные о 262 400 событиях за период 2003–2022 гг.

4.1.2 Сохранение исторических данных

В Мировых центрах данных по СЗФ и ФТЗ реализуется проект «Сохранение исторических данных» – преобразование в электронную форму геофизических данных, хранящихся в фондах Центров в виде бумажных документов. Осуществляется сканирование данных с бумажного носителя, превращение в электронные документы (формат PDF) и последующая компьютерная обработка электронных документов. Каждый год переводится в электронную форму 42–43 тысячи бумажных документов формата А4. Документы в электронной форме после проверки и редактирования размещаются на сайтах Центров.



В 2024 году в электронную форму переведен «Оперативный сейсмологический бюллетень (ежедекадный)» за период 1978–1989 гг. и «Атлас изосейсмических карт землетрясений Италии» (990–1980 гг.).

Подготовлен и опубликован на сайте МЦД по ФТЗ «Бюллетень сейсмических станций СССР» (ежеквартальный) [*Бюллетень...*], 20 выпусков за 1957–1961 гг. (~ 60 Мб). http://www.wdcb.ru/sep/seismology/bul_USSR_net.ru.html. Данные *K*-индекса 20-ти обсерваторий за старые годы, опубликованные в сборниках «Космические данные» [*Космические...*], переведены в формат PDF и размещены на сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/data/K_indices/ (~ 300 Мб).

4.1.3 Формирование тематических баз данных

Сформированы две базы данных «Землетрясения в Кавказской сейсмоактивной зоне, 1957–1961 гг.» и «Землетрясения в Среднеазиатской сейсмоактивной зоне, 1957–1961 гг.» http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_USSR_net/ (свидетельства о государственной регистрации № 2024625422 от 22.11.2024 г. и № 2024462555 от 25.11.2024 г.).

Основой послужили каталоги землетрясений из «Бюллетеня сети сейсмических станций СССР» [*Бюллетень...*], преобразованные в файлы PDF (см. раздел 4.1.2), затем вручную переведенные в цифровой формат XLSX и компьютерной программой в формат TXT (ASCII коды). В каталогах содержатся основные данные о землетрясениях – момент возникновения, координаты очага, класс точности, инструментальная интенсивность *M*, а в бюллетене приведены подробные данные для отдельных событий.

Базы данных включают: PDF-копии опубликованных в бюллетене основных и подробных данных о землетрясениях в Кавказской и Среднеазиатской зонах и сведений о сейсмических станциях; каталоги землетрясений в двух цифровых форматах XLSX и TXT; описание формата каталогов, построенные карты пространственного распределения эпицентров землетрясений (рис. 4.1 и 4.2). Через раскрывающееся меню обеспечен доступ к PDF-файлам с данными о землетрясениях из бюллетеня и сведениям о станциях. Внизу интернет-страниц находятся ссылки на каталоги землетрясений в двух форматах XLSX и TXT и дополнительные сведения – описание формата каталога и принятые в бюллетене обозначения.

В базе для Кавказской зоны представлены основные данные о 4 385 землетрясениях и подробные данные для 70 событий на территории $38\text{--}46^\circ \text{N}$, $38\text{--}54^\circ \text{E}$. В базе для Среднеазиатской зоны содержатся основные данные о 6 825 землетрясениях и подробные данные о 425 событиях на территории $36\text{--}46^\circ \text{N}$, $64\text{--}81^\circ \text{E}$.

Представленные в БД данные о землетрясениях в Кавказской и Среднеазиатской сейсмоактивных зонах заполняют временной промежуток между каталогами для этих зон, представленными в «Атласе землетрясений в СССР» (1911–1957 гг.) и данными о землетрясениях в ежегодниках «Землетрясения в СССР» (1962–1991 гг.) [Атлас..., Землетрясения в СССР...].

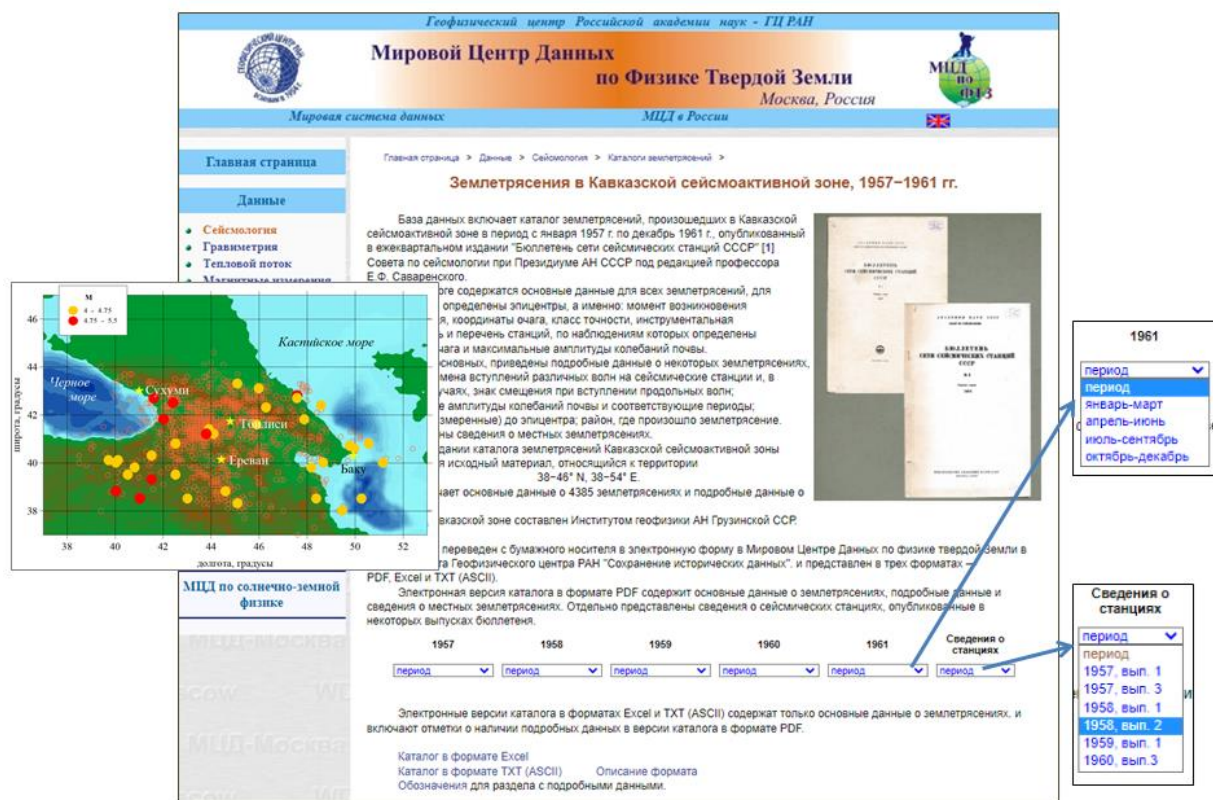


Рисунок 4.1 – Страница сайта для базы данных Кавказской сейсмоактивной зоны

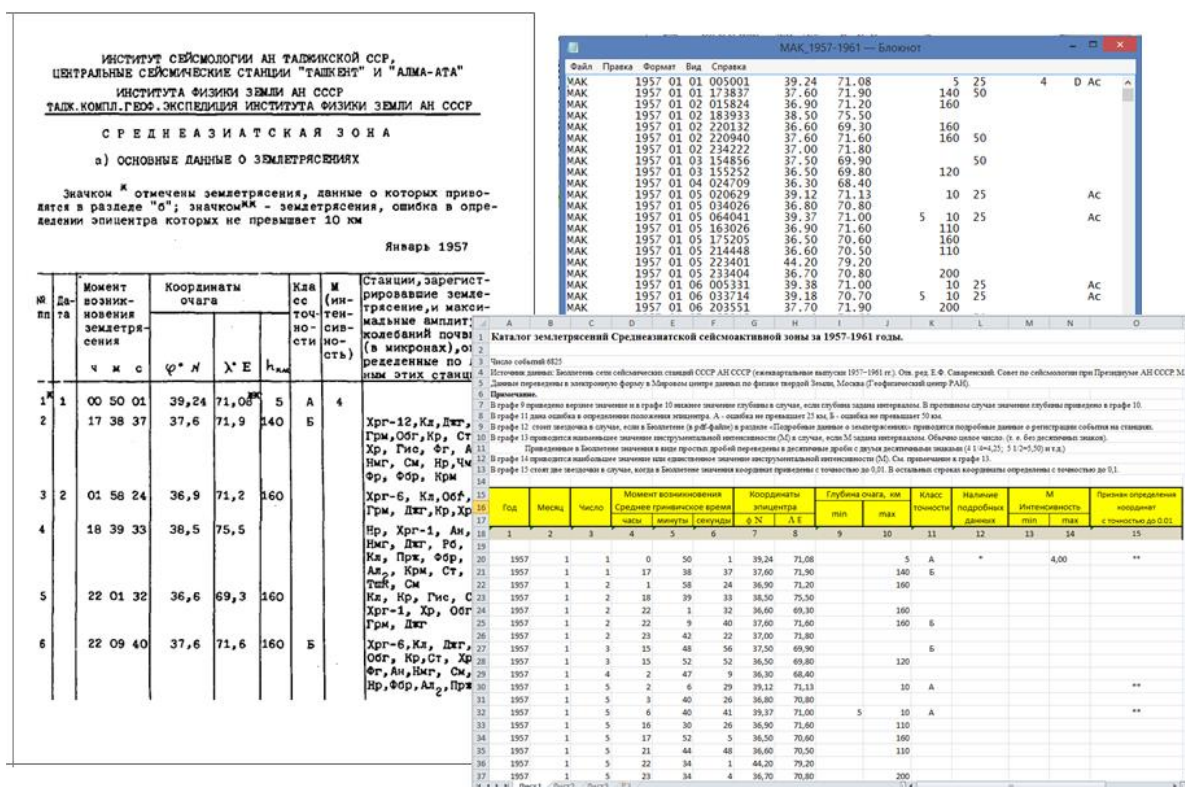


Рисунок 4.2 – Фрагменты каталога землетрясений в Среднеазиатской сейсмоактивной зоне в трех разных форматах: PDF, XLSX и TXT

В 2024 году на сайте «Арктика – Антарктика. Геофизические данные» в разделе «Арктика. Свойства литосферы» опубликованы новые данные о литосфере северной части РФ, включая всю арктическую зону: модель глубины точки Кюри, степень деплетированности и температура в верхней мантии, средняя эффективная радиогенная теплогенерация в верхней части литосферы для Арктической зоны РФ, Сибири и Дальнего Востока. Авторы д-р физ.-мат. наук М. К. Кабан и канд. физ.-мат. наук Р. В. Сидоров.

Для каждого набора данных создана интернет-страница, содержащая описание данных и моделей, методов, использованных для их получения, карты, построенные по результатам исследования (рис. 4.3), список литературы, описание формата данных и ссылку на данные, находящиеся на сервере МЦД http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_lithosphere.ru.html.

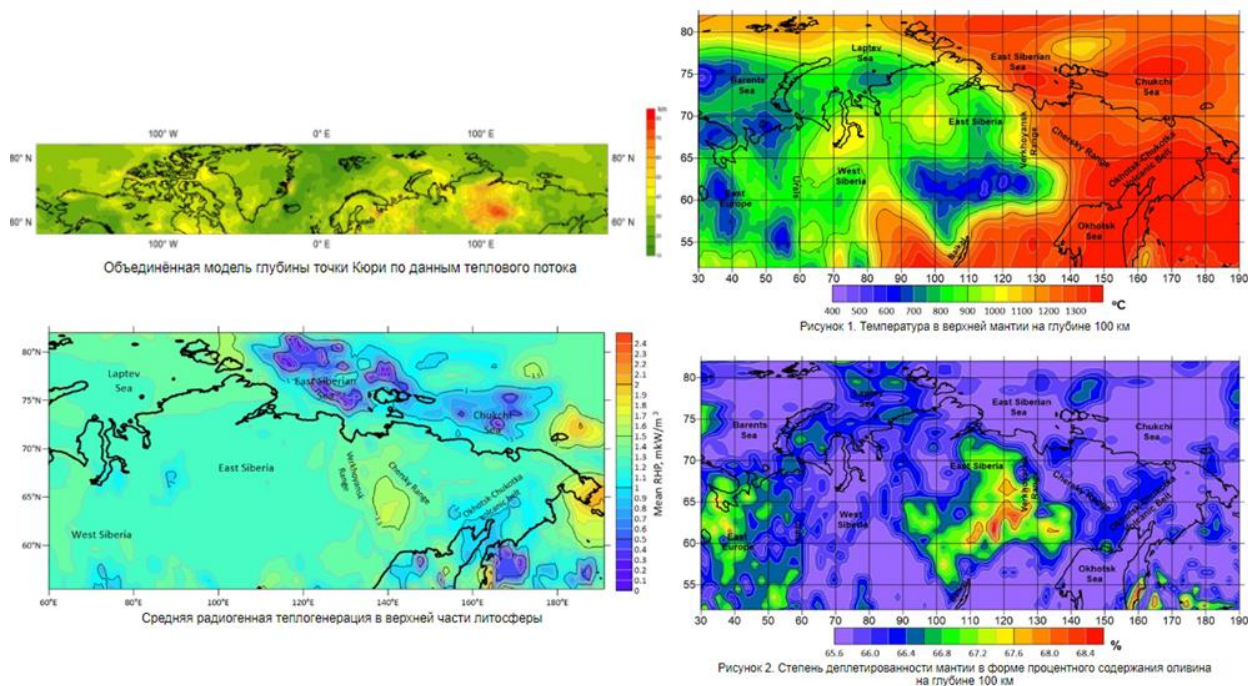


Рисунок 4.3 – Модели, построенные по новым данным о литосфере северной части РФ, включая всю арктическую зону, размещенные на интернет-страницах тематического сайта «Арктика – Антарктика. Геофизические данные» в 2024 году

4.1.4 Расширение центрального репозитория «Базы данных по наукам о Земле»

В Геофизическом центре РАН реализуется проект «База данных по наукам о Земле» / «Earth Science DataBase» (ESDB) по созданию современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier) через агентство Crossref. Созданная «База данных по наукам о Земле» обеспечивает возможность цитирования данных с использованием DOI. Включение данных с DOI в различные индексные системы имеет важное значение для повышения эффективности использования данных, развития культуры цитирования, усиления требований к качеству производимых данных.

В 2024 году в центральный репозиторий ESDB были добавлены описания и опубликованы с присвоением DOI 5 годовых наборов минутных значений компонент X, Y, Z и полной интенсивности F магнитного поля Земли от геомагнитной обсерватории Санкт-Петербург и 7 баз данных, в их числе «Обобщенный массив геолого-геофизической информации для восточного сектора Российской Арктики» и базы данных об эволюции смещений и деформаций в отношении землетрясений в Эгейском море в 2010–2023 гг. <https://esdb.wdcb.ru/doi/2024.html>.



4.2. Интерактивная сферическая визуализация данных

В 2024 году выполнялись задачи по формированию контента интерактивной сферической визуализации (ИСВ) посредством адаптации (обработки) геопространственных данных с совокупным развитием поддерживающего методического и программно-аппаратного обеспечения, а также апробацией последнего в рамках авторских продуктов программно-аппаратной экосистемы «ORBUS».

4.2.1 Разработка контента ИСВ и связанных пользовательских функций

4.2.1.1 Методика формирования контента ИСВ

Предложена шестиэтапная методика формирования единиц контента, в результате последовательного выполнения шагов которой идея визуализации воплощается в законченный слайд ИСВ:

1. Поиск исходных данных.
2. Систематизация набора исходных данных.
3. Преобразование картографических форматов данных под входные форматы систем.
4. Предварительная визуализация.
5. Повышение информативности и когнитивности визуализации.
6. Повышение читаемости визуализации и сопряжение с дополнительными графическими материалами.

На первоначальном этапе поиска исходных данных определяются требования к формируемому слайду и производится итеративный (до удовлетворения поставленным условиям) атрибутивный или семантический поиск, исходя из типа источника. На втором этапе совокупный набор источников систематизируется методом извлечения и организации пространства признаков, например, на основе метаданных или включения классификационных меток, требуемого объема работ и др. На третьем этапе определяются шаги преобразования входных данных в базовый (внутренний) формат системы ИСВ, т. к. любая реализация поддерживает ограниченное количество растровых и векторных картографических форматов из множества существующих на сегодняшний день. Отформатированные на предыдущем этапе данные передаются в графический конвейер с целью построения 3D образа. Ввиду того что подавляющее большинство устройств видеовывода систем ИСВ являются растровыми (матричными), то, в конечном счёте, входные данные любого формата растеризуются необходимым для системы образом. Полученная предварительная ИСВ требует комплексной работы, что описано в двух последующих этапах. Так, на этапе повышения информативности и когнитивности визуализации вырабатывается баланс количества и содержания одномоментно отображаемой информации, что непосредственно влияет на адекватность восприятия ИСВ,

а также вводятся шкалы условных картографических знаков (цветов) и пользовательские сценарии интерактивного взаимодействия. На финальном этапе производится техническая доработка (корректировка) карт и составляющих их знаков; при этом для демонстрационной привлекательности и адаптации под целевую аудиторию ИСВ сопрягается с дополнительными графическими материалами, как значок, схема-описание, сопроводительная презентация, 3D-модели и др.

4.2.1.2 «База сферических визуализаций: Антропосфера», автоматизированный механизм построения легенд векторных карт

На основе статистических данных «World Population Prospects» сформирована «База сферических визуализаций: Антропосфера» (свидетельство о гос. регистрации БД № 2024625449 от 25.11.2024), заключающая статичные и видеоанимационные (с шагом в год) карты, отражающие параметры человеческой популяции с 1950 по 2022 гг., в дополнении с сопроводительными научно-художественными материалами на русском и английском языке в формате PDF: легенда (или схема-описание) и значок карты, а также справочная презентация с иллюстрациями (рис. 4.4).

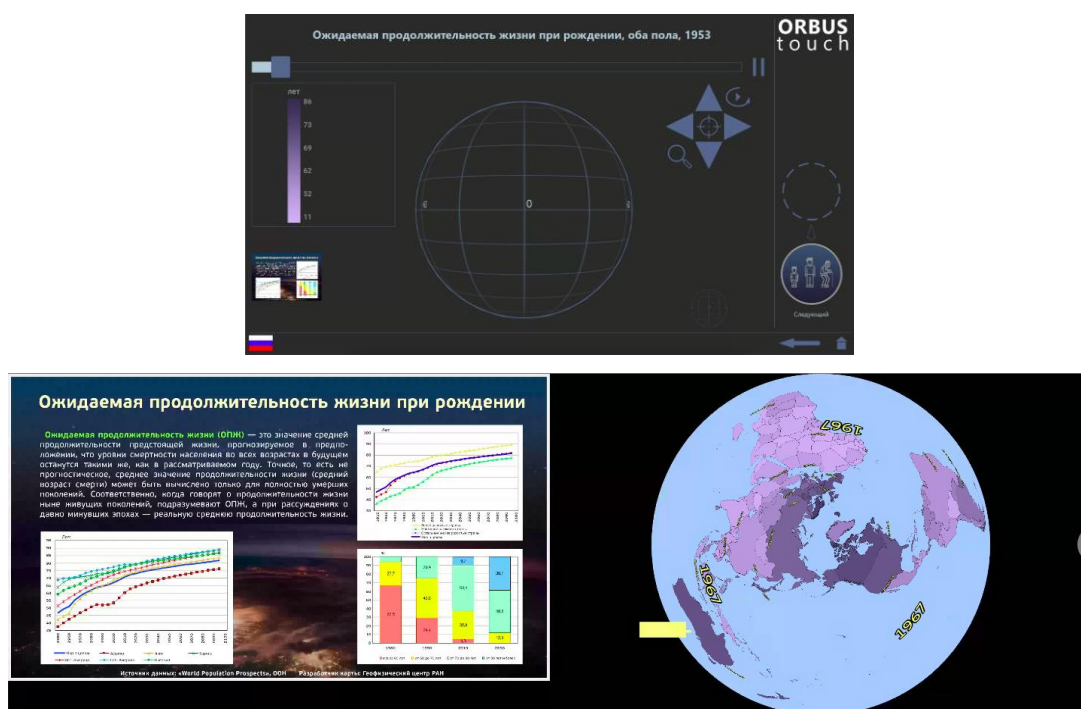


Рисунок 4.4 – Пример визуализации слайда «Ожидаемая продолжительность жизни» в трёхколонном режиме ПО «ORBUS Touch»: вверху – сенсорная панель для управления слайдом, где отображаются расширенное (анимированное в привязке к временной метке) название, легенда карты, превью презентации, а также значки последующего и предыдущего слайдов; снизу слева – справочная презентация с иллюстрациями; снизу справа – визуализация карты в специальной азимутальной проекции для АПК ORBUS

При формировании раздела важную роль сыграло внедрение автоматизированного механизма построения легенд векторных карт. Быстрое создание и редактирование таких



легенд опирается на стандартизованное параметрическое описание в XML-формате (рис. 4.5).

```
<element>
  <label>0 см</label>
  <symbol color="#3c04a6" style="esriSFSSolid">
    <outline color="0.0 0.0 0.0 1.0" style="esriLSSolid" width="1"></outline>
  </symbol>
  <value>0</value>
  <labelENG>0 sm</labelENG>
</element>
<element>
  <label>10 см</label>
  <symbol color="#854bf2" style="esriSFSSolid">
    <outline color="0.0 0.0 0.0 1.0" style="esriLSSolid" width="1"></outline>
  </symbol>
  <value>10</value>
  <labelENG>10 sm</labelENG>
</element>
```

Рисунок 4.5 – описание легенды в XML-формате

4.2.1.3 «База сферических визуализаций: Астрономия. Спутники планет и другие астротела», внедрение технологии дополненной реальности

Созданная «База сферических визуализаций: Астрономия. Спутники и другие астротела» (свидетельство о гос. регистрации БД № 2024625448 от 25.11.2024) отражает материалы об известных и открытых на текущий момент, а также наиболее полным образом отснятых во время космических миссий спутников, астероидов и карликовых планет (рис. 4.6).

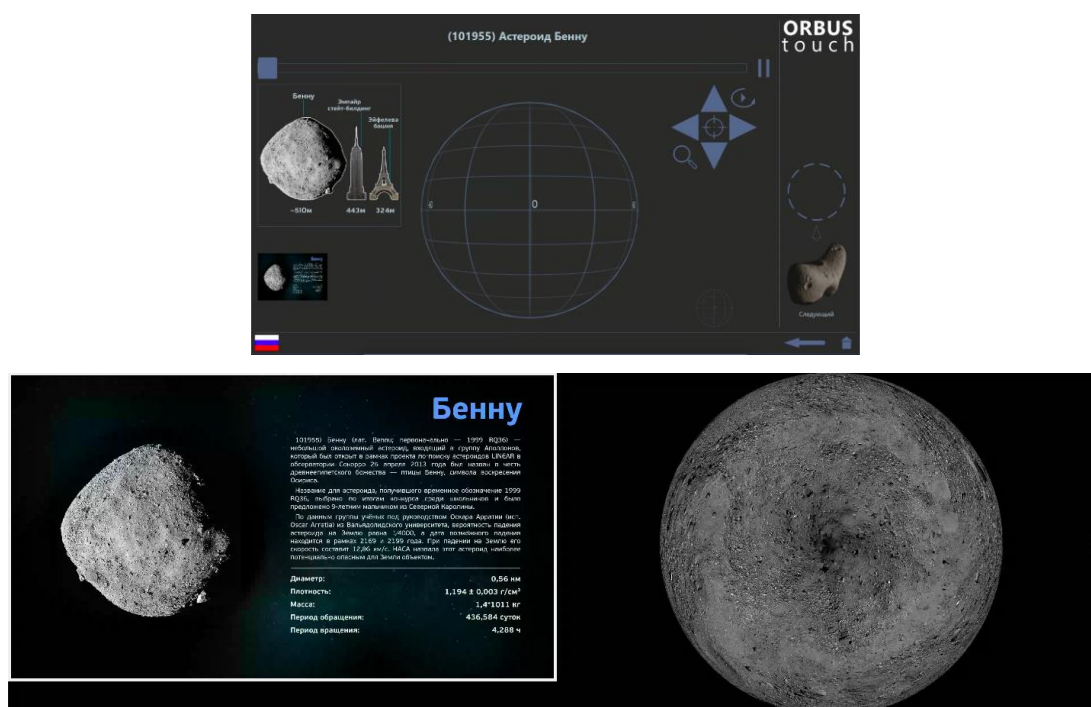


Рисунок 4.6 – Пример визуализации слайда «Астероид Бенну» в трехконном режиме ПО «ORBUS Touch»

Поскольку ряд форм астрономических тел не всегда может быть органично вписан в сферу, применяется комбинированная (2D / 3D в континууме «виртуальность-реальность») визуализация. Установив авторское приложение дополненной реальности «ORBUS AR» на смартфон, планшетный ПК или очки дополненной реальности, при наведении камеры устройства на ИСВ на переднем (виртуальном) плане экрана появляется 3D модель исследуемого объекта, доступная для просмотра с разных ракурсов (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Визуализация слайда «Астероид Бенну» в дополненной реальности посредством ПО «ORBUS AR»

4.2.2 Развитие функционала семейства программ «ORBUS»

4.2.2.1 Подсистема модульного тестирования СУБД «ORBUS»

С ростом количества функций СУБД «ORBUS» непременно возрастает количество ошибок выполнения, во избежание чего создана подсистема модульного тестирования (от англ. Unit Testing) на основе языка программирования Python и библиотеки pytest. Подсистема тестирования охватывает процедуры создания, удаления, переименования, перемещения, поиска слайдов и их групп (рис. 4.8). Для каждой процедуры создан собственный сценарий тестирования.



```

===== test session starts =====
platform win32 -- Python 3.11.4, pytest-8.3.3, pluggy-1.5.0 -- E:\Work\python\dbutils\venv\Scripts\python311.exe
cachedir: .pytest_cache
rootdir: E:\Work\python\dbutils
collected 6 items

test/test_items.py::test_groupCreate PASSED [ 16%]
test/test_items.py::test_slideCreate PASSED [ 33%]
test/test_items.py::test_slideRename PASSED [ 50%]
test/test_items.py::test_groupRename PASSED [ 66%]
test/test_items.py::test_slideRemove PASSED [ 83%]
test/test_items.py::test_groupRemove PASSED [100%]

===== warnings summary =====

```

Рисунок 4.8 – Подсистема модульного тестирования СУБД «ORBUS»

4.2.2.2 Стандартизация событий «ORBUS Sensor»

Подсистема тактильного взаимодействия с ИСВ «ORBUS Sensor», заменяющая манипуляторы – традиционные устройства ввода ЭВМ, дополнена передачей стандартизованных событий:

1. перемещение – move (d_lon, d_lat);
2. нажатие – press (lon, lat);
3. отпускание – release ().

Каждое из событий сопряжено с временной меткой для точной синхронизации сценариев подсистем. Точка возникновения события описывается не в локальной СК порта просмотра камеры, как ранее, а широтой и долготой 3D образа. Для перехода к сферической (географической) СК учитывается закон проекции объектива: функция вычисления зенитного угла в сферической СК приведена на рисунке 4.9.

```

def thetaCalc(self, pt):
    r = (pt-self.center).r()
    lenseAng = self.orthoTransform(r)
    d = sqrt(pow(self.normSphereR,2) - pow(self.normCollarR,2))
    f = d * sin(lenseAng)
    e = d * cos(lenseAng) + sqrt(pow(self.normSphereR,2) - f*f)
    l = e * cos(lenseAng)
    h = e * sin(lenseAng)
    z = l - d
    return degrees(atan2(h, z))

```

Рисунок 4.9 – Функция вычисления зенитного угла в сферической СК

4.3 Геологические исследования по циклостратиграфии

4.3.1 Введение

Обобщены данные по циклостратиграфии относительно глубоководных отложений конкского региояруса неогена Восточного Паратетиса на примере разреза горы Зеленского [Rostovtseva, 2024]. В ходе полевых исследований, проводимых совместно специалистами

Геофизического центра РАН и Института геологии имени А. Джанелидзе (Грузия), собран первичный фактический материал по конкским отложениям Восточной Грузии (разрез Уджарма) для определения астрономической цикличности и магнитостратиграфии рассматриваемых толщ. Выявлены фациальные условия накопления изучаемых отложений. Результаты исследований позволят провести широкие межрегиональные сопоставления в пределах Причерноморья на основе трансгрессивных этапов развития Восточного Паратетиса.

4.3.2 Результаты циклостратиграфических исследований

Ранее были получены данные по циклостратиграфии конкских отложений разреза горы Зеленского, расположенном на черноморском побережье Таманского полуострова [Rostovtseva, 2024].

В ходе циклостратиграфических исследований установлено, что магнитная восприимчивость (K) пород изучаемых отложений характеризуется значениями от 0.06 до $0,24 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ (в среднем $0,15 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ). Основным носителем намагниченности в описываемых конкских породах является магнетит. Спектральный анализ эквидистантных рядов данных магнитной восприимчивости пород конкских отложений позволил выявить два резко выраженных пиковых значения. Среди них выделяется пик, который превышает интервал спектральных шумов с 99%-ным уровнем доверия на REDFIT периодограмме, что указывает на высокую степень достоверности выявленного циклического колебания. Этот пик отвечает циклу протяженностью 3,3 м. Другое пиковое значение, превышающее интервал спектральных шумов с 95%-ным уровнем доверия на REDFIT периодограмме, соответствует циклу длиной 14,3 м. Отношение установленных циклов длиной 3,3 и 14,3 м составляет 1:4 (1:4,3), что соотносится с долгопериодными колебаниями инсоляции около 100 и 400 тыс. лет. Осадконакопление было представлено осаждением глинистых и карбонатных отложений.

В рамках выполнения задач ГосЗадания, поставленных в 2024 году, были проведены циклостратиграфические исследования конкских отложений Восточной Грузии с целью осуществления региональных сопоставлений. Изучение проводилось в полевых условиях (гнс Ростовцева Ю. В., снс Кудашин А. С.). Основным объектом работ являлся разрез Уджарма (Кахетия), расположенный в 40 км на северо-восток от г. Тбилиси, где вскрываются сармат-конкские отложения миоцена мощностью около 80–90 м (рис. 4.10). Эти отложения ранее циклостратиграфическими методами не изучались. Эти исследования

проводились совместно со специалистами Института геологии имени А. Джанелидзе (Грузия) в рамках научного сотрудничества.

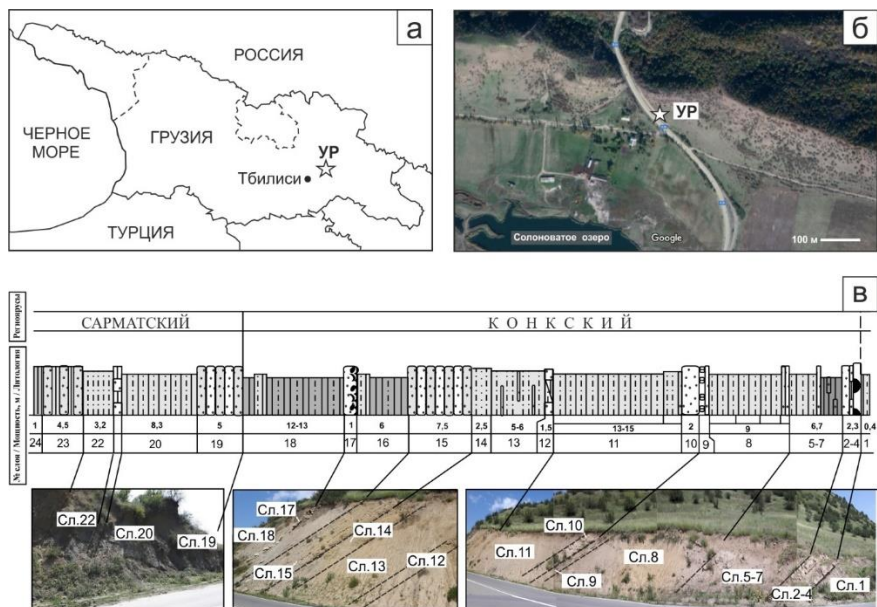


Рисунок 4.10 – Литологическое строение сармат-конкских отложений миоцена, вскрываемых в разрезе Уджарма (Восточная Грузия, Кахетия). УР – разрез Уджарма. Расположение разреза Уджарма на схеме (а) и карте (б), литологическая колонка изучаемых отложений (в)

Установлено, что магнитная восприимчивость (K) изучаемых пород характеризуется значениями от $0,103$ до $0,387 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. В ходе работ впервые было составлено детальное послойное описание сармат-конкских отложений, вскрытых в разрезе Уджарма. Циклостратиграфические исследования сопровождались выполнением фациального анализа толщ, что необходимо для определения обстановок седиментации. В рассматриваемых толщах по генетическим признакам отложений и парагенезу основных литотипов пород выделено восемь основных фациальных типов осадков, свойственных обстановкам осадконакопления с волновым и подводно-флювиальным режимами седиментации.

4.3.3 Заключение

В период 2023–2024 гг. в результате проведения геологических исследований по циклостратиграфии миоцена Восточного Паратетиса выявлено наличие в изучаемых относительно глубоководных отложениях валидной записи астрономической цикличности, отражающей колебания инсоляции в прошлом. В конкских толщах определен цикл длиной 3,3 м, длительность которого в относительно глубоководных отложениях сопоставляется

с долгопериодными колебаниями инсоляции около 100 тыс. лет. Для сравнительного анализа разнофациальных толщ и проведения межрегиональных сопоставлений по циклостратиграфии в 2024 году также проведены полевые исследования мелководно-морских отложений среднего миоцена (сармат-конкского возраста) в пределах Восточной Грузии (разрез Уджарма).

4.4 Уточнение основных параметров (гипоцентр, магнитуда) раннеинструментальных землетрясений Кавказа

За отчётный период был составлен исторический обзор развития инструментальных наблюдений на Кавказе в первой половине XX в. Описаны этапы развития сейсмических наблюдений, включая трудности, возникшие в период Первой мировой войны и Гражданской войны, и последующее восстановление сейсмической службы в СССР. Обобщена информация о первых сейсмических станциях Кавказа, их аппаратуре и роли в изучении сейсмичности региона. Сейсмические станции первой половины XX в. позволили получить первые данные о сейсмичности региона, которые внесли важный вклад в изучение сейсмической опасности Кавказского региона и обеспечение сейсмостойкого строительства на его территории; в исследования причин и условий возникновения землетрясений на Кавказе с целью поиска предвестников разрушительных землетрясений; в изучение внутреннего строения региона.

Можно выделить несколько этапов в развитии инструментальных наблюдений Кавказа. Первый этап – конец XIX в. до 1909 г., к концу которого на Кавказе функционировало 10 сейсмических станций. Однако инструментальные наблюдения сейсмических станций не сыграли существенной роли в изучении сейсмичности Кавказа. Все типы использующихся маятников (Ребёр-Пашвица, Элерта, Цельнера–Репсольда–Левицкого, Милна, Боша–Омори) имели малое затухание, в связи с чем их собственные движения не позволяли достаточно точно определить на записи моменты вступления сейсмических волн, особенно от удалённых землетрясений.

Второй этап – с 1910 по 1914 г., когда Б. Б. Голицыным был реализован проект новой сейсмической службы в России и установлена более совершенная аппаратура собственной разработки. На Кавказе в этот период были оснащены новой аппаратурой станции 1-го класса «Тифлис» и «Баку» и переоборудованы функционирующие кавказские сейсмические станции 2-ого класса.



Третий этап – с 1915 по 1921 г. характеризуется значительным упадком инструментальных наблюдений на Кавказе из-за Первой мировой и Гражданской войн. В этот период связь между ПЦСК и станциями прерывается, прекращается предоставление станциям денежных средств и необходимых для их деятельности электроэнергии, фотобумаги, реактивов и т. п.

Четвёртый этап – с 1922 по 1940 г. характеризуется восстановлением инструментальных наблюдений на Кавказе. Новые и восстановленные сейсмические станции в 1940 г. положили начало не только регулярным сейсмологическим наблюдениям на Кавказе, но и явились основой для создания кавказской региональной стационарной сейсмической сети.

Пятый этап – с 1941 по 1944 г. связан с очередным упадком инструментальных наблюдений на Кавказе из-за Великой Отечественной войны. Прекратили работу станции в Грозном, Пятигорске и Баку. Из-за недостатка фотобумаги грузинская сеть перешла на механическую регистрацию сейсмографами Боша-Омори.

В период шестого этапа с 1945 по 1948 г. вновь оживляется деятельность сейсмических станций на Кавказе: возобновляют работу станции, усовершенствуются приборы, методы анализа и интерпретации сейсмических наблюдений. Однако катастрофическое Ашхабадское землетрясение 1948 г. выявило большие недостатки в существующей в СССР системе сейсмических наблюдений. Поэтому после 1948 г. развитие инструментальных сейсмических наблюдений проходило под воздействием последствий катастрофического Ашхабадского землетрясения. С этого времени на Кавказе начнётся новый этап развития инструментальных наблюдений, в котором значительно увеличится число сейсмических станций, и они будут оснащаться более совершенной сейсмической аппаратурой.

Были описаны исходные данные и методы расчёта основных параметров раннеинструментальных землетрясений Кавказа. Были получены предварительные сведения о землетрясениях Кавказа, зарегистрированных за период с 1900 по 1920 г. и эпицентры которых располагаются в пределах координат: по широте от $41,0^\circ$ до $44,5^\circ$ с. ш.; по долготе от $38,0^\circ$ до $49,0^\circ$ в. д. Для двух землетрясений (Шемахинского 1902 г. и Тебердинского 1905 г.) производился поиск времен вступлений в бюллетенях сейсмических станций, функционировавших в начале XX в. Процедура уточнения проводилась с использованием современной глобальной скоростной модели ak135 и нового



алгоритма локации программы NAS (New Association System), основанный на комбинации двух методов – максимизации рейтинговой функции на сетке и минимизации невязки оценки времени в очаге.

Были получены уточненные параметры гипоцентров рассматриваемых землетрясений и оценена магнитуда по инструментальным данным для Шемахинского землетрясения (табл. 4.3). Также для Шемахинского землетрясения были получены новые сведения об афтершоках, произошедшие в первые трое суток (табл. 4.4).

Таблица 4.3 – Вычисленные параметры Шемахинского землетрясения 13 февраля 1902 г. и Тебердинское землетрясения 21 октября 1905 г.

Дата дд.мм.ггг г	Время чч:мм:сс,0	Гипоцентр			Nст /Nф	Gap °	Эпиц. расст, км	Эллипс ошибок		
		φ,°	λ,°	h, км				AzMajor, °	Rminor, км	Rmajor, км
13.02.1902	09.39:29,8	40,5 3	48,95	10f	3/3	43	513– 2692	0	52,5	252,8
Времена вступлений: TIF: P-09:40:22,0; PAVL: P-09:44:30,0; TTU: P-09:44:36,0										
21.10.1905	11.01:28,4	43,1 7	41,82	35f	19/ 27	218,8	299– 4539	10	24,2	74,7
Времена вступлений: TIF: P-11.02:07.0; DRN: P-11.02:40.0; S-11.03:39.0; HRB: P-11.05:20.0; TRS: P-11.10:01.0; TAS: P-11.06:12.0; CAT: P-11.06:13.0; VEN: P-11.06:10.0; POT: P-11.06:11.0; S-11.10:06.0; RDP: P-11.06:09.0; S-11.10:22.0; LEI: P-11.06:17.0; S-11.10:13.0; MNH: P-11.06:15.0; JEN: P-11.06:20.0; S-11.10:24.0; FIR: P-11.06:29.0; S-11.10:26.0; GTT: P-11.06:30.0; S-11.10:50.0; STR: P-11.06:40.0; S-11.11:08.0; UCC: P-11.06:59.0; KRAR: P-11.13:54.0; SFS: P-11.14:30.0; IRK: P-11.15:30.0;										

Таблица 4.4 – Афтершоки землетрясений 13 февраля 1902 г. за первые трое суток, согласно [Известия...]

Дата	Время	Сейсмические станции, зарегистрировавшие колебания от афтершока
13.02.1902	16:22	Тифлис, Николаевск, Ташкент, Харьков, Юрьев
	17:24	Тифлис
	19:04	Тифлис
	19:44	Тифлис
	21:32	Тифлис
	23:39	Тифлис
14.02.1902	04:29	Тифлис
	05:27	Тифлис
	05:58	Тифлис
	07:02	Тифлис
	20:35	Тифлис
	22:30	Тифлис
15.02.1902	09:09	Тифлис, Николаевск
	10:12	Тифлис, Николаевск, Иркутск
	12:52	Тифлис
	21:38	Тифлис, Николаевск, Иркутск, Юрьев
16.02.1902	18:11	Тифлис



Описанные выше исследования носили в том числе цель проверки применимости для Кавказа разработанных методов, алгоритмов и подходов оценки основных параметров раннеинструментальных землетрясений [Морозов, 2024]. В частности, возникла необходимость создания трёхмерной скоростной модели Кавказа для задачи локации землетрясений. Данная задача будет выполняться в следующий отчётный период.

4.5 Актуализация Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии. Проведение анализа сезонной и межгодовой изменчивости уровня и волнового режима Рыбинского и Краснодарского водохранилищ. Разработка алгоритма идентификации наличия льда на акватории этих водохранилищ, а также климатической изменчивости их ледового режима

4.5.1 Актуализация базы данных спутниковой альтиметрии

В 2024 году осуществлена запись данных спутников Jason-3 и SARAL/AltiKa в исходном формате и переформатирование их в формат Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии (ИБДСА). БД была пополнена также данными спутника SWOT из базы Radar Altimeter Database System (RADS) спутников Дельфского технологического университета. Общий объем данных в архивированном виде составил более 39 Тбайт. Данные ИБДСА активно используются в науках о Земле [Лебедев, 2013], в частности для исследования сезонной и межгодовой изменчивости уровня, значимых высот волн и скоростей приводного ветра как Мирового океана, так и внутренних водоемов России. Климатические изменения этих параметров состояния морской среды приводят к возникновению различных неблагоприятных ситуаций для жизнедеятельности и здоровья человека.

4.5.2 Проведение анализа сезонной и межгодовой изменчивости уровня и волнового режима Рыбинского и Краснодарского водохранилищ

Для исследования изменчивости уровня Рыбинского водохранилища подходят только данные альтиметрических измерений вдоль 059 и 066 трека спутников Т/Р и J1/J2/J3. Данные спутниковой альтиметрии обрабатывались алгоритмом регионального адаптивного ретрекинга [Троицкая и др., 2012; Шевякова, Лебедев, 2019; Troitskaya et al., 2012; Troitskaya et al., 2013; Lebedev et al., 2015; Lebedev et al., 2020] на основании упрощённой кусочно-постоянной модели подстилающей поверхности. Необходимость использования данного алгоритма обусловлена сложностью формы отражённого импульса при осреднении

данных вдоль трека за один проход. Верификация результатов расчёта уровня Рыбинского водохранилища проводилась по данным гидропоста (<http://gis.water.ru>), расположенного в верхнем бьефе водохранилища. Несмотря на сильный разброс аномалий уровня воды по данным гидропоста и расчётам по альтиметрическим измерениям коэффициент корреляции между ними составляет 0,9534.

По данным спутниковой альтиметрии максимальная средняя высота сезонных колебаний уровня Рыбинского водохранилища наблюдается в мае 101,78 м, что на 2 см ниже нормального подпорного уровня, а минимальная – в марте 99,59 м, что на 2,68 м выше уровня мёртвого объёма (96,91 м) (рис. 4.11).

Результаты расчётов по данным спутниковой альтиметрии показывают, что межгодовая изменчивость уровня Рыбинского водохранилища за период с 1992 по 2024 гг. составила $+2,7 \pm 0,12$ см/год, что соответствует режиму безопасной эксплуатации водохранилища. Наиболее низкие значения уровня наблюдались в 1992 – 99,16 м, 1996 – 98,09 м, 2003 – 98,18 м, 2014 – 98,44 м и 2023 – 99,69 м. (рис. 4.12).

Рыбинское водохранилище, относящееся к озеровидным водоёмам, имеет значительные разгоны волн для большинства направлений ветра, а повышенная скорость ветра и частая его повторяемость создают благоприятные условия для развития волнения.

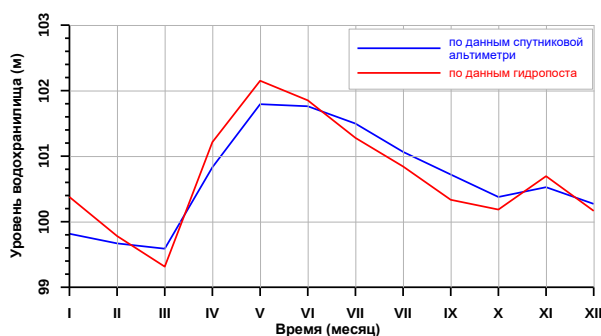


Рисунок 4.11 – Сезонная изменчивость аномалий уровня Рыбинского водохранилища по данным альтиметрических измерений и данным гидропоста, расположенного в верхнем бьефе водохранилища

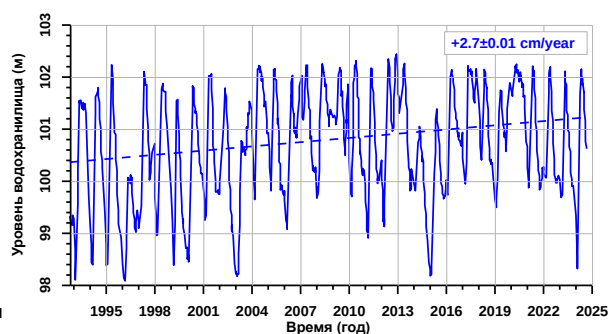


Рисунок 4.12 – Изменчивость уровня Рыбинского водохранилища по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/J2/J3, обработанных алгоритмом адаптивного регионального ретрекинга

В настоящее время инструментальные измерения параметров ветровых волн на акватории Рыбинского водохранилища носят эпизодический характер. На сегодняшний день единственным источником регулярной информации о волновом режиме внутренних



водоёмов является спутниковая альтиметрия, которая даёт информацию о значимых высотах волн или средней высоте 1/3 наибольших волн (Significant Wave Height – SWH) [Симонян и др., 2015] в точке на треке при измерении в надир [Satellite..., 2001]. Точность измерения значимых высот волн по данным спутниковой альтиметрии составляет от 5.4% до 7.8% [Abdalla, Janssen, 2017].

Анализ распределений SWH за безледоставный период для каждого месяца показывает, что среднесезонная за период с 1993 по 2024 годы значимая высота волн падает от 1,42 м в мае до 1,24 м в июле, а затем растёт до 1,47 м в октябре. За весь безледоставный период с 1993 по 2024 годы наблюдаются отрицательные межгодовые скорости изменения значимых высот волн. Она равномерно падает с $-0,043$ м/год в мае до $-0,073$ м/год в октябре.

Для исследования изменчивости уровня Краснодарского водохранилища подходят только данные альтиметрических измерений вдоль 118 трека спутников Т/Р и J1/J2/J3.

Исследование средней сезонной изменчивости уровня Краснодарского водохранилища за 2002–2023 гг. (рис. 4.13) также показывает хорошее соответствие данных прямых измерений на гидропосте, расположенного в верхнем бьефе водохранилища, и данных дистанционного зондирования.

Максимальный среднесезонный уровень воды в водохранилище по данным прямых измерений на гидропосте и данным дистанционного зондирования наблюдается в апреле (более 2,4 м), а минимальный – в августе и сентябре (менее 2,4 м) (рис. 4.13). Разница средней за данный временной интервал сезонной изменчивости уровня водоёма между данными измерений на гидропосте и данными спутниковой альтиметрии составляет 15,36 см.

Результаты расчётов показывают, что межгодовая изменчивость уровня Краснодарского водохранилища за период с 1992 по 2024 гг. составила $-4,97 \pm 0,02$ см/год, что соответствует режиму безопасной эксплуатации водохранилища. Наиболее низкие значения уровня наблюдались в 1996 – 228 м, 1999 – 226 м и 2023 – 228 м. Сильное падение уровня в 2023 году вызвало сбои в водоснабжении городского и сельского хозяйства, а также осушении обширных участков водохранилища (рис. 4.14).

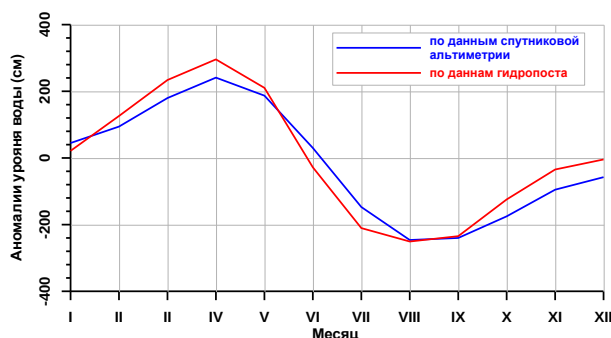


Рисунок 4.13 – Сезонная изменчивость аномалий уровня Краснодарского водохранилища по данным альтиметрических измерений и данным гидропоста, расположенного в верхнем бьефе водохранилища

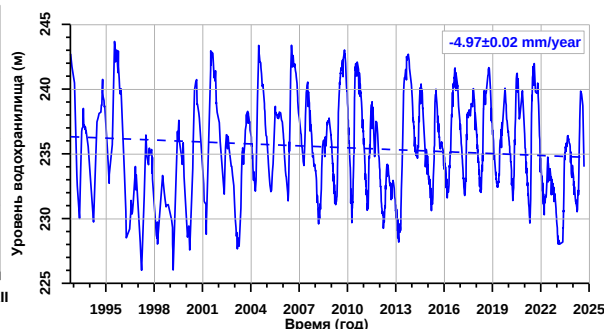


Рисунок 4.14 – Изменчивость уровня Краснодарского водохранилища по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/J2/J3, обработанных алгоритмом адаптивного регионального ретрекинга

Расчёт уровня воды в Краснодарском водохранилище по данным спутниковой альтиметрии в полной мере соответствует измерениям уровня водоёма на гидропосте, расположенном в верхнем бьефе. Предлагаемый подход позволяет проводить независимый мониторинг изменчивости уровня водохранилища, а, следовательно, и следить за безопасностью его эксплуатации.

4.5.3 Разработка алгоритма идентификации наличия льда

Разработанные в 2022 и 2023 годах алгоритмы идентификации ледяного покрова по данным СВЧ-радиометра, ориентированного в надир, хорошо зарекомендовали при исследовании ледового режима крупных водоёмов. Однако они хорошо работают только когда ледовой покров занимает площадь, соизмеримую с длиной трека, вдоль которого проводятся СВЧ-измерения.

На этом этапе исследования проведена классификация форм отражённого импульса на три класса: лёд, вода–лёд, вода. В качестве предикторов классификации предлагалось использовать 2 параметра: интеграл свёртки нормированной мощности S и ширину аппроксимации по алгоритму центра тяжести W . Результаты полученной диаграммы рассеяния в фазовом пространстве S и W для отражённых от зеркала Рыбинского водохранилища импульсов альтиметра представлены на рисунке 4.15 после обработки более 10 000 импульсов. Областью 1 выделены импульсы, соответствующие льду, а область 2 – открытой воде. Использование данного алгоритма для идентификации начала ледоставного периода в совокупности с другими позволит повысить точность расчётов начала, окончания и продолжительности режима ледостава. Примеры форм отражённых

импульсов, соответствующие областям 1 (лёд) и 2 (вода) представлены на рисунке 4.16.

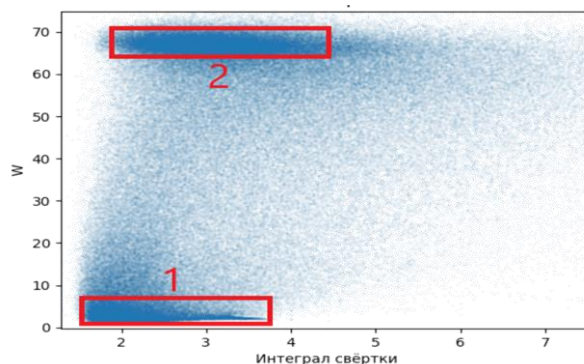


Рисунок 4.15 – Диаграмма рассеяния в фазовом пространстве S и W для отражённых от зеркала Рыбинского водохранилища импульсов альтиметра

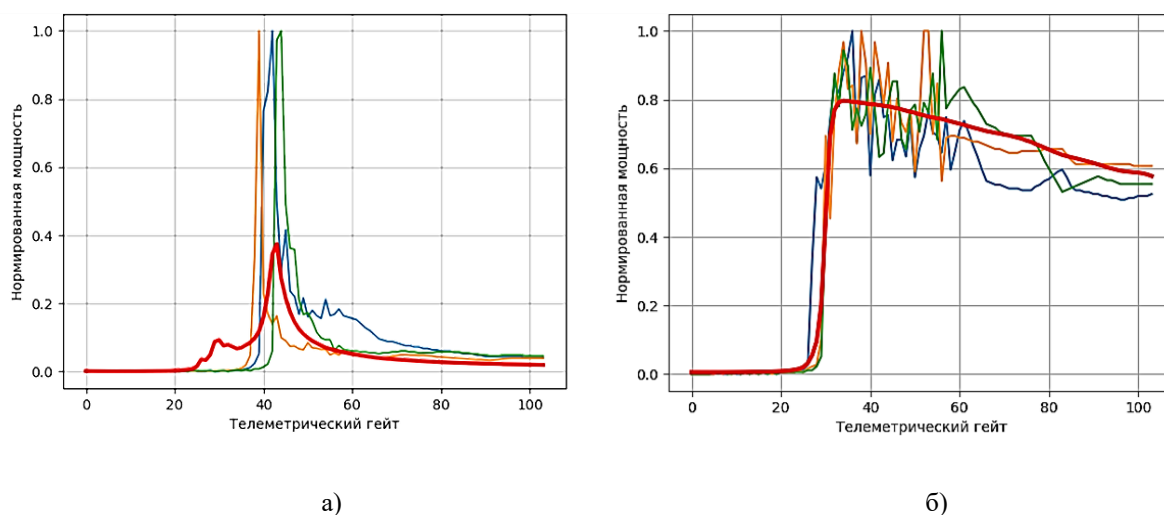


Рисунок 4.16 – Примеры форм отражённых импульсов спутника J2, соответствующие областям льда (а) и воды (б)

Ледовый режим Рыбинского водохранилища наиболее детально исследован по сравнению с другими водохранилищами бассейна Верхней Волги (Верхневолжское, Иваньковское, Угличское, Шекснинское и Горьковское). Исследование ледового режима можно проводить как с помощью методов дистанционного зондирования, так и посредством многолетних наблюдений. Ледовый режим водохранилища не постоянен и может изменяться под действием климатических факторов – изменение температурного режима и атмосферной циркуляции (ветровой режим). Поэтому изменяется время начала, конца и продолжительности ледостава.

Согласно полученным ранее результатам обработки данных спутниковой альтиметрии с 1992 по 2023 годы с учётом нового алгоритма идентификации льда начало ледостава смещается со скоростью $+0,89 \pm 0,05$ дней в год, окончание – смещается со скоростью $-0,78 \pm 0,04$ дней в год, а продолжительность ледостава сокращается со скоростью $-1,54 \pm 0,08$ дней в год.

4.6 Модернизация инфраструктуры ГИС для представления и анализа данных по наукам о Земле

В 2024 году продолжались работы по реорганизации ГИС-инфраструктуры, связанные с переходом на новую программную платформу. В частности, была выполнена модернизация геопортала «Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности».

Одной из важных задач являлось формирование пополняемой базы геопространственных данных, а также создание инструментов их анализа. Данные и сервисы объединялись в среде ГИС средствами веб-ГИС (геопортала). Ранее для создания единой ГИС-среды использовалось программное обеспечение ESRI ArcGIS, включая ArcGIS WebAppBuilder для разработки тематического геопортала с сервисами геообработки. Из-за невозможности дальнейшего использования этой платформы было принято решение разработать новое веб-ГИС приложение для решения поставленных задач. Для работы была выбрана комбинация программного обеспечения Flask, OpenLayers и JavaScript – инструменты, которые часто используются вместе для создания картографических и геоинформационных систем.

Flask представляет собой простой фреймворк для веб-приложений на языке Python [Flask, 2025]. Он позволяет быстро создавать серверную часть приложений, обеспечивать маршрутизацию, работу с базами данных и управление запросами и ответами.

Основной функционал клиентского приложения написан с использованием языка программирования JavaScript. Язык JavaScript имеет богатый экосистемный стек: огромное количество дополнительных библиотек и фреймворков для расширения функционала, таких как, например, React, Leaflet, OpenLayers и др. JavaScript обеспечивает высокую интерактивность пользовательского интерфейса, включая работу с картами в реальном времени.



Отображение картографических данных в веб-ГИС выполнено с использованием одной из дополнительных библиотек JavaScript с открытым исходным кодом – OpenLayers [OpenLayers, 2025], которая предназначена для создания динамических карт в веб-приложениях. Она позволяет визуализировать данные на карте и работать с множеством картографических форматов. OpenLayers поддерживает такие источники и форматы данных, как, например, растровые форматы GeoTIFF протоколы обмена геопоространственными данными WMS, WFS, GeoJSON, KML и др.

Таким образом, совместное использование Flask для серверной части, OpenLayers для отображения карт и JavaScript как основного языка для взаимодействия с картами создает мощную и гибкую платформу для создания ГИС-приложений с расширенным функционалом. Примером созданного приложения на базе такого решения является геопортал «Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности». Для удобства работы с геопорталом составлена инструкция по использованию сервиса, доступная на главной странице. Общую функциональность разработанного геопортала условно можно разделить на три сегмента: тематическая база данных, инструменты работы с картой и инструменты геообработки.

Тематические слои в созданной интерактивной ГИС представляют собой данные, отражающие сейсмические характеристики по различным регионам (рис. 4.17а). Эти слои сгруппированы в категории: калиброванный каталог землетрясений; результаты морфоструктурного районирования, представленные в виде морфоструктурных линеаментов и пересечений морфоструктурных линеаментов с указанием коэффициентов ОЗПЗ (общий закон подобия для землетрясений); FCAZ-зоны мест возможного возникновения сильных землетрясений; коэффициенты ОЗПЗ в узлах регулярной сетки; результаты моделирования динамики блоковой структуры, представленные схемой блоковой структуры и каталогом искусственных землетрясений; результат работы алгоритма «Барьер». В интерфейсе список слоев отображается в виде дерева с возможностью раскрытия групп и выбора каждого слоя по мере необходимости.

Инструменты для работы с картой и данными представлены следующими элементами: «Показать атрибутивную информацию объекта»; «Сброс / Выборка объектов»; «Рисование и измерения на карте»; «Добавить данные на карту». Важным инструментом для работы с картой является «Рисование и измерения на карте». Данный инструмент представляет собой набор нескольких функций рисования и измерений. Каждый объект, нарисованный на карте, добавляется в виде картографического слоя

в панель «Слои». Видимостью нарисованных слоев можно управлять из дерева слоев. В разработанном ГИС-приложении доступны измерения двух типов: длины и площади участка. Измерения происходят в километрах или квадратных километрах соответственно (рис. 4.17б).

Функционал геопортала позволяет добавить на карту пользовательские данные из локального хранилища для работы в сервисе при нажатии кнопки «Добавить данные на карту». Поддерживаются форматы JSON, GeoJSON и шейп-файлы в виде архива ZIP. Такие данные добавятся в дерево доступных слоев с возможностью их удаления из списка. Просмотр и работа с пользовательскими данными доступна только в текущей сессии, по завершении работы с сервисом данные не сохраняются.

Инструменты геообработки изначально были представлены в виде инструментов на языке Python в программной среде Esri ArcGIS [Soloviev et al., 2016; Соловьев и др., 2018а; 2018б]. Для корректной работы в новой версии геопортала программный код и функциональность инструментов были обновлены с использованием языков программирования Python и JavaScript. В настоящее время функционал геопортала включает в себя следующие инструменты геообработки:

Эпицентры землетрясений с магнитудами из заданного диапазона;

Линеаменты, попадающие в область, с указанием их рангов;

Распознанные места возможных сильных землетрясений из множества морфоструктурных узлов согласно методу «ЕРА»;

Распознанные места возможных сильных землетрясений из множества морфоструктурных узлов согласно методу «Барьер»;

Высокосейсмичные 2-D зоны, определенные с помощью системы FCAZ;

Эпицентры искусственных землетрясений с магнитудами из заданного диапазона, принадлежащие области;

Разломы блоковой структуры, принадлежащие области.

Каждый сервис требует выбора рассматриваемой области (области отсечения), в пределах которой запрашиваются необходимые данные и выполняются инструменты. Если результат выполнения успешный – слой добавляется в проект. Для каждого результирующего слоя, добавленного в список, существует функция загрузки архива с результатами работы инструмента геообработки. Если результат представлен векторными данными, то архив будет содержать шейп-файл и файлы с легендой, если результат – изображение, в архиве будет одно растровое изображение в формате GeoTIFF (рис. 4.17в).

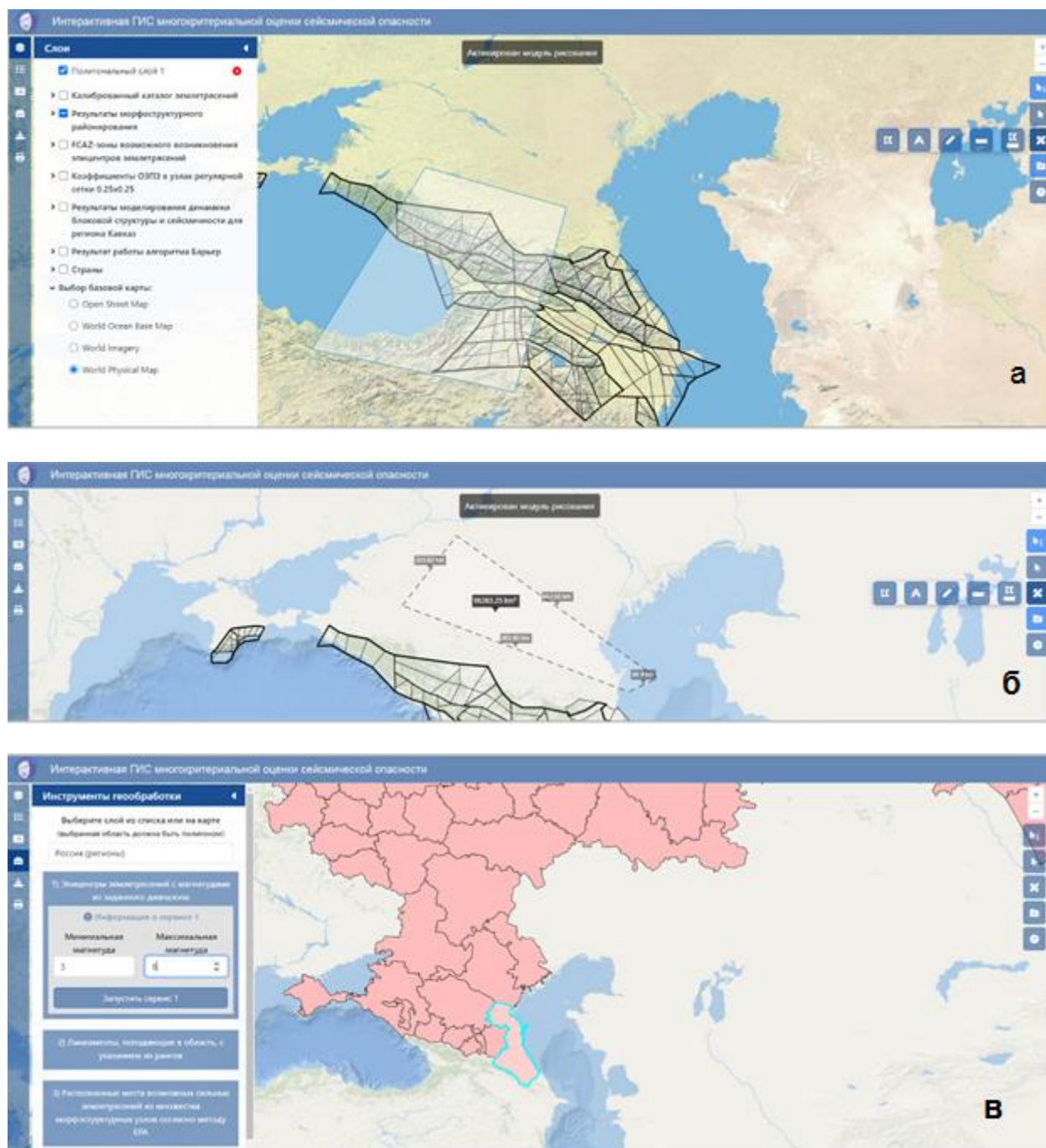


Рисунок 4.17 – Веб-приложение геопортала «Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности»: а) общий вид приложения с перечнем тематических слоев данных и инструментами рисования на карте; б) инструменты измерения площадей и расстояний на карте; в) пример выполнения интерактивного инструмента геообработки «Эпицентры землетрясений с магнитудами из заданного диапазона»

Таким образом, создание тематического геопортала с интеграцией инструментов геообработки обеспечивает централизованный доступ к данным, посвященным оценке сейсмической опасности, их интерактивную визуализацию и автоматизацию обработки прямо в браузере, исключая необходимость скачивания и локальной работы с данными. Поддержка различных типов и стандартов данных позволяет легко интегрировать данные

из различных источников, а доступность геопортала в онлайн-режиме упрощает совместную научную работу.

4.7 Редакционно-издательская деятельность Геофизического центра РАН

Геофизический центр РАН (ГЦ РАН) издает три онлайн-журнала: «Russian Journal of Earth Sciences» (RJES), «Вестник Отделения наук о Земле РАН», и «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН».

Журнал «Russian Journal of Earth Sciences» – RJES, издающийся с 1998 года, публикует статьи на английском языке, посвященные достижениям в геологии, геофизике, геохимии, экологии и физике атмосферы и океана. Публикации в RJES служат важным этапом в документировании научного контента, что является важным вкладом в развитие наук о Земле.

Цель журнала – информировать научное сообщество о ключевых научных результатах, полученных российскими и зарубежными учеными. Все публикации имеют DOI и EDN. Главным редактором с 2017 года является академик РАН А. Д. Гвишиани. Решение о публикации основывается на двух положительных рецензиях, действует одностороннее слепое рецензирование. Наукометрические показатели журнала в базе данных Scopus подтверждают его международный уровень.

Индикаторы журнала в Scopus и SCImago (2019–2023) (рис. 4.18)

2019: Q3 квартиль, CiteScore 0,8, H-index 17.

2020: Q3 квартиль, CiteScore 1,0, H-index 17.

2021: Q3 квартиль, CiteScore 1,6, H-index 19.

2022: Q3 квартиль, CiteScore 2,0, H-index 20.

2023: Q3 квартиль, CiteScore 1,9, H-index 22.

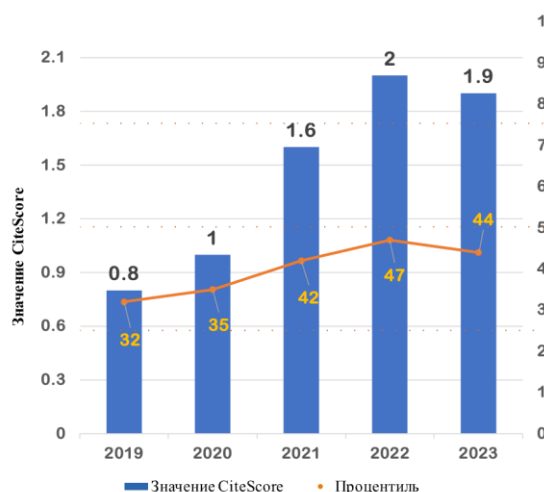


Рисунок 4.18 – График показателей журнала «Russian Journal of Earth Sciences»

С 2014 года RJES индексируется в Web of Science. В 2024 году он был включен в четвертый квартиль (Q4) в области «Науки о Земле, междисциплинарные»,

с импакт-фактором 0,7. Журнал также индексируется в РИНЦ, где занимает 285-е место среди 4838 изданий. В 2024 году был выпущен спецвыпуск «25-летие Российского журнала наук о Земле», который включает статьи ведущих ученых из РАН и МГУ (рис. 4.19).

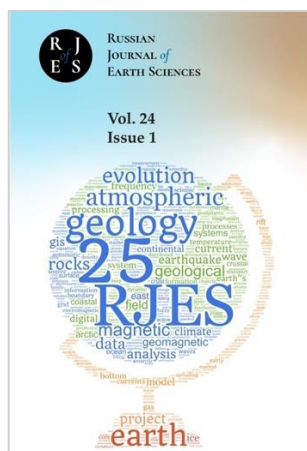


Рисунок 4.19 – Обложка спецвыпуска «25-летие Российского журнала наук о Земле»

Журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» издается с сентября 2009 года в формате электронного мультимедийного издания и публикует новости, связанные с деятельностью Отделения наук о Земле РАН. В журнале освещаются научные конференции, заключения договоров и научные проекты. В 2023 году была добавлена рубрика, посвященная истории Отделения наук о Земле РАН.

Журнал публикует научные статьи, зарегистрированные в Crossref с номерами DOI и индексируемые в РИНЦ. Статьи проходят стандартное рецензирование, за исключением публикаций от членов Российской академии наук.

«Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» – сериальное электронное издание для публикации научных статей, связанных с информационными технологиями в науках о Земле, издается с 2018 года. Это издание охватывает все этапы исследовательской работы, от сбора данных до их анализа и использования в научных исследованиях.

По итогам 2024 года было опубликовано:

- 6 выпусков RJES – 72 статьи, включая спецвыпуск.
- В «Вестнике ОНЗ РАН» – 726 новостных сообщений и 2 научные статьи.
- В «Исследованиях по геоинформатике» – 2 публикации.

Издательская платформа Эдиторум была внедрена в 2021–2022 годах, что значительно улучшило процесс подготовки публикаций и метаданных. В 2023 году был

обновлен сайт журнала (рис. 4.20), улучшена навигация и дизайн, а также переработан шаблон для подготовки статей в LaTeX. Также были зарегистрированы два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ для работы с журналом.

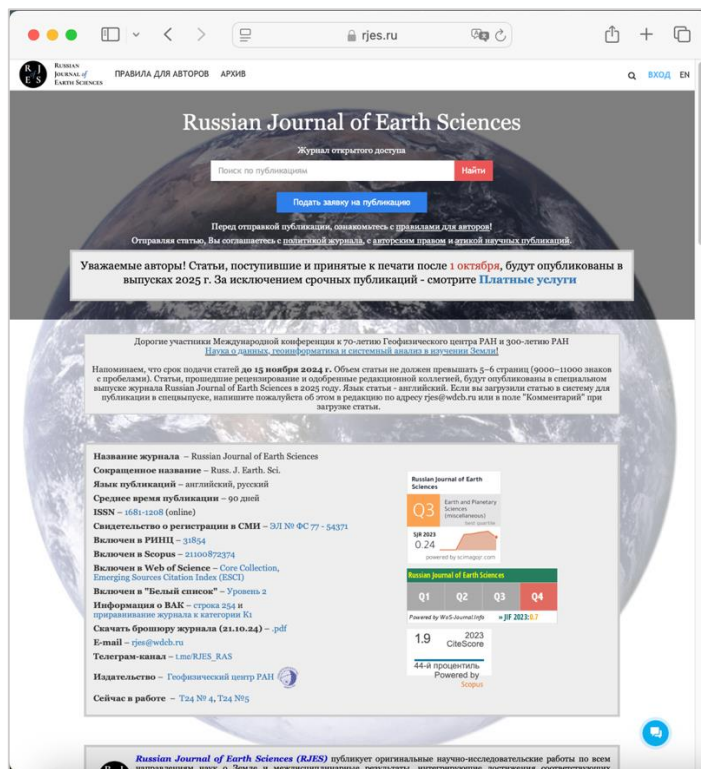


Рисунок 4.20 – Сайт журнала «Russian Journal of Earth Sciences» на издательской платформе Эдиторум

С 2022 по 2024 год роль издательской деятельности ГЦ РАН значительно возросла, и журнал «Russian Journal of Earth Sciences» расширил свое влияние в научном сообществе, показал свою востребованность и стал одним из ведущих изданий в области наук о Земле.

Список использованных источников

Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР, 1911–1957 гг. / ред. Саваренский Е. Ф., Соловьев С. Л., Харин Д. А. – М.: Издательство АН СССР, 1962.

Бюллетень сети сейсмических станций СССР (ежеквартальный), 1957–1961 гг. М.: АН СССР, Совет по сейсмологии, 1958–1964.

Землетрясения в СССР в ... году, (ежегодники 1962–1991 гг.). – М.: Наука, 1964–1997.

Землетрясения Северной Евразии, ... год (ежегодники 1992–2019 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 1997–2023. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/>



(дата обращения: 06.05.2025).

Землетрясения России в ... году, (ежегодники 2003–2022 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2006–2024. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zr/>

(дата обращения: 06.05.2025).

Известия Постоянной центральной сейсмической комиссии. – СПб.: Типография Императорской АН, 1903. – Т. 1. – Выпуск II. – 214 с.

Космические данные. Месячный обзор. 1957–1988 гг. – М.: Наука, 1957–1989.

Лебедев С. А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 3. – С. 33-49.

Морозов А. Н., Ваганова Н. В. Сейсмичность западного сектора Российской Арктики. М.: ИФЗ РАН, 2024. – 240 с. ISBN 978-5-91-682071-3.

Симонян Д. А., Гончаренко А. Д., Пономаренко В. П. Краснодарское водохранилище – «стройка века» // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 4–11 (13). – С. 149–151.

Соловьёв А. А., Краснопёров Р. И., Николов Б. П., Жарких Ю. И., Агаян С. М. Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики // Исследование Земли из космоса. – 2018а. – № 2. – С. 65–76. DOI: 10.7868/S0205961418020070.

Соловьёв Ан. А., Соловьёв Ал. А., Гвишиани А. Д., Николов Б. П., Николова Ю. И. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исследование Земли из космоса. – 2018б. – № 5. – С. 52–64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.

Троицкая Ю. И., Рыбушкина Г. В., Соустова И. А., Баландина Г. Н., Лебедев С. А., Костяной А. Г., Панютин А. А., Филина Л. В. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – № 2. – С. 169–185.

Шевякова О. П., Лебедев С. А. Сезонная и межгодовая изменчивость уровня Краснодарского водохранилища по данным спутниковой альтиметрии // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. – 2019. – № 3. – С. 73–85.

Abdalla S., Janssen P. Monitoring waves and surface winds by satellite altimetry: Applications // Satellite altimetry over oceans and land surfaces / Eds. D. Stammer, A. Cazenave. Boca Raton: CRC press, 2017. – P. 381–426.



- Flask Documentation [Electronic resource] URL: <https://flask.palletsprojects.com> (дата обращения: 29.04.2025).
- Lebedev S. A., Troitskaya Y. I., Rybushkina G. V., Dobrovolsky M. N. Interannual variability of the lake levels in northwest Russia based on satellite altimetry // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. – 2015. – Vol. 365. – P. 91–97. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2267092.
- Lebedev S. A., Shevyakova O. P., Bedanokov M. K. Seasonal and Interannual Variability of the Krasnodar Reservoir Water Level Based on Satellite Altimetry Data // In: The Republic of Adygea Environment. Eds. M. K. Bedanokov, S. A. Lebedev, A. G. Kostianoy. The Handbook of Environmental Chemistry. Cham: Springer, – 2020. – Vol. 106. – P. 525–544. DOI: 10.1007/698_2020_588.
- OpenLayers. [Electronic resource] URL: <https://openlayers.org/> (дата обращения: 29.04.2025).
- Rostovtseva Y. V. The Cyclostratigraphy of the Eastern Paratethys Konkian: Zelensky Section (Taman Peninsula) // Russian Journal of Earth Sciences. – 2024. – No. 1. – P. 1–6. DOI: 10.2205/2024ES000900.
- Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L. L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. – 464 p.
- Soloviev A. A., Zharkikh J. I., Krasnoperov R. I., Nikolov B. P., Agayan S. M. GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform // Russian Journal of Earth Sciences. – 2016. – Vol. 16. – ES6004. DOI: 10.2205/2016ES000587.
- Troitskaya Y., Rybushkina G., Soustova I., Balandina G., Lebedev S., Kostianoy A. Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33. – No. 23. – P. 7559–7578. DOI: 10.1080/01431161.2012.685972.
- Troitskaya Y., Rybushkina G., Soustova I., Lebedev S. Adaptive retracking of Jason-1, 2 satellite altimetry data for the Volga River reservoirs // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 7. – No. 5. – P. 1603–1608. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2267092.



5 Разработка теоретических основ и экспериментальных методик системного анализа для комплексного изучения геофизических, геодезических и метеорологических данных

Шифр темы: FMWG-2022-0008

Регистрационный №: 122080300190-6

Руководитель: в.н.с., к.ф.-м.н. Р.В. Сидоров

5.1 Развитие и техническая поддержка стационарных геомагнитных наблюдений на территории России.

5.1.1 Развитие комплексной геофизической обсерватории «Климовская»

Комплексная геофизическая обсерватория «Климовская» развивается ГЦ РАН с 2012 г. В 2022–2023 гг. произведен ремонт павильонов и заменён векторный магнитометр. С 2022 г. обсерватория регистрирует высококачественные геомагнитные данные, оперативно обрабатываемые системой МАГНУС (<http://geomag.gcras.ru>). Результирующие геомагнитные данные полностью соответствуют международному стандарту ИНТЕРМАГНЕТ. Проводится совместный анализ данных ГНСС и магнитных вариаций.

В мае 2024 г. проведены магниторазведочные работы для выбора места под дополнительный вариометрический павильон. При обработке данных учитывалась солнечно-суточная вариация. Магнитная обстановка во время съемки была спокойной. По результатам съемки было определено оптимальное место для размещения павильона в юго-западной части исследуемой территории, где значения вертикального и горизонтального градиентов не превышают 1 нТл/м, что полностью отвечает требованиям IAGA [Jankowski and Sucksdorff, 1996], и обеспечен хороший обзор для абсолютных измерений.

Кроме магниторазведочных работ в инструментальном павильоне был установлен диффузионный аэрозольный спектрометр ДАС 2702-М российского производства для мониторинга количества и размеров частиц в атмосферном воздухе. В ходе дальнейшего развития измерительной базы обсерватории в декабре 2024 г. был установлен малый метеорологический комплекс МК-26-2. Для соблюдения стандартов наблюдений он был размещен на 10-метровой метеомачте. Измерения передаются в технический павильон обсерватории по протоколу Modbus-RTU, накапливаются и отправляются в центр сбора данных ГЦ РАН.

5.1.2 Развитие магнитной обсерватории «Михнево»

В ходе работ по обеспечению и доведению до уровня качества ИНТЕРМАГНЕТ обсерватории «Михнево» были налажены регулярные абсолютные наблюдения 2–3 раза в неделю. В январе 2024 года был выполнен монтаж и запуск новой системы термостабилизации вариационного павильона. Установленные регуляторы позволили существенно снизить флуктуации температуры, что повысило точность векторных данных, в особенности в периоды между абсолютными наблюдениями. Анализ проведенных за 2024 год измерений показал, что базисная линия достаточно стабильна, вариация не превышает 10 нТл по компонентам X , Y и 5 нТл по компоненте Z . Подготовленные квазиокончателные данные за 2024 год показывают, что обсерватория удовлетворяет минутному стандарту ИНТЕРМАГНЕТ [INTERMAGNET..., 2024], а по некоторым характеристикам даже превосходит. Наблюдения, собранные за 2024 год после обновления системы термостабилизации, в полной мере удовлетворяют требованиям к секундному стандарту.

5.1.3 Изучение характеристик экспериментальных сборных измерительных павильонов для магнитных обсерваторий

В феврале 2024 г. ГЦ РАН исследовал возможность использования алюминиевых и композитных павильонов для магнитных обсерваторий, оценив магнитные аномалии и электромагнитные шумы. В вариационном павильоне при подключенном электропитании возникают магнитные аномалии, достигающие сотен и тысяч нТл. В абсолютном павильоне также наблюдаются магнитные аномалии, особенно от кабелей и обогревателей.

Градиентная съемка показала, что внутри абсолютного павильона горизонтальный градиент не превышает 0.1 нТл/м, вертикальный – 2 нТл/м; для вариационного павильона горизонтальный градиент составил 1.7 нТл/м, вертикальный – 1 нТл/м. Уровень электромагнитных шумов (СКО) при включенной терморегуляции не превышает 0.1 нТл (менее 1 Гц). Обеспечение низкого уровня шумов требует качественного питания силовой электроники (коэффициент искажения синусоидальности напряжения менее 1%).

Исходя из вышеизложенного, при выполнении требований к месту размещения и качеству питания силовой электроники, павильоны удовлетворяют требованиями, предъявляемым к павильонам магнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ.



5.2 Восстановление сети пунктов векового хода

В рамках работ по восстановлению сети пунктов векового хода проводились измерения абсолютных значений магнитного поля в обсерватории на геофизической базе им. В.К. Хмелевского геологического факультета МГУ в дер. Александровка Калужской области. Методика включала измерения в абсолютном павильоне и на выносных пунктах, а также геодезические измерения для определения азимутов. Съёмки проводились в три этапа: 27.01.2022 – 01.02.2022, 22.07.2022 – 24.07.2022 и 26.01.2023 – 29.01.2023.

Для проведения измерений использовалась следующая аппаратура. Для геодезической привязки и определения азимута базовой линии магнитного вариометра применялся геодезический комплекс GNSS R8. Измерения проводились в режиме RTK с использованием базовой и роверной станций. Для скалярных измерений модуля поля и измерения вариаций магнитного поля использовались протонные магнитометры ММ POS. Использовались два прибора: один для вариаций, располагающийся отдельно от обсерватории, а второй для измерения модуля поля в самой точке измерений. Для измерений склонения и наклонения использовался одноосевой феррозондовый магнитометр на немагнитном теодолите Carl Zeiss Theo 010-A. Измерения склонения и наклонения проводились офсетным методом, основанным на определении смещений и изменений углов при различных положениях прибора.

Первый цикл измерений проводился в обсерватории, где было определено место для установки теодолита. В результате неустойчивости результатов методика была изменена. Во втором цикле были добавлены выносные пункты (150-250 метров от вариационной станции, с расстоянием от теодолита до мира 50-60 метров). Второй цикл включал измерения на выносных пунктах и в обсерватории. В третьем цикле методика была доработана, добавлены выносные пункты ближе к обсерватории (в радиусе 20 метров). Также проводились измерения вариаций магнитного поля с использованием протонного магнитометра ММ POS с частотой 3 или 6 секунд. Проводилась синхронизация времени. Графики вариаций магнитного поля приведены на рисунке 3.7. Данные хранятся в базе данных геологического факультета МГУ.

Дополнительно измерялось поле в точке установки теодолита протонным магнитометром. В обсерватории бралось среднее из четырех измерений, в полевых условиях – непосредственно в точке наблюдения. Первый цикл показал отклонения от



математических моделей, поэтому методика была изменена. Третий цикл показал наиболее стабильные результаты.

Обработка данных включала оцифровку, подготовку данных с вариационной станции и сбор геодезических данных. Геодезические данные выгружались, рассчитывались азимуты. Координаты получены в проекции WGS 84- UTM 36N, пересчитанные в WGS 84. Азимуты: 89.8911°, 92.2537°, 133.8234°.

Магнитные данные загружались в скрипт для расчета итоговых значений. По результатам измерений были вычислены средние значения (Таблица 5.1).

Таблица 5.1. Общие результаты за все циклы измерений

№	Средне е значение	Склонени е, градусы	Наклонени е, градусы	Модуль магнитного поля, нТл
1	Ср по циклу 1	9.60598	70.17067	52.21397
2	Ср по циклу 2	8.56467	70.19800	52.24740
3	Ср по циклу 3	9.76661	70.14657	52.27873
4	Средне е по всем дням	9.31242	70.17175	52.24670
5	Средне е после отбраковки	9.76661	70.14657	52.27873
6	средне е по обсерватории	9.64028	70.16940	52.22507

Наблюдалось, что наклонение практически не менялось, модуль магнитного поля зависел от точки и сезона. Склонение совпадало, выносные пункты второго цикла отбракованы. Результаты отличаются от IGRF, но полевые измерения уточнили знания о поле. Поле в период измерений было стабильным.



5.3 Исследование магнитных свойств строительных материалов для геомагнитных обсерваторий

5.3.1 Обсерваторское геофизическое материаловедение как научное направление

Одна из основных особенностей геомагнитных обсерваторий – невозможность их «тиражирования». Установка обсерватории включает выбор места, строительство павильона и оснащение, но каждый этап имеет свои особенности. Опыт развертывания обсерваторий сосредоточен в общих рекомендациях. Важным вопросом остается выбор строительных материалов и конструкций для павильонов и постаментов, определяющее значение имеют магнитные свойства строительных материалов.

В связи с этим предложена разработка научного направления – обсерваторское геофизическое материаловедение, объединяющее исследования магнитных свойств пород, строительных материалов и составление рекомендаций. Задачи направления включают моделирование эффектов конструкций и оценку свойств в динамике. В 2023 году были проведены эксперименты по намагничиванию бетона и исследованию его магнитных характеристик. Работа была продолжена в 2024 году.

5.3.2 Магнитные свойства строительных элементов для экспериментальных обсерваторских павильонов

Исследовались магнитные свойства материалов, примененных в конструкции павильонов. Всего было исследовано 13 образцов. Материалы признаны годными для использования, что свидетельствует о продуманном подходе к выбору элементов. Большинство – это диа- и парамагнетики, что минимизирует влияние конструкций на магнитные измерения. Важна оценка загрязненности ферромагнитными примесями, поскольку даже небольшие их включения могут исказить результаты.

5.3.3 Изучение эффекта намагничивания вещества при изменении его агрегатного состояния на примере бетона

В 2023–2024 гг. изучался эффект повышения намагниченности бетона в ходе его отвердевания. В 2023 г. эксперимент проводился на бетоне Axton M300. Измерялась магнитная восприимчивость сухой смеси, затем во время отвердевания. В 2024 г. исследования проводились на забракованном бетоне (Восточная Сибирь), с высокой

восприимчивостью. Предполагаемые причины – состав цемента или загрязнение. Изготовлено два образца. Измерения проводились в день заливки и в течение двух недель. Кривые роста восприимчивости продемонстрировали быстрое увеличение, затем небольшое уменьшение, и плавный подъём. В перспективе планируется выявить закономерности на больших образцах, что позволит оценить аномалии и выбрать высоту постаментов, ускорит строительство, особенно для абсолютных измерений.

5.4 Распознавание сигналов внезапных начал – предвестников геомагнитных бурь в наблюдениях ИНТЕРМАГНЕТ с использованием нейронной LSTM-сети

Предложен метод распознавания сигналов «внезапных начал» – «Sudden Commencement» (SC) – предвестников геомагнитных бурь в наблюдениях ИНТЕРМАГНЕТ геомагнитного поля. Разработка метода и получение результатов были осуществлены с использованием эффективного инструментария – нейронной LSTM-сети глубокого обучения и суперкомпьютерного комплекса НИЯУ МИФИ. Исходные данные:

- 13 наблюдения компонент и модуля векторов напряжённости геомагнитного поля с обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ, действующих на всех континентах; наблюдения хранятся в общедоступной базе данных (БД) ИНТЕРМАГНЕТ [INTERMAGNET..., 2024];
- 14 данные о параметрах событий SC находятся в БД международной службы геомагнитных индексов ISGI [International..., 2024], сбор информации по SC для указанной БД осуществляется обсерваторией EBR (Ebro, Испания).

SC-сигналы – это быстрые зашумлённые изменения геомагнитного поля (единицы–десятки минут), возникающие при взаимодействии корональных выбросов Солнца с магнитосферой Земли. Они могут описываться моделью электромеханического резонатора [Паркер, 1965] и часто предшествуют геомагнитным бурям, хотя не всегда (в таких случаях возникают похожие SI-сигналы). SC наиболее выражены в северных компонентах поля и лучше видны на низких широтах. Идентификация SC осложнена вариациями амплитуды и формы в зависимости от широты и времени. Существуют некоторые методы их распознавания, включая анализ обобщённых производных [Shinohara *et al.*, 2005] и автоматизированные системы [Getmanov *et al.*, 2022]. База данных ISGI-EBR пока формируется вручную на основе морфологических правил.



Традиционные методы распознавания SC-сигналов часто не учитывают все влияющие параметры, поэтому более перспективным выглядит применение нейронных сетей. Для задачи распознавания SC лучше всего подходят LSTM-сети, способные учитывать долгосрочные зависимости в данных. В отличие от полносвязных (FNN) и сверточных (CNN) сетей, которые плохо работают с последовательностями, LSTM решает проблему затухания градиентов, хотя и требует значительных вычислительных ресурсов [LTSM..., 2024; Визильтер, 2024]. Цель исследования – разработка LSTM-модели для автоматического распознавания SC-сигналов в данных ИНТЕРМАГНЕТ и ISGI-EBR с оценкой её эффективности.

5.4.1 Исходная информация для нейросетевого распознавания событий Sudden Commencement геомагнитных бурь

ИНТЕРМАГНЕТ: временные ряды трёх компонент вектора напряженности (H_x , H_y , H_z) и модуля вектора магнитного поля H_0 (нТл, 1 минута). Используются обсерватории: ABG (Alibag, India), KNY (Kanoya, Japan), HON (Honolulu, USA), GUI (Guimar-Tenerife, Spain), SJG (San Juan, USA) за период 2005-2022г.г.

ISGI-EBR: текстовые файлы, таблица параметров. Низкоширотные обсерватории: HON, SJG, GUI, ABG, KNY, API (Apia, Samoa), TAM (Tamanrasset, Algeria), KOU (Kourou, French Guiana), GAN (Gan, Maledives). Квалификационные заключения по SC/SI производятся для БД [International..., 2024] на основании ручного анализа информации по пяти назначаемым обсерваториям из данного списка. Столбцы 1-5: дата, время, день года, средняя продолжительность события (в минутах) MDUR, средняя амплитуда (в нанотеслах) MAMP. Столбцы 6-10: квалификационные коды от групп обсерваторий CODES. Столбец 11: тип события (SC или SI) TYPES. Столбцы 12-16: названия обсерваторий. Столбцы 17-26: длительности и амплитуды по обсерваториям.

5.4.2 Предварительная цифровая обработка наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ для нейросетевого распознавания SC

Для нейросетевого анализа геомагнитных данных выполняется предварительная обработка, решающая две ключевые проблемы. Первая – устранение нестационарности. Наблюдения содержат низкочастотные тренды, нарушающие стационарность (ADF-тест: p -value=0.98). Применяется дифференцирующий фильтр, преобразующий данные в разностный формат. Вторая – обработка пропусков. Пропуски помечены кодом «99999.00».

В отдельных случаях пропуски совпадают с SC-событиями, что сокращает обучающую выборку. Для анализа используются только непрерывные участки данных.

5.4.3 Постановка задачи распознавания SC, архитектура LSTM-сети, LSTM-сеть с дополнительными скалярными переменными

Для автоматического распознавания SC-событий используется комбинация: минутные данные компоненты H_x из обсерваторий INTERMAGNET (2005-2022 гг.), разностные ряды ΔH_x , отражающие скорость изменения поля, и аннотированные события из базы ISGI-EBR. Метод основан на классификации 10-минутных временных окон: класс 1 – окна с SC-событием (центрированные на моменте SC), класс 2 – контрольные окна с высокой активностью (>3 нТл/мин), но без SC

Применена усовершенствованная RNN-архитектура с ключевыми элементами: механизм контроля информации через 4 так называемых вентиля: входной и забывания – регулируют обновление памяти, обновления – генерирует новые значения, выходной – определяет передачу на следующий слой. Критические параметры: размер скрытого состояния (128–256 нейронов), 2–3 рекуррентных слоя, «learning rate» 0.001–0.0001 и функция потерь (бинарная кросс-энтропия).

Для повышения точности в модель интегрированы 3 дополнительных признака: CL – разность средних за 10 мин до/после события, CR1 – разность стандартных отклонений за 60 мин, CR2 – разность отклонений разностного ряда. Архитектурное решение: 1) LSTM-слой обрабатывает временные окна ΔH_x , 2) полносвязные слои анализируют скалярные признаки, 3) объединенные признаки классифицируются выходным слоем. Реализация выполнена на PyTorch с использованием суперкомпьютерных ресурсов НИЯУ МИФИ, что позволило обрабатывать многолетние данные с минутным разрешением.

5.4.4 Оптимизация параметров LSTM-сети, характеристики распознаваний SC на основе LSTM-сети, дополнительные скалярные переменные для LSTM-сети

Проведена двухкритериальная оптимизация LSTM-сети (без скалярных переменных) с использованием данных INTERMAGNET за 2005-2021 гг. для обучения, данных 2022 года для валидации и 10-минутных временных окон с порогом $\Delta \bar{H}_x = 3.25$ нТл/мин. Оптимальные параметры следующие: число слоёв 3, hidden size 20, число эпох 500, метрики recall=0.175, precision=0.600.



Тестирование на данных обсерватории KNY (2022 г.) показало для 2-месячного периода 67% правильных распознаваний ($\text{recall}=0.281$, $\text{precision}=0.581$); для годового периода 89% правильных распознаваний ($\text{recall}=0.422$, $\text{precision}=0.496$). Анализ зависимости от порога $\Delta \bar{H}_x$ выявил оптимальное значение 3.50 нТл/мин с метриками $\text{recall}=0.165$ и $\text{precision}=0.620$. Введение дополнительных признаков (CL, CR1, CR2) показало незначительное улучшение результатов, снижение ложных срабатываний на 14.8% и сохранение числа правильных распознаваний и пропусков. Таким образом, LSTM-сеть демонстрирует приемлемую эффективность, но требует дальнейшей оптимизации для снижения ложных срабатываний.

5.4.5 Распознавание SC с применением наблюдений от системы геомагнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ.

Многомерный подход с прямой обработкой данных: Исследовался метод обработки одновременных наблюдений от нескольких обсерваторий (KNY и ABG) через модифицированную LSTM-сеть. Основными проблемами являются несовпадение временных пропусков в данных разных обсерваторий, уменьшение количества обучающих примеров из-за исключения неполных данных и снижение эффективности распознавания при увеличении числа обсерваторий.

Ансамблевый подход с технологией голосования: применена стратегия независимого обучения LSTM-сетей на данных пяти обсерваторий (HON, SJG, ABG, KNY, GUI) с последующим объединением результатов. Для Hard voting (простое большинство) $\text{recall}=0.367$, $\text{precision}=0.573$. Для Soft voting (учёт вероятностей) $\text{recall}=0.221$, $\text{precision}=0.855$. При пороге min 3 голосов достигнута высокая точность (0.855). Варианты усреднения вероятностей: простое усреднение $\text{recall}=0.247$, $\text{precision}=0.759$, взвешенное усреднение (по recall) $\text{recall}=0.300$, $\text{precision}=0.714$.

Выводы по этой части исследования получились следующими. Прямая обработка многомерных данных менее эффективна из-за проблем с пропусками. Ансамблевый подход с технологией голосования показывает лучшие результаты. Наилучший компромисс между полнотой и точностью достигается при Soft voting с порогом min 3 ($\text{precision}=0.855$) и при взвешенном усреднении ($\text{recall}=0.300$, $\text{precision}=0.714$). Метод демонстрирует потенциал для практического применения в геофизических информационных системах.

5.5 Исследование корреляционных свойств индексов геомагнитной активности и полного электронного содержания во время геомагнитной бури

Исследована крупнейшая за 20 лет геомагнитная буря ($Dst = -412$ нТл). Проанализированы среднечасовые данные ПЭС с 4 станций: DRAG (Израиль), YSSK (Южно-Сахалинск), BRST (Франция), NVSK (Новосибирск). Наибольшая корреляция ПЭС и Dst -индекса наблюдается на главной фазе бури (коэффициенты 0.74-0.96). На фазе восстановления корреляция снижается (0.47-0.55). Сильнее всего зависимость выражена для станций DRAG и BRST ($r=0.96$). При этом наименьшая корреляция наблюдалась у станции YSSK (0.74), что указывает на важность долготного положения. Полученные результаты подтверждают возможность использования данных ПЭС как дополнительного инструмента мониторинга экстремальных событий космической погоды, особенно для исследования суббулевой динамики.

5.6 Построение модели-кандидата для Международного геомагнитного аналитического поля (IGRF)

Использованы данные спутников SWARM за 2019-2024 гг.: скалярные данные, полученные скалярным магнитометром, и векторные компоненты, измеренные векторным магнитометром. На данные были наложены следующие критерии отбора: ночные измерения (Солнце не менее чем на 10° ниже горизонта), расхождение между значениями вектора магнитного поля от скалярного магнитометра и векторного магнитометра менее 3 нТл, значение индекса K_p за периоды измерения меньше 2, абсолютное значение индекса Dst менее 30 нТл, наконец, абсолютное значение временной производной индекса Dst составляет менее 5 нТл/час.

Главное поле B рассматривается как градиент магнитного потенциала V :

$$B(\lambda, \varphi, r, t) = -\nabla V(\lambda, \varphi, r, t)$$

причем V может быть разделен на внешние и внутренние источники с помощью присоединенных полиномов Лежандра.

Данная параметризация дает линейную задачу для расчета коэффициентов Гаусса, представляющих компоненты модели магнитного поля X , Y , Z . Используется метод наименьших квадратов. Введение абсолютного значения вектора магнитного поля делает задачу линейной. Модель строится через решение линейной обратной задачи с помощью



метода наименьших квадратов, чтобы получить первый набор коэффициентов Гаусса, а затем используются абсолютные измерения для решения нелинейной обратной задачи с помощью алгоритма Trust Region Reflective, подходящего для больших разреженных задач с ограничениями. В результате были построены две модели-кандидата: DGRF2020 (данные 2019-2020) и IGRF2025 (данные 2023-2024). Визуализации вертикальной компоненты Z представлены на Рис. 5.1 и 5.2.

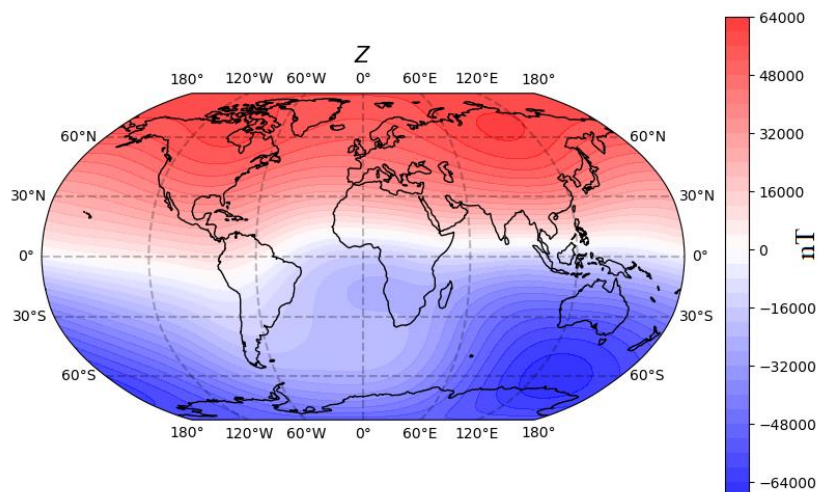


Рисунок. 5.1 – Вертикальная компонента магнитного поля Z по модели-кандидату DGRF2020

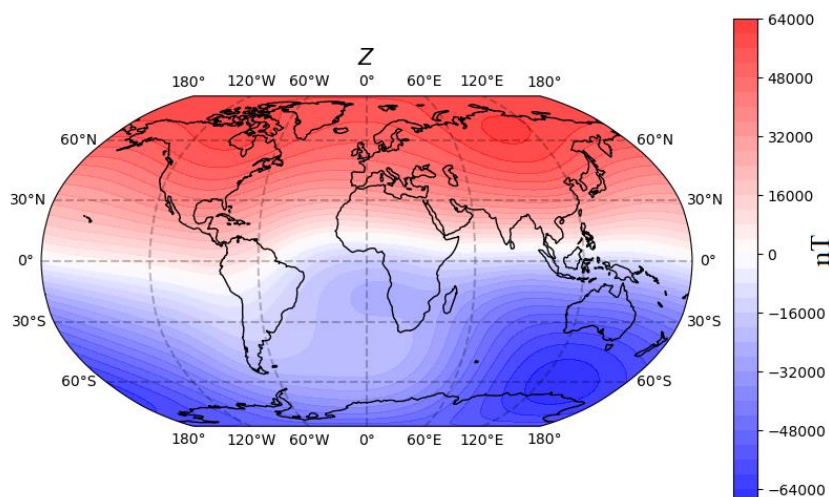


Рисунок 5.2 – Вертикальная компонента магнитного поля Z по модели-кандидату IGRF2025



5.7 Всероссийские научно-методические мероприятия

28-29 сентября 2024 г. на обсерватории «Борок» (Ярославская обл.) состоялся первый за 7 лет всероссийский научно-методический семинар по обсерваторской аппаратуре и метрологии магнитных измерений. Организаторами выступили ГЦ РАН и ИФЗ РАН. Участниками стали 7 ведущих геомагнитных обсерваторий России (BOX, PET, IRT, ARS, KZN, MHV), было сверено 14 приборов (7 деклинометров, 6 скалярных и 1 векторный магнитометр), эталонное оборудование было от УрФУ (POS-1).

Основными мероприятиями были сравнительные измерения на теодолитах, сверка метрологических характеристик оборудования, обсуждение состояния и перспектив российской сети геомагнитных наблюдений. В результате семинар позволил унифицировать методики измерений и обеспечить соответствие участников международным стандартам INTERMAGNET.

5.8 Научное и научно - техническое сотрудничество, в том числе международное

Внутрироссийские проекты – обсерватории стандарта INTERMAGNET:

1. «Сабетта» (Ямал) со «Шлюмберже» – развертывание геомагнитной обсерватории;
2. Восточная Сибирь с «НТЦ ТПМ» для Газпрома – сопровождение строительства новой магнитной обсерватории;
3. «Климовская» (Архангельская обл.) с ФИЦКИА УрО РАН – развитие и модернизация инфраструктуры обсерватории;
4. «Михнево» (Московская обл.) с ИДГ РАН – развертывание магнитной обсерватории стандарта INTERMAGNET;
5. «Санкт-Петербург» на базе СПбФ ИЗМИРАН – поддержка непрерывных наблюдений на обсерватории стандарта INTERMAGNET;
6. «Остров Самойловский» на базе ИНГГ СО РАН – развертывание совместной магнитной обсерватории
7. Александровская база МГУ (Калужская обл.) – совместное с геологическим факультетом МГУ измерение абсолютных значений магнитного поля Земли.



Международное сотрудничество:

8. Армения: модернизация обсерватории «Гюлагарак» (GLK)
9. Узбекистан: развертывание комплекса на обсерватории «Янгибазар» (TKT)
10. Китай: совместная установка магнитометра GM4 в СПб (SPG)

Список использованных источников

1. Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. – Warsaw: IAGA, 1996. – 235 p.
2. INTERMAGNET – International Real-time Magnetic Observatory Network. – URL: <https://intermagnet.org> (дата обращения: 15.11.2024).
3. International Service of Geomagnetic Indices. – URL: <https://isgi.unistra.fr/index.php> (дата обращения: 26.10.2024).
4. Паркер Е. Динамические процессы в межпланетной среде. – М.: Мир. 1965. – 364 с.
5. Shinohara M., Kikuchi T., Nozaki K. Automatic realtime detection of sudden commencement of geomagnetic storms // Journal of the National Institute of Information and Communication Technology. – 2005. – Vol. 52. – P.197–205. DOI: 10.1016/j.asr.2011.05.025
6. Getmanov V., Sidorov R., Gvishiani A. A method for recognition of sudden commencements of geomagnetic storms using digital differentiation filters // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – Art. No. 413. DOI: 10.3390/appl12100413
7. LSTM Neural Network. – URL: <https://calvinfeng.gitbook.io/machine-learning-notebook> (дата обращения: 22.10.2024).
8. Визильтер Ю.В. Современное состояние технологий искусственного интеллекта. Отечественная нейросетевая платформа Plat. – URL: http://agora.guru.ru/sct/files/2020_10_13_Vilsiter.pdf (дата обращения: 20.10.2024).



6 Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях

Шифр темы: FMWG-2024-0001

Регистрационный №: 124071200016-6

Руководитель: зам. директора по науке, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев.

6.1 Хранение и обработка Больших данных для геомагнитного обеспечения наклонно-направленного бурения

При широком внедрении современных технологий спутникового позиционирования (таких как глобальные навигационные спутниковые системы – ГНСС) магнитное поле Земли (МПЗ) остается одним из основных надежных естественных геофизических полей, используемых для навигации и ориентации искусственных объектов. Важной особенностью данного метода является возможность мгновенного определения ориентации объекта, в то время как ГНСС в базовом варианте позволяют определить положение или направление движущегося объекта. Для определения ориентации объекта требуются дополнительные технические решения, поэтому магнитная навигация остается необходимым резервным, а иногда и единственно возможным методом. Например, магнитный компас остается неотъемлемым элементом оборудования и приборов, используемых для навигации транспортных средств, в том числе воздушных судов [Shockley and Raquet, 2014; Ogórek et al., 2015; Pasku et al., 2017; Chen et al., 2022].

Среди областей применения геомагнитных данных в определении положения и навигации – поддержка горнодобывающей промышленности. Добыча трудноизвлекаемых залежей нефти и газа, а также месторождений углеводородов, расположенных в высоких широтах, требует применения более сложных технологий бурения скважин. Невозможность использования ГНСС для подземной навигации и позиционирования бурового инструмента обуславливает применение инерциальных систем и использование данных о геофизических полях, в том числе о МПЗ [Williamson, 2000; Buchanan et al., 2013].

Информационные системы, построенные на технологиях Больших данных, соответствуют требованиям простоты горизонтального масштабирования и скорости обработки запросов [Гвишиани и др., 2023; Rylnikova et al., 2022]. Конечная цель – создание единой масштабируемой системы спутниковых и наземных геомагнитных данных МАГНУС Бод. В будущем такая система может использоваться как для решения фундаментальных геофизических задач, так и для предоставления высококачественных

данных нефтесервисным компаниям в режиме реального времени для поддержки операции наклонно-направленного бурения (ННБ) в России. В ходе проведенных исследований предложен процесс такого перехода, а также представлены первые полученные результаты.

Для системы МАГНУС Бод, построенной на технологии Больших данных, предложена структура (рис. 6.1), включающая источники данных, блок сбора и хранения данных, а также блок анализа и визуализации данных.

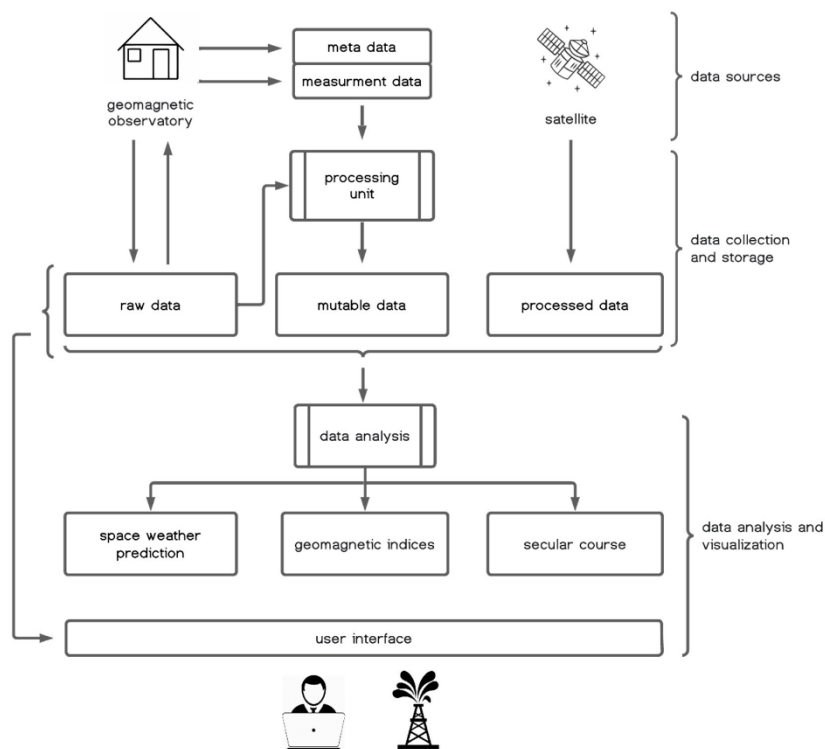


Рисунок 6.1 – Структурная схема системы МАГНУС Бод

В результате в 2024 году в ГЦ РАН создана полностью работоспособная пилотная версия системы МАГНУС Бод.

Основой эффективной геомагнитной навигации при ННБ является обработка геомагнитных данных в режиме реального времени для получения направления на магнитный север с точностью $0,1^\circ$ для склонения D и $0,05^\circ$ для наклонения I , а также дополнительно модуля полного вектора F с точностью до 50 нТл в соответствии с моделью ошибок ISCWSA [Russell et al., 1995]. Космические погодные явления, такие как магнитные бури и суббури вблизи места производства работ, приводят к сильным колебаниям угловых компонент вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ (рис. 6.2а). При таких быстрых колебаниях возникает погрешность в зависимости от скорости обработки поступающих данных. На рис. 6.2а показана запись склонения и наклонения во время магнитной бури 1–3 декабря 2023 года, полученная на магнитной обсерватории «Климовская». В этом случае ошибка

коррекции угла азимута направления бурения в системе МАГНУС, основанная на усредненных значениях D за 15 минут, превышает порог 1σ в 7,4% случаев и порог 3σ в 1,3% случаев (рис. 6.2б). Наблюдаемые отклонения связаны с задержкой обработки данных, которая может превышать 10 минут. Использование обработки в реальном времени в предлагаемой системе МАГНУС БоД значительно снижает погрешность коррекции (рис. 6.2в). В этом случае только 0,4% ошибок D выходят за пределы диапазона $\pm 1\sigma$. Следует отметить, что требования к точности коррекции со временем только растут, поскольку темпы добычи и скорость бурения постоянно увеличиваются [Osmundsen et al., 2012; Zhang et al., 2019].

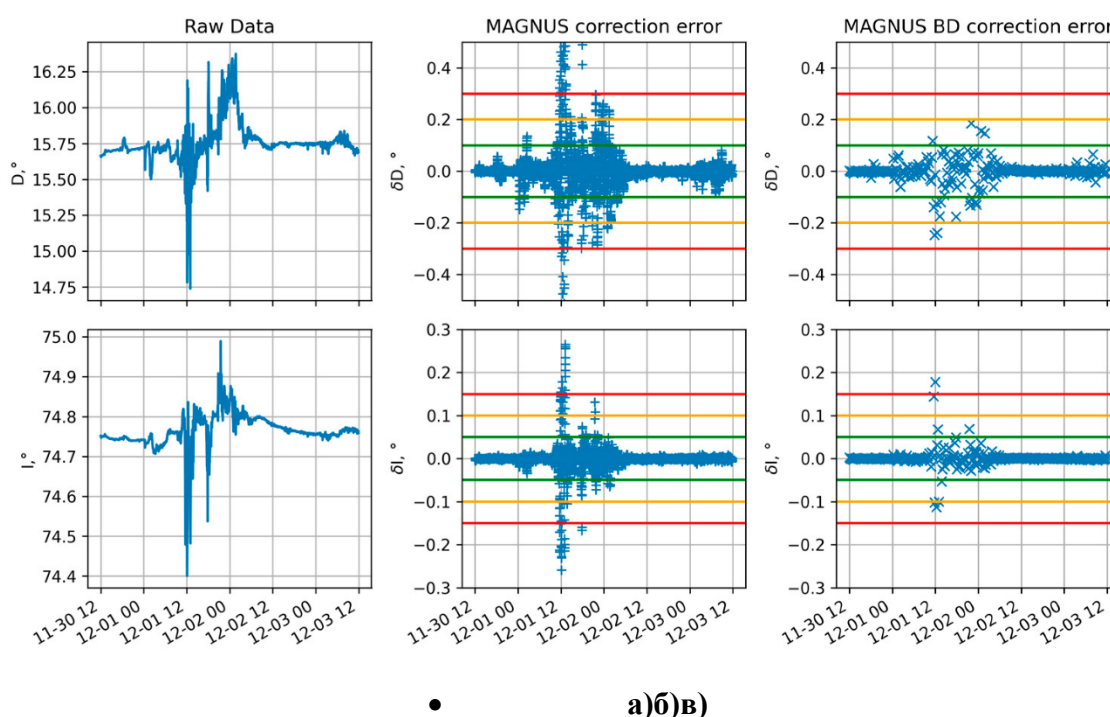


Рисунок 6.2 – а) склонение и наклон вектора B во время магнитной бури 1–3 декабря по данным магнитной обсерватории «Климовская» (KLI); б) ошибка коррекции с использованием системы МАГНУС; в) ошибка коррекции с использованием системы МАГНУС БоД.

Линии на графиках (б, в) показывают пороговые значения требований ISCWSA к ошибкам: 1σ (зелёный), 2σ (оранжевый), 3σ (красный)

Использование унифицированной системы МАГНУС БоД позволит эффективнее решать ряд прикладных задач, требующих нетривиальных математических алгоритмов для обработки геомагнитных данных, многокритериальной оценки геофизических параметров и применения ГИС-технологий. Примером такой прикладной задачи является выбор места для строительства новой магнитной обсерватории для поддержки направленного бурения.

Другой актуальной задачей является построение и обновление моделей МПЗ высокого разрешения для целей направленного бурения. Его моделирование основано на непрерывной работе с текущей наземной и спутниковой информацией, которая по определению является Бод. С другой стороны, построение новых моделей геомагнитного поля традиционно основывается на сравнительном анализе с существующими моделями и проверке с использованием наземных обсерваторских данных [Козырева и др., 2022]. Это можно эффективно реализовать на базе МАГНУС Бод, внедряя существующие и создавая новые алгоритмы для системного анализа Больших данных.

6.2 Разработка архитектуры системы накопления геофизических данных в режиме реального времени на базе СУБД Greenplum

Целью работы была разработка массово-параллельной архитектуры единой системы накопления данных, которая позволяет максимально быстро предоставлять пользователям «горячие» данные, а также обеспечивает доступ к архивным данным с более низким приоритетом скорости получения («холодные» данные).

Архитектура хранения данных и система управления базами данных (СУБД): в процессе разработки единой системы накопления геофизических данных (рис. 6.3), ключевым этапом был выбор подходящей СУБД. Нами была выбрана Greenplum. Этот выбор обусловлен рядом важных факторов, такими как, технологический суверенитет и преимущества open-source решения.

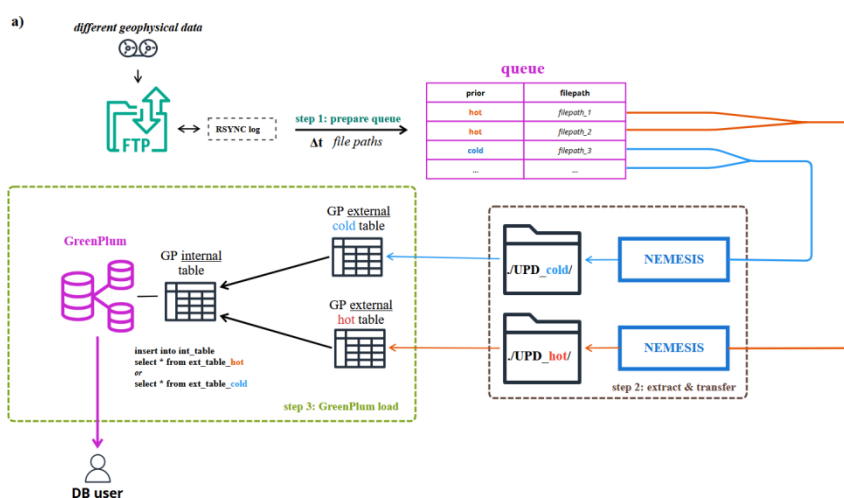


Рисунок 6.3 – Концептуальный вид архитектуры системы накопления геофизических данных в режиме реального времени

Разделение данных на “горячие” и “холодные”: быстрый доступ к данным возможен только при условии правильного “понимания” контекста данных [Raevich and Dobronets, 2019]. Как следствие, важной частью задачи стало предварительное разделение возможных поступающих и имеющихся геофизических данных по различным критериям, таким как актуальность, местоположение и дискретность по времени.

Логический блок управления загрузкой данных в БД предназначен для решения следующих задач:

- оптимизация процессов обновления данных в уже имеющихся таблицах на основе новых данных;
- быстрое определение нужных нам в БД данных в большом потоке поступающих сырых данных на FTP серверы из разных источников;
- определение приоритетности загрузки в базу данных.

В общем виде pipe-line накопления данных в реальном времени, от поступления на FTP серверы ГЦ РАН до представления их в СУБД Greeplum, можно разделить на несколько этапов.

Этап 1. Геофизические данные в виде текстовых файлов поступают на FTP сервер с помощью программы синхронизации между UNIX-машинами Rsync (<https://github.com/RsyncProject/rsync>). Добавление и изменение существующих файлов в этом хранилище записывается в текстовый лог rsync.log. Структура FTP хранилища указана на рис. 6.4.

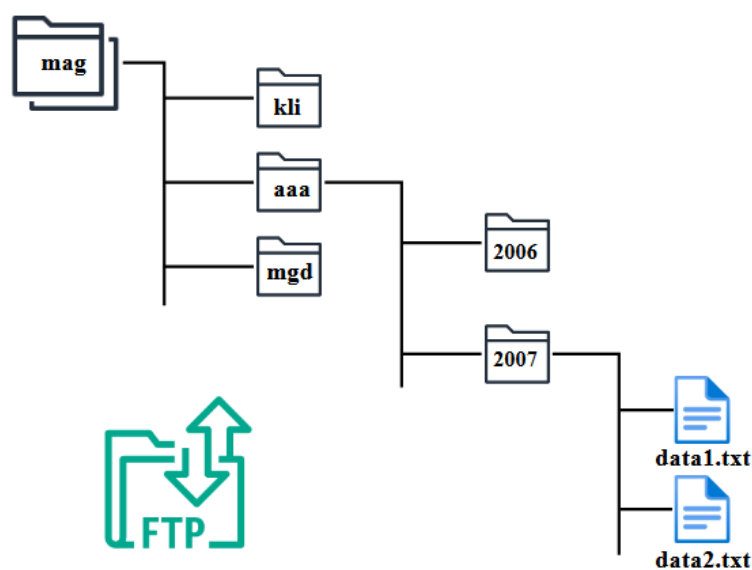


Рисунок 6.4 – Структура FTP хранилища, где находятся исходные файлы с геофизическими данными.

Этап 2. Система, через указанный промежуток времени в t секунд, читает rsync.log лог изменений в файлах FTP хранилища. Из rsync.log извлекаются пути измененных файлов (далее – filepathс) за последние k часов, и передаются логическому блоку queue.

Этап 3. Задача queue состоит в разделении множества filepathс на два непересекающихся подмножества: filepathс с высоким приоритетом загрузки в БД и filepathс с низким приоритетом. Эта задача блоком queue решается на основе названий папок во входящем string пути файла (filepath).

Этап 4. Задача логического блока Nemesis (Немесида в греческой мифологии – богиня справедливого возмездия) заключается в быстром решении вопроса: нужны ли данные из входящего файла в нашей БД или файл можно пропустить и переходить к следующему filepath. Блок-схема работы Nemesis представлена на рис. 6.5.

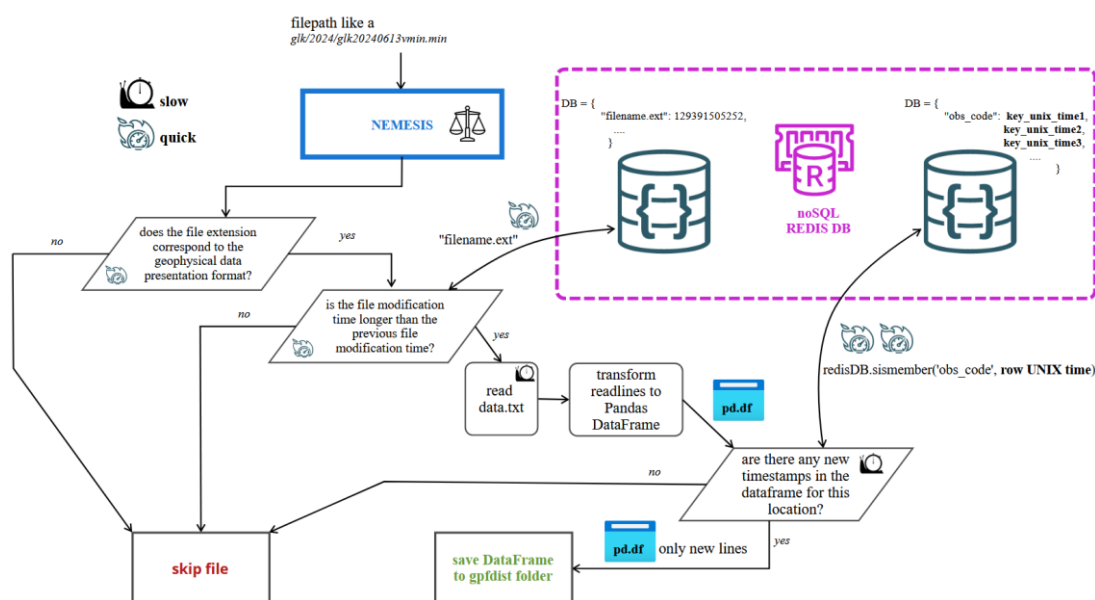


Рисунок 6.5 – Блок-схема логического блока Nemesis.

Этап 5. Для загрузки новых данных в GreenPlum Database используется инструмент распределенного файлового сервера, разработанный для использования в среде Greenplum Database – gpfdist (https://docs.vmware.com/en/VMware-Greenplum/6/greenplum-database/utility_guide-ref-gpfdist.html).

С помощью gpfdist, мы можем перенести новые данные из файлов в «горячих» и «холодных» папках по внешние таблицы GreenPlum Database.

Внешние таблицы в Greenplum Database представляют собой виртуальные таблицы, которые ссылаются на данные, хранящиеся вне самой базы данных. Они позволяют

Greenplum обрабатывать и анализировать данные, не загружая их непосредственно в базу данных. Внешние таблицы особенно полезны для работы с большими объемами данных. Для создания внешней таблицы в Greenplum, которая ссылается на файлы данных через gpfdist, используется SQL-команда `CREATE EXTERNAL TABLE`. В этой команде указываются метаданные о структуре таблицы (столбцы, их типы данных) и расположение файлов данных.

Важно отметить, что таблица `min_obs_hot_ext` физически не присутствует на кластере GP. Как следствие, любой запрос в этой таблице по типу `select` будет выполнен со скоростью чтения всех файлов в папке, указанной в `location`. После, данные в этих файлах будут индексированы в таблице `min_obs_hot_ext`. Все это может занимать десятки минут, поэтому внешняя таблица `min_obs_hot_ext` является подобием `reader` для новых данных, которые были получены при запуске скрипта на этапе 1.

Таким образом, предложена архитектура системы обновления данных и проведено детальное рассмотрение процесса загрузки данных из поступающих файлов измерений. Применение встроенных возможностей файл-сервера `gpfdist` в составе СУБД Greenplum и кэширующей базы данных на основе СУБД Redis обеспечило необходимую скорость и функциональность системы хранения геофизических данных.

6.3 База исторических геомагнитных данных

Исторические геомагнитные данные, хранящиеся на серверах Мировых центров данных, функционирующих в Геофизическом центре РАН, представлены в виде таблиц в СУБД MySQL. Задачей являлось преобразование таблиц из старого формата, где в одной строчке хранился целый ряд значений магнитной интенсивности для одной из компонент магнитного поля (например, 24 значения для часовых данных компоненты X для одних суток), в новый формат, используемый для хранения Больших данных. Необходимо было построить графики, отражающие изменения во времени значений компонент магнитного поля минутных и часовых данных, а также доступности данных, для каждого вида данных и для каждой обсерватории.

Преобразование таблиц производилось с помощью языка программирования Python 3.10 с использованием ORM (Object-Relational Mapping) SQLAlchemy и библиотеки для работы с таблицами Pandas. Данные о K -индексе преобразованы в таблицу со столбцами: код обсерватории, время в формате `unix time stamp` (количество секунд с 01.01.1970), значение K -индекса. Таблицы для минутных и часовых данных содержат



следующие столбцы: код обсерватории, время в формате unix time stamp, компоненты магнитного поля (DHZ или XYZ) и четыре столбца со значениями компонент, первые три из которых соответствуют полю с компонентами, а четвертая всегда является компонентой F . Отсутствующие значения записывались в виде 99999 – специального зарезервированного значения для отсутствия данных о компоненте магнитного поля в данное время.

Для временных графиков изменения компонент магнитного поля использовалась библиотека `matplotlib`. С ее помощью для каждого года построено 13 графиков по каждой обсерватории – отдельно 12 месяцев и общий для года. Построения выполнены отдельно для часовых и минутных данных. При этом предварительно была вычтена медиана данного диапазона (месяца или года) с целью приведения абсолютных значений к вариациям.

Графики интервалов доступности также построены с использованием библиотеки `matplotlib`. При этом смысл их построения сводился к разделению всех данных из таблиц на три категории: полные данные, отсутствие данных и частичное наличие данных. Графики доступности данных заполнялись полосами трех разных цветов, соответствующих каждой категории (рис. 6.6). При этом для обсерватории исключалось заполнение одного и того же временного интервала более чем одной полосой.

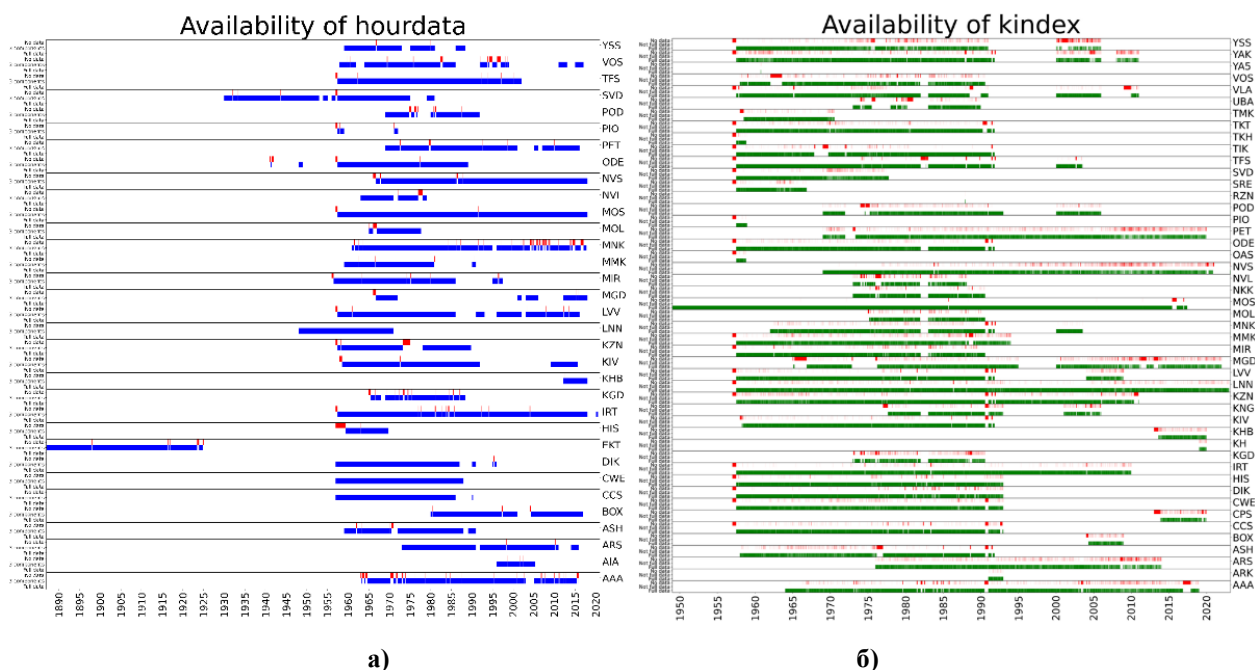


Рисунок 6.6 – Графики доступности а) часовых данных; б) К-индекса

6.4 Обобщенный массив геолого-геофизической информации восточного сектора российской Арктики для проведения анализа методами машинного обучения

Для решения ряда геофизических задач в Арктическом регионе с помощью моделей машинного обучения требуется достаточное количество размеченных количественных данных. Сбор и подготовка данных занимает значительную часть трудозатрат типового проекта комбинированного анализа данных.

В рамках НИР предложен оригинальный подход к формированию системы сбора, предварительного хранения и комплексирования геолого-геофизических данных из различных источников. Подход учитывает особенности последующего применения моделей машинного обучения и является типовым, что дает возможность быстрого масштабирования наработанных практик для любого региона.

Предложена архитектура программно-аппаратного комплекса для сбора, хранения и подготовки данных. Она позволяет оперативно добавлять, преобразовывать или исключать те или иные геопространственные характеристики, что обеспечивается разработанной методикой подключения, загрузки и консолидации данных из произвольных источников. Модуль сбора и преобразования данных разработан на языке Python с применением библиотеки работы с данными Pandas [Pandas, 2024]. В качестве системы хранения данных предложено использовать СУБД PostgreSQL [PostgreSQL, 2024]. Эта СУБД является классической реляционной базой данных с открытым кодом разработки и широко используется не только для хранения, но и для анализа данных. PostgreSQL имеет большое количество расширений, которые позволяют применять СУБД в различных прикладных областях для сбора и хранения информации.

Для эффективного хранения геопространственных данных используется хорошо зарекомендовавшее себя расширение PostGIS [PostGIS, 2024], совместимое с QGIS [QGIS, 2024]. Система QGIS позволяет подключаться к серверу PostgreSQL с установленным расширением PostGIS для импорта и экспорта данных, последующего просмотра и работы через QGIS. Поскольку СУБД PostgreSQL является реляционной базой данных, взаимодействие с хранимой информацией может осуществляться посредством SQL-запросов.

В разработанном программном решении сохраненные данные обрабатываются и передаются в объект DataFrame библиотеки Pandas языка программирования Python

[Pandas, 2024]. Это позволяет на следующих этапах обработки данных осуществлять подготовку обучающей, валидационной и тестовой выборки для использования в моделях машинного обучения и консолидированного анализа всего массива данных. Таким образом подготовленный DataFrame и является обобщенным массивом геолого-геофизической информации для последующего комплексного анализа. На рис. 6.7 представлена общая архитектура реализованного программного комплекса подготовки пространственных геолого-геофизических данных.

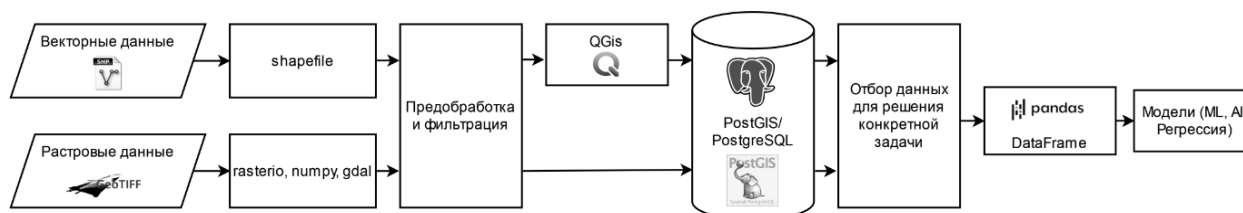


Рисунок 6.7 – Общая архитектура комплекса подготовки пространственных геолого-геофизических данных

Предложенный унифицированный подход к сбору и обработке информации предусматривает хранение и работу с изменчивыми во времени геопространственными данными. Разработан алгоритм объединения данных и введено понятие окрестности, на основе которой производится отбор и консолидация пространственных данных.

Результаты проведенных исследований вносят вклад в решение обобщенной задачи комплексного анализа максимально доступной, разнородной геолого-геофизической информации с целью оценки информативности тех или иных признаков с точки зрения их прогнозных свойств.

Разработанный программно-аппаратный комплекс апробирован на примере задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе. Несмотря на сравнительно небольшой набор данных в проводимом эксперименте, полученные результаты в целом согласуются с выводами, полученными ранее в аналогичных исследованиях. В частности, подтверждена высокая информативность данных о магнитных аномалиях как значимого признака в решении указанной задачи. Отметим, что в качестве библиотек для обучения и использования моделей машинного обучения применялись библиотеки Scikit-learn [Scikit-learn, 2024] и Keras [Keras, 2024], которые согласно последнему опубликованному опросу Kaggle [Mooney, 2022] являются одними из самых используемых сред для проведения экспериментов с применением моделей машинного обучения.

Предложенный подход к формированию единого датасета реализован при сборе

и консолидации данных по обширному региону восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации. Использованы цифровые геолого-геофизические данные, имеющиеся в распоряжении исследователей. Подготовленный датасет содержит 43 783 записи с 227 компонентами общим объемом 2,5 ГБ (включая необработанные данные из источников). Полученные результаты позволили оценить производительность программно-аппаратного комплекса. Так, процесс консолидации данных и сохранения в СУБД занял около 1 часа, что отвечает техническим требованиям к решению задачи. Данная оценка позволила сделать вывод, что для решения схожих по масштабу задач достаточно использования реляционной СУБД (например, PostgreSQL) для хранения и обработки данных.

На следующих этапах реализации НИР планируется существенное увеличение объема анализируемой информации за счет расширения исследуемого региона и включения новых данных. Для масштабирования и ускорения процесса получения доступа и анализа данных будет использоваться технология распределенной обработки и хранения на базе Apache Hadoop [Aji et al., 2013; Apache Hadoop, 2024], широко применяемая при взаимодействии с Большими данными [Гвишиани и др., 2022; Гвишиани и др., 2023]. Apache Hadoop может быть связан с базой данных PostgreSQL с помощью таких инструментов, как Apache Hive [Apache Hive, 2024] для обработки и анализа табличных данных с помощью SQL-запросов и интеграции с реляционной базой данных (например, PostgreSQL).

6.5 Мультиграмматическое моделирование нейронных сетей

В рамках развития математического аппарата работы с Большими данными описаны мультиграмматические представления искусственных нейронных сетей прямого распространения и рекуррентных искусственных нейронных сетей. Рассмотрено применение мультимножественных метаграмматик для моделирования глубокого обучения искусственных нейронных сетей. Дальнейшее расширение методов мультиграмматического моделирования нейронных сетей на большее количество классов нейронных сетей станет предметом исследований на следующих этапах реализации НИР.

6.6 Создание ГИС и геопортала «Большие данные в арктических исследованиях»

Проведены работы по созданию прототипа ГИС и геопортала «Большие данные в арктических исследованиях». Геопортал построен с использованием ПО NextGIS и инфраструктуры пространственных данных ГЦ РАН. ПО NextGIS [NextGIS, 2025] – это модифицированная версия свободно распространяемого настольного ГИС-приложения QGIS. Программный пакет включает в себя несколько модулей, позволяющих публиковать созданные слои и карты в виде картографических веб-сервисов. Пользовательское настольное приложение NextGIS QGIS обеспечивает возможность работы с пространственными данными, а также с различными источниками данных, в том числе по сетевым протоколам WMS, WFS и др. Приложение интегрируется с модулем NextGIS Web – веб-платформой для публикации и управления геопространственными данными в Интернете с помощью модуля обмена данными NextGIS Connect. Эти инструменты обеспечивают эффективный обмен данными между локальными пользователями и веб-системами, поддерживают работу с различными форматами и источниками данных и предлагают широкий функционал для публикации и управления картографической информацией. На рис. 6.8 представлена схема взаимодействия компонентов программного обеспечения NextGIS.

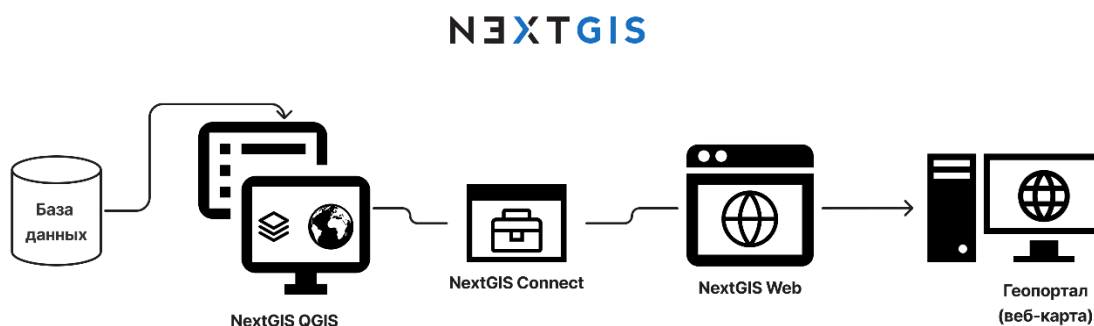


Рисунок 6.8 – Схема взаимодействия компонентов программного обеспечения NextGIS

Данная схема отражает процесс создания и наполнения геопортала. На первом этапе происходит выборка пространственных данных, которые планируется включить в картографический сервис. Далее сформированные данные загружаются в NextGIS QGIS в виде слоев векторных и растровых данных для дальнейшего отображения на карте. Происходит обработка, оформление и подготовка данных к публикации. С помощью NextGIS Connect осуществляется подключение к серверной части NextGIS Web, а также публикация слоев данных, оформленных в настольном приложении NextGIS QGIS. Данные из серверной части NextGIS Web также можно загружать в NextGIS QGIS

для редактирования. После того, как необходимые слои с оформлением загружены на сервер в виде картографических сервисов, создается веб-карта, включающая необходимые данные и базовые карты [Сервисы, 2025]. Опубликованная веб-карта вместе с рядом инструментов геообработки организована в виде специализированного геопортала, который в дальнейшем будет наполняться данными по региону АЗРФ. Общий вид созданного геопортала представлен на рис. 6.9.



Рисунок 6.9 – Общий вид запущенного геопортала. Отображаются слои раздела «Направления развития Арктики»

Исходная информация, составляющая основу созданной ГИС, включает следующие тематические разделы:

- Географическая основа региона;
- Направления развития Арктики;
- Города Российской Федерации;
- Федеральные округа Российской Федерации;
- Цифровые модели топографии и батиметрии: цифровые модели рельефа GTOPO30, GEBCO и ETOPO1.

Одним из тематических разделов геопортала, сформированных в 2024 г., является раздел, посвященный направлениям развития АЗРФ. Информация для наполнения этого раздела была взята из *Указа Президента РФ № 645 от 26.10.2020* [2025]. Слои, входящие в раздел, отображают основные направления развития региона: транспортную инфраструктуру, месторождения природных ресурсов, образование и туризм.

Источником данных по крупнейшим городам Российской Федерации является ресурс Natural Earth – открытый набор картографических данных, предоставляемый в масштабах 1:10 млн, 1:50 млн и 1:110 млн [Natural Earth, 2025]. Благодаря большому

числу векторных и растровых данных, представленных на сайте Natural Earth, можно создавать разнообразные, тщательно проработанные карты с использованием картографического или ГИС ПО. Данные, полученные с указанного ресурса, были загружены в NextGIS QGIS, далее выбраны города только по территории РФ.

В сформированной базе геопространственных данных представлены различные варианты цифровых моделей рельефа и батиметрии для Арктической зоны: GTOPO30, ETOPO1 и GEBCO. GTOPO30 – это глобальная цифровая модель рельефа с шагом сетки по горизонтали 30 угловых секунд (~1 км) [USGS EROS Archive, 2025]. Данная модель рельефа получена путем объединения различных растровых и векторных источников информации.

Глобальная цифровая модель рельефа ETOPO1 [Amante and Eakins, 2009], добавленная в список картографических слоев ГИС и на геопортал, показана на рис. 6.10. Разрешение данного слоя составляет 1 угловую минуту (~2 км). Модель ETOPO1 включает в себя данные как о рельефе суши, так и батиметрии морского дна. При составлении данной модели был использован целый ряд глобальных и региональных цифровых массивов данных, которые приведены к общим системам отсчета и отредактированы. Используемый в созданной ГИС слой топографии и батиметрии по модели ETOPO1 отображает модель рельефа с учетом антарктического и гренландского ледниковых щитов.

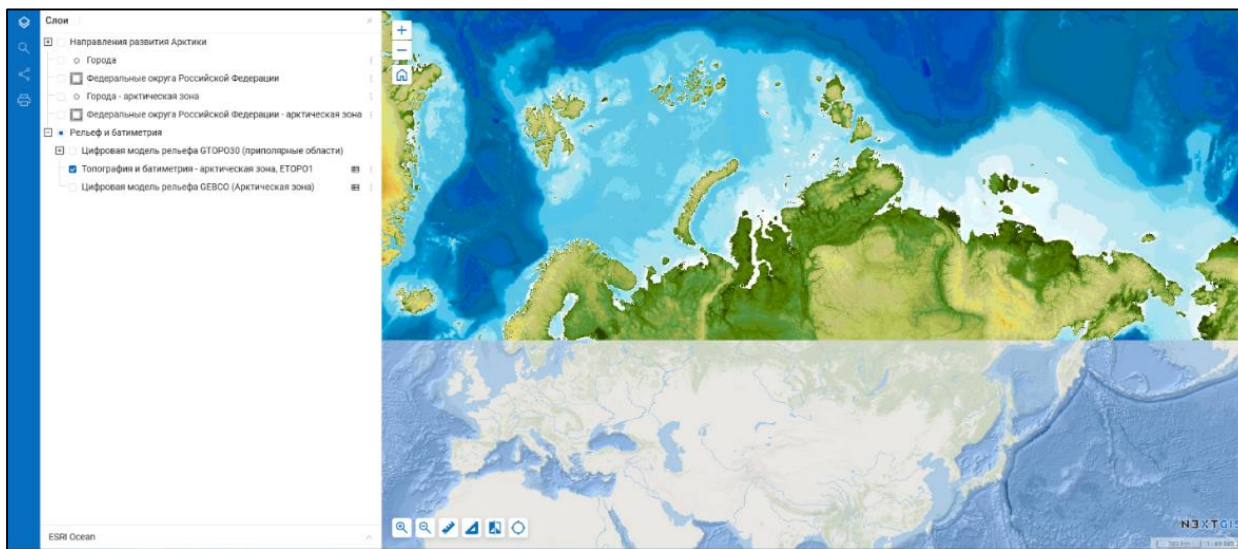


Рисунок 6.10 – Цифровая карта топографии и батиметрии ETOPO1 для Арктической зоны

Цифровая модель рельефа GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) [GEBCO, 2025], представленная на рис. 6.11, является глобальной моделью рельефа океанического дна и суши. Основная цель проекта GEBCO – предоставить высокоточную и всестороннюю карту рельефа Мирового океана. В проекте используется модель GEBCO

версии 2024 г. Это глобальная модель рельефа для океана и суши, предоставляющая данные о высоте в метрах на сетке с интервалом в 15 угловых секунд (~450 м). Для построения модели используются данные миссии SRTM (Shuttle Radar Tomography Mission). Проект GEBCO является одним из ведущих инструментов для глубокого анализа рельефа Земли, способствуя изучению океанов и пониманию влияния рельефа на глобальные климатические процессы. Таким образом, в ходе реализации первого этапа НИР в базу геопространственных данных созданной ГИС были включены тематические слои общего назначения.



Рисунок 6.11 – Цифровая модель рельефа GEBCO для Арктической зоны

Список использованных источников

- Гвишиани А. Д., Добровольский М. Н., Дзеранов Б. В., Дзедобоев Б. А. Большие Данные в геофизике и других науках о Земле // Физика Земли. – 2022. – № 1. – С. 3–34. DOI: 10.31857/S0002333722010033.
- Гвишиани А. Д., Панченко В. Я., Никитина И. М. Системный анализ Больших данных для наук о Земле // Вестник РАН. – 2023. – Т. 93, № 6. – С. 518–525. DOI: 10.31857/S0869587323060087.
- Козырева О. В., Пилипенко В. А., Добровольский М. Н., Зайцев А. Н., Маршалко Е. Е. База данных геомагнитных наблюдений в российской Арктике и ее использование для оценки воздействий космической погоды на технологические системы // Солнечно-земная физика. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 39–50. DOI: 10.12737/szf-81202205.
- Сервисы – Документация NextGIS. – URL: <https://docs.nextgis.ru/> (дата обращения: 19.05.2025).
- Указ Президента РФ № 645 от 26.10.2020 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (дата обращения: 19.05.2025).



- Aji A., Wang F., Vo H., Lee R., Liu Q., Zhang X., Saltz J. Hadoop-GIS: A High-Performance Spatial Data Warehousing System over MapReduce // Proceedings of the VLDB Endowment. – 2013. – Vol. 6, No. 11. – p1009.
- Amante C., Eakins B. W. ETOPO1. 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. – Boulder, USA: National Geophysical Data Center, NOAA, – 2009. DOI: 10.7289/V5C8276M
- Apache Hadoop. URL: <https://hadoop.apache.org> (дата обращения: 15.03.2024).
- Apache Hive. URL: <https://hive.apache.org> (дата обращения: 15.03.2024).
- Buchanan A., Finn C. A., Love J. J., Worthington E. W., Lawson F., Maus S., Okewunmi S., Poedjono B. Geomagnetic Referencing – The Real-Time Compass for Directional Drillers // Oilfield Review. – 2013. – Vol. 25, No. 1. – P. 32–47.
- Chen J., Song S., Gong Y., Zhang S. An indoor fusion navigation algorithm using HV-derivative dynamic time warping and the chicken particle filter // Satellite Navigation. – 2022. – Vol. 3, No. 13. DOI: 10.1186/s43020-022-00073-3.
- GEBCO – The General Bathymetric Chart of the Oceans. – URL: <https://www.gebco.net/> (дата обращения: 19.05.2025).
- Keras 3 API documentation. URL: <https://keras.io/api/> (дата обращения: 15.03.2024).
- Mooney P. Kaggle Machine Learning & Data Science Survey. Kaggle. – 2022. URL: <https://www.kaggle.com/code/paultimothymooney/kaggle-survey-2022-all-results> (дата обращения: 21.06.2024).
- Natural Earth. – URL: <https://www.naturalearthdata.com/> (дата обращения: 19.05.2025).
- NextGIS. – URL: <https://nextgis.ru/> (дата обращения: 19.05.2025)
- Ogórek I., Grzegorzewski M., Maciejowski M. The use of magnetic field and magnetometers in supporting the air navigation // Annual of navigation. – 2015. – Vol. 22. – P. 21–29. DOI: 10.1515/aon-2015-0018.
- Osmundsen P., Roll K. H., Tveteras R. Drilling speed—the relevance of experience // Energy Economics. – 2012. – Vol. 34, No. 3. – P. 786–794. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.11.016.
- Pandas – Python Data Analysis Library. URL: <https://pandas.pydata.org/> (дата обращения: 15.03.2024).
- Pasku V., De Angelis A., De Angelis G., Arumugam D. D., Dionigi M., Carbone P., Moschitta A., Ricketts D. S. Magnetic Field Based Positioning Systems // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2017. – Vol. 19, No. 3 2003–2017. DOI: 10.1109/COMST.2017.2684087.
- PostGIS 3.3.4dev Manual. URL: <http://postgis.net/documentation/manual-3.3/> (дата обращения: 15.03.2024).
- PostgreSQL: The World's Most Advanced Open-Source Relational Database. URL: <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 15.03.2024).
- QGIS A Free and Open-Source Geographic Information System. URL: <https://qgis.org/en/site/> (дата обращения: 15.03.2024).



- Raevich A. P., Dobronets B. S. Developing a conceptual model of operational-analytical data marts // Modelling, optimization and information technologies. – 2019. – Vol. 7, No. 4 – P. 1–13.
- Russell J. P., Shiells G., Kerridge D. J. Reduction of wellbore positional uncertainty through application of a new geomagnetic in-field referencing technique. Technical Paper SPE-30452-MS // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Richardson, TX, USA: SPE. – 1995. DOI: 10.2118/30452-MS.
- Rylnikova M. V., Klebanov D. A., Makeev M. A., Kadochnikov M. V. Application of artificial intelligence and the future of big data analytics in the mining industry // Russian Mining Industry. – 2022. – No. 3. P. 89–92. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-89-92.
- Scikit-learn machine learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (дата обращения: 15.03.2024).
- Shockley J. A., Raquet J. F. Navigation of ground vehicles using magnetic field variations // Navigation. – 2014. – Vol. 61, No. 4. – P. 237–252. DOI: 10.1002/navi.70.
- USGS EROS Archive – Digital Elevation – Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30). – URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30> (дата обращения: 19.05.2025).
- Williamson H. S. Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling // SPE Drilling and Completion. – 2000. – Vol. 15, No. 4. – P. 221–233. DOI: 10.2118/67616-PA.
- Zhang X., He A., Yan J., Shi L., He Z., Kong L. Increasing drilling speed in long horizontal intervals in Aktobe Kazakstan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 300, No. 2. – P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/300/2/022029.



7 Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта

Грант РНФ №: 21-77-30010

Регистрационный №: 121041200191-6

Руководитель: г.н.с. д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко

7.1 Воздействие космической погоды на технологические системы

Показано, что под воздействием ГИТ во время магнитной бури передаваемые токи в ЛЭП оказываются несбалансированными, так что линия становится крупномасштабной антенной и излучает как на основной частоте переменного тока, так и на ее гармониках. Обнаруженный эффект усиления дисбаланса токов в ЛЭП ранее не отмечался и должен учитываться в качестве возможного фактора воздействия космической погоды на энергетические системы.

Показано, что среди параметров межпланетной плазмы и магнитного поля наиболее важным прогностическим фактором появлений пульсаций геомагнитного поля с высокой ГИТ-эффективностью является скорость солнечного ветра. Этот результат должен быть включен в системы прогноза негативного воздействия на энергетические сети возмущений космической погоды.

Для определения наиболее опасных типов геомагнитных возмущений для надежной работы энергетических линий установлено, что ГИТ эффективно возбуждаются на частотах выше 5 МГц иррегулярными колебаниями с широким спектром, охватывающим Pc5/Pi3 и Pc4/Pi2 диапазоны.

Положение экваториальной границы аврорального овала и значение потока энергии, определенные по модели авроральных высыпаний, может использоваться для приближенной оценки области, опасной для работы железнодорожной автоматики. Установлена статистически значимая связь между геомагнитной широтой экваториальной границы аврорального овала и частотой сбоев на авроральном (Мурманском) и субавроральном (Беломорском) участках Октябрьской железной дороги: при интенсивных возмущениях, приводящих к существенному смещению аврорального овала к югу, возрастает доля сбоев на субавроральном участке.

На конкретных примерах показано, что интенсивность магнитной бури, характеризуемая стандартным Dst индексом, не обуславливает величину усиления ГИТ, и что умеренная буря может приводить к более высоким ГИТ, чем сильная буря.

Разработана программа разделения пространственных и временных вариаций магнитного поля в ионосфере по данным двух спутников Swarm. Она позволила исследовать пространственные распределения спектральных параметров естественных электромагнитных шумов диапазона 3-12 Гц в F-слое ионосферы. Показано, что наблюдаемые сигналы представляют собой волновые пакеты длительностью 5-10 периодов, наблюдаемые с малой задержкой на спутниках, разнесенных на расстояние 40-160 км.

Завершены калибровочные испытания прототипа градиентной установки для регистрации ГИТ на обсерватории «Климовская». Проведенные испытания подтвердили характеристики финальной версии прототипа. Подготовлены спецификации для мест размещения и проект документации для запуска градиентной установки в единичное производство.

Выполнена установка абсолютного оверхаузеровского векторного магнитометра ПОС-4 на комплексной магнитно-ионосферной станции «Норильск». Магнитометр стал дополнением к магнитометрическому оборудованию станции. Обновлена инфраструктура станции для бесперебойной передачи минутных и секундных данных с установленных приборов в ГЦ РАН с их последующей обработкой. Установка ПОС-4 позволила локализовать и решить проблемы техногенных шумов, оценить стабильность градиента между измерительными павильонами и, в итоге, выйти на уровень минутного стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Таким образом, сеть магнитных обсерваторий пополнилась новым пунктом высокоточных наблюдений в АЗРФ (рис. 7.1).



Рисунок 7.1 – Магнитная обсерватория «Норильск»: установленный магнитометр ПОС-4 (а) и внешний вид павильонов со специальной морозо- и ветростойкой облицовкой (б)

7.2 Физическая структура земной горы и верхней мантии

Создана численная модель теплопереноса в толще зоны вечной мерзлоты и динамики активного слоя с учетом вариаций теплового потока из недр Земли и климатических факторов (рис. 7.2). Построена уточненная модель теплового потока для континентальной и шельфовой зоны Сибири и Дальнего Востока. Горизонтальное разрешение составляет от 50×50 км для Западной Сибири до 100×100 км в остальной части исследуемой территории. Построена карта прогнозируемых изменений вечной мерзлоты на территории РФ с выделением областей, где ожидается критическая протайка (исчезновение) до 2060 года (рис. 7.3).



Рисунок 7.2 – Блок-схема численного моделирования динамики активного слоя вечной мерзлоты

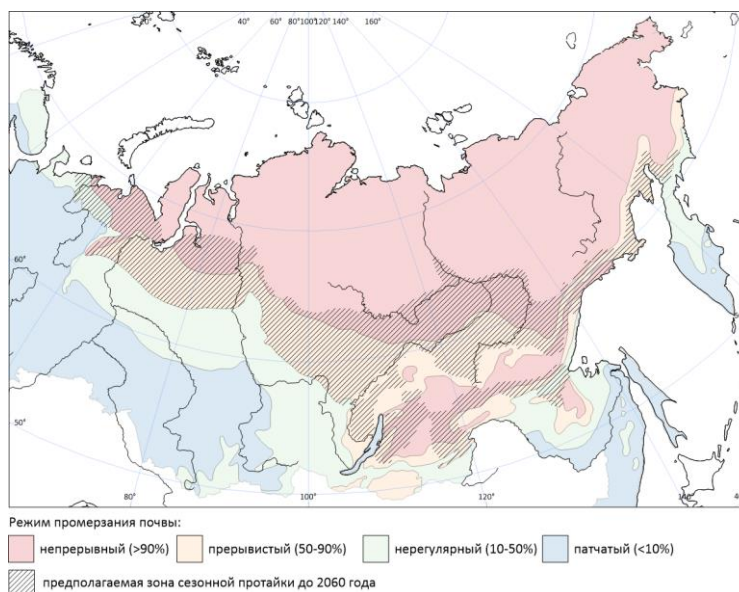


Рисунок 7.3 – Распространение грунтового льда и прогноз предполагаемой зоны сезонной протайки до 2060 года. Карта режима промерзания грунта по [Kotlyakov, Khromova, 2002]

Рассчитаны вариации эффективной мощности упругой литосферы (как прокси её прочности) для северо-восточной части Евразии и сопредельных морей. На основании карты эффективной мощности упругой литосферы определены характеристики границы между Евразийской и Североамериканской плитами. Впервые установлено, что эта граница

в Сибири представляет широкую диффузную зону. Установлена связь распределения сейсмичности с вариациями мощности упругой литосферы (см. рис. 7.1).

Составлена новая карта тектонического районирования Северо-Востока Евразии, которая основана на полученных в ходе проекта моделях литосферы и соответствующих геофизических полей (рис. 7.4). Карта объединяет новые данные о строении и мощности основных осадочных бассейнов региона исследований в континентальной части и на шельфе, областей складчатости и корней литосферы, границе Евразийской и Североамериканской литосферных плит и её характере. Таким образом, данные результаты составили основу новой генерации карты тектонического районирования Северо-Востока Евразии.

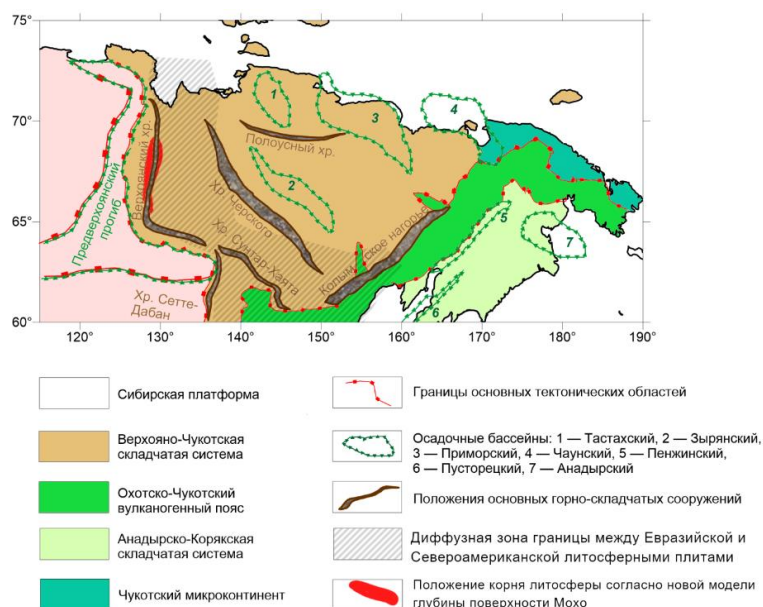


Рисунок 7.4 – Карта характерных тектонических структур северо-восточной части Евразии по совокупности геофизических параметров и истории развития.

7.3 Изучение сейсмической активности

С использованием интегрального каталога землетрясений, ранее созданного в рамках реализации проекта, после процедуры выделения и удаления афтершоков построены модели сейсмического режима фоновых землетрясений (основных толчков) восточного и западного секторов АЗРФ. Модели хорошо соответствуют данным, по которым определены их параметры, о чем свидетельствуют результаты L-теста и проверки восстановления регионального магнитудно-частотного распределения при суммировании локальных МЧР. Для построения моделей и определения их параметров использован строгий легко воспроизводимый алгоритм. В моделях, в отличие от линеаментно-доменно-фокальной (ЛДФ) модели, не использованы данные об активных

сейсмогенных разломах, не проведено разделение рассматриваемого региона на отдельные зоны, не использованы какие-либо другие данные, носящие элементы субъективности. При этом большинство эпицентров сильных землетрясений $M \geq 6.0$ оказалось приурочено к локальным зонам высокой ожидаемой повторяемости землетрясений с $M \geq 6.0$, рассчитанной по модели. Это косвенно говорит о том, что можно ожидать, что модель хорошо предсказывает будущую сейсмическую активность (рис. 7.5–7.6).

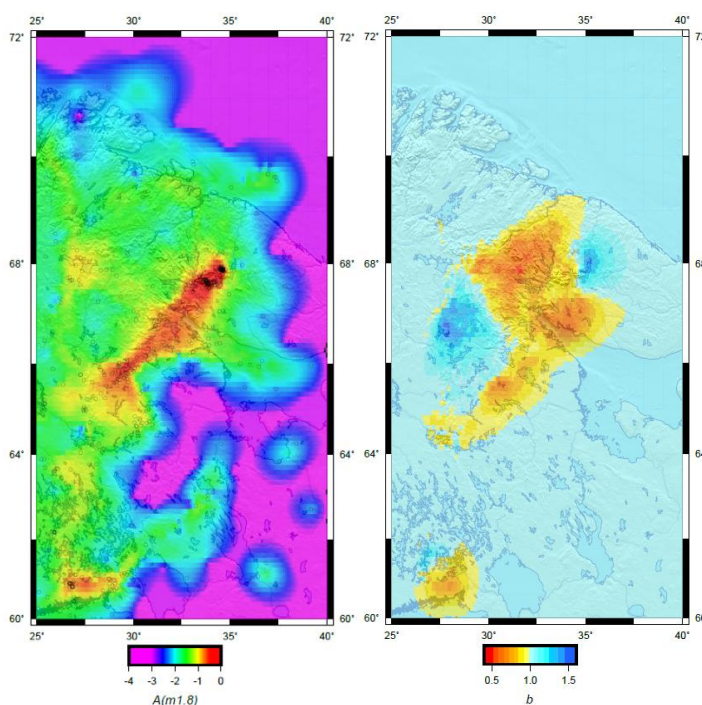


Рисунок 7.5 – Карты активности $A = \lg(N_{1.8})$ и параметра b закона Гутенберга-Рихтера для западного сектора АЗРФ

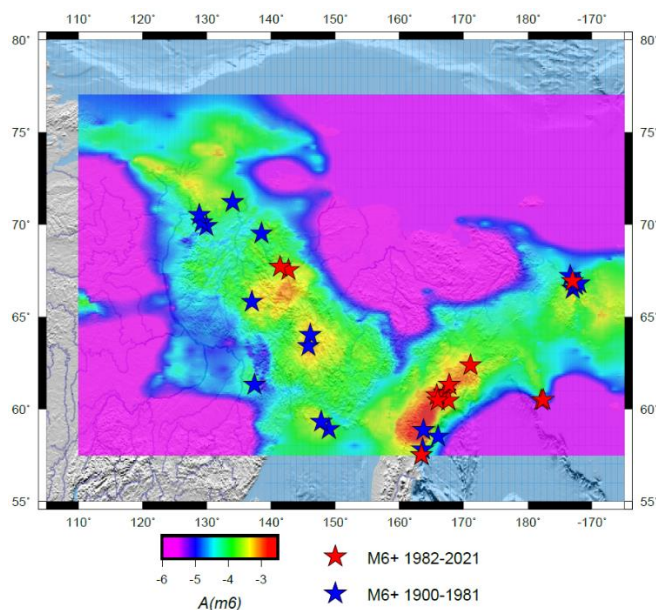


Рисунок 7.6 – Сравнение локальных оценок сейсмической активности $a(m6) = a(M \geq 6.0)$ и положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ (звездочки)

С использованием параметров моделей сейсмического режима построены синтетические каталоги землетрясений АЗРФ на условный период 20 000 лет. Они воспроизводят и моделируют ключевые свойства каталогов фактически произошедших землетрясений в регионе (рис. 7.7). Так, на региональном уровне выполняется закон повторяемости землетрясений разной магнитуды Гутенберга-Рихтера как для каталога в целом, так и каталога основных толчков, в котором удалены афтершоки. Воспроизводятся локальные значения параметров этого закона. Синтетические каталоги включают афтершоки, при этом соблюдаются локальные соотношения числа афтершоков и общего числа землетрясений, оцененные по каталогу реальных событий. В качестве модели пространственного распределения сильнейших ($M \geq 5.5$) землетрясений в восточном секторе АЗРФ использовались результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений по методике FCAZ. Результаты L-теста свидетельствуют о хорошем соответствии синтетических каталогов реальным, как в части только фоновых событий, так и в целом. Построенные синтетические каталоги могут и должны быть использованы для построения карт ОСР. При этом они включают фактор времени, что позволит получать на их основе более точные оценки сейсмического риска, учитывающие пространственные корреляции сейсмических воздействий.

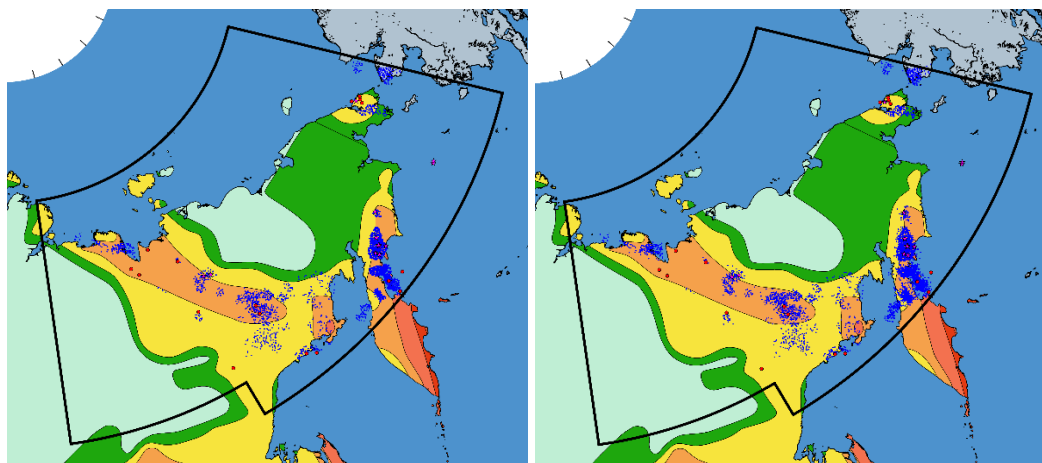


Рисунок 7.7 – Сравнение положения эпицентров с $M \geq 6.0$ в реальном и синтетическом каталогах Восточного сектора АЗРФ. В качестве подложки использованы зоны нормативной балльности по карте ОСР-2015А. Синими точками обозначены эпицентры из синтетического каталога за 20 000 лет (на карте слева – все события, на карте справа – только фоновые), красными кружками – фактические эпицентры за 1900–1981 гг., звездочками – фактические эпицентры за 1982–2020 гг. Рамкой показаны границы рассматриваемого региона



7.4 Исследование климатических процессов

Показано, что для температуры воздуха критерий в 2 сигмы даёт значения -8.36°C для аномально низкой температуры и -13.06°C для экстремально низкой температуры в случае 3 сигм. Порог значений для аномально высокой температуры воздуха $+10.43^{\circ}\text{C}$ в случае 2 сигмы и $+14.13^{\circ}\text{C}$ в случае 3 сигм. Если использовать процентиля в качестве пороговых значений, то 1-й и 99-й процентиль дают значения -18.99°C и $+17.80^{\circ}\text{C}$, соответственно; 5-й и 95-й процентиль дают значения -14.74°C и $+15.15^{\circ}\text{C}$, соответственно; 10-й и 90-й процентиль дают значения -12.10°C и $+13.18^{\circ}\text{C}$ соответственно. Аналогичные значения вычисленных критериев получены для влажности воздуха, скорости ветра, температуры почвы, влагосодержания почвы, атмосферных осадков и толщины снежного покрова.

Согласно критерию «5-й процентиль» экстремально низкая температура воздуха наблюдалась в 1984–1986, 1981–1982, 1997–1999, 2010 и 2020–2021 годах, а критерию «95-й процентиль» экстремально высокая – в 1987, 1989, 2001, 2008, 2011, 2022 годах.

Анализ климатических изменений показал, что для устойчивого состояния инфраструктуры и функционирования железнодорожного транспорта необходимо проведение исследования дополнительных климатических параметров: максимальная скорость ветра (порывы ветра), атмосферные осадки за 3 часа (интенсивность осадков), количество дней с туманами, максимальная температура воздуха летом, минимальная температура воздуха зимой, количество дней с переходом через ноль градусов, волны тепла (количество дней подряд с температурой воздуха, превышающей пороговое значение, зависящее от исследуемого региона), волны холода (количество дней подряд с отрицательной температурой воздуха, превышающей пороговое значение, зависящее от исследуемого региона), продолжительные осадки в виде дождя и снега (количество дней подряд с осадками, превышающими пороговое значение). Особое внимание следует уделять месяцам с максимальными или минимальными значениями температуры воздуха или почвы; месяцам, в которых происходит переход через ноль градусов; с максимальными значениями скорости ветра, атмосферных осадков, толщины снежного покрова. Следует обратить особое внимание на смещение, удлинение или сокращение сезонов, определяемых, например, по температуре воздуха. На рис. 7.8 представлены диаграммы Хофмюллера межгодовой изменчивости отклонений годовых распределений некоторых из рассматриваемых климатических параметров от климатического распределения за период 1980–2022 гг.

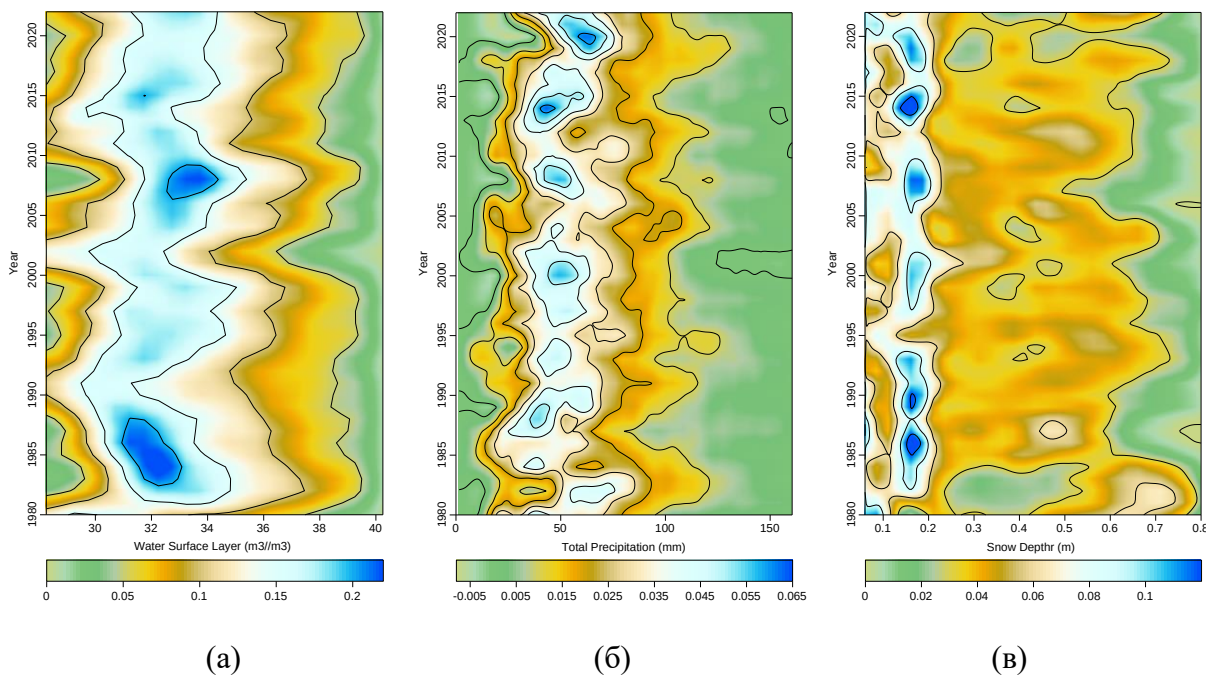


Рисунок 7.8 – Отклонений годовых распределений климатических параметров от климатического распределения за период 1980–2022 гг.: влагосодержание верхнего слоя почвы 0–10 см ($\text{м}^3/\text{м}^3$) (а); влажность воздуха на высоте 2 метра ($\text{кг}/\text{кг}$) (б); высота снежного покрова (м) (в)

Для составления баланса метана, выделяющегося с океанической поверхности и выбрасывающегося в атмосферу, была выписана система кинетических уравнений, которые определяют влияние скорости производства метана донными отложениями, скорости образования пузырьков метана и скорости перехода границы океан-атмосфера. Итоговое кинетическое уравнение состоит из следующих членов: скорость производства метана; скорость коалесценции газовых пузырьков; скорость оседания метана на поверхности препятствий; скорость десорбции молекул, то есть переход обратно; выход метана с поверхности океана.

7.5 Геоинформационное сопровождение

Завершено преобразование базы геопространственных данных в формат нового ПО NextGIS. Завершена конвертация более чем 150 растровых и векторных слоев пространственных данных по основным тематическим направлениям. Проработана возможность включения метаданных по группам слоев и отдельным слоям данных. Завершено развертывание интерактивного тематического геопортала «Арктика» (<https://arctic-gis.gcras.ru/>). Итоговая версия геопортала запущена в работу и предоставлена пользователям с разным уровнем доступа к базе геопространственных данных проекта (рис. 7.9–7.10).

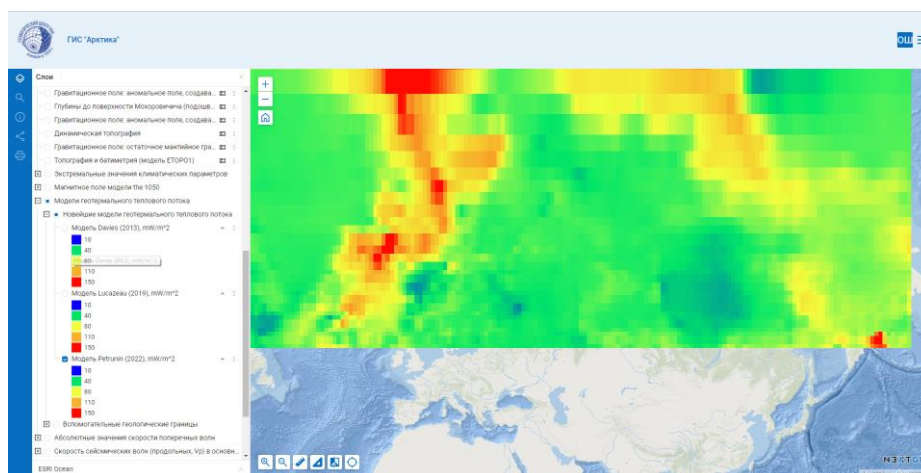
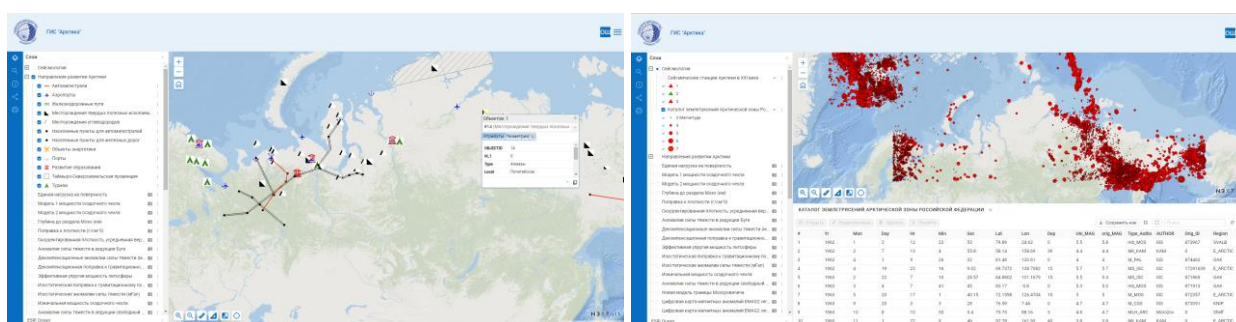


Рисунок 7.9 – Пример отображения слоев на геопортале «Арктика»



(а)

(б)

Рисунок 7.10 – Возможность просмотра информации об объекте (а) и таблицы атрибутов (б) векторного слоя

Описана функционально расширенная и оконченная единая геоинформационная система интерактивной сферической визуализации (ИСВ), выполняющая роль унифицирующего звена обработки глобальных геопространственных данных в системах виртуальных и тактильных гиперглобусов. Данные по АЗРФ, полученные и агрегированные на текущем и предыдущих этапах выполнения проекта, были сформированы в БД «База сферических визуализаций: Арктика», включающую в себя коллекцию карт, в статике и динамике отображающих атмосферные, климатические, геолого-геофизические и иные процессы АЗРФ, в сопряжении с сопроводительными научно-художественными материалами на русском и английском языках в формате PDF: легенда (или схема-описание) и справочная презентация с иллюстрациями (рис. 7.11).



Рисунок 7.11 – Фрагмент слайда ИСВ виртуального (слева) и тактильного (справа) типа «Грузопассажирские перевозки в / на подходах к акватории Северного морского пути»

7.6 IV Всероссийская школа молодых ученых

Проведена IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (4–7 июня 2024 г.) в Подмосковье. Школа собрала более 65 участников, из них 19 российских ученых-лекторов и 38 слушателей – российских молодых ученых в возрасте до 35 лет включительно со всей России (рис. 7.12). На лекциях и семинарах Школы широко освещались вопросы геологии, геофизики, палеомагнетизма, климатологии, океанологии, дистанционного зондирования, геоинформатики и системного анализа, Больших данных, материаловедения, транспорта и других смежных дисциплин (<https://school2024.gcras.ru>, <https://t.me/geoarctic>).



Рисунок 7.12 – Слушатели IV Всероссийской школы молодых ученых «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (слева) и групповое фото участников школы (справа)

Список использованных источников

Kotlyakov V., Khromova T. Land Resources of Russia – Maps of Permafrost and Ground Ice, Version 1 // Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2002. <https://doi.org/10.7265/zpm9-j983>



8 Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)

Грант РНФ №: 23-17-00176

Регистрационный №: 123070600012-8

Руководитель: зам. директора по науке, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов

С использованием наиболее полного и представительного каталога землетрясений Осетинского сектора Большого Кавказа с однородной магнитудной шкалой, подготовленного в рамках реализации гранта в 2023 г. и содержащего сейсмические события за 1962–2022 гг. из советских, российских и международных каталогов [Vorobieva *et al.*, 2024a], после процедуры выделения и удаления афтершоков построена модель сейсмического режима фоновых землетрясений (основных толчков) (рис. 8.1).

Модель построена на регулярной сетке с шагом 0.1° по широте и долготе и учитывает распределение эпицентров фоновых землетрясений (без учета афтершоков) в пространстве и локальные распределения событий по магнитуде в предположении выполнения закона Гутенберга-Рихтера. При построении модели не ставилась задача получения локальных оценок максимальной возможной магнитуды. Модель представляет собой таблицу оценок значений двух параметров для каждой ячейки (i, j) регулярной сетки: ожидаемого числа событий $\lambda_{i,j}$ магнитудой $M \geq M_c$ в ячейке в единицу времени (рис. 8.1a) и параметра $b_{i,j}$ закона Гутенберга-Рихтера (рис. 8.1б). Модель обеспечивает отсутствие эффекта чрезмерного сглаживания. Она учитывает фрактальную структуру системы разломов и, соответственно, пространственного распределения эпицентров. Такой учет важен при нормировании на размер ячейки регулярной сетки числа событий, подсчитанного в области, размер которой намного больше. Для построения модели сейсмического режима Осетинского сектора использовался новый высококонтрастный «метод среднего положения», подробно описанный в [Shebalin *et al.*, 2024; Vorobieva *et al.*, 2024b], в котором значения определяются в кругах значительного радиуса, но приписываются среднему положению эпицентров.

При вычислении параметров модели события из интегрального каталога брались, начиная с 1995 г., т.к. ранее уровень регистрации достаточно низкий. С помощью количественного метода верификации, L -теста, основанного на функции правдоподобия, продемонстрировано, что построенная модель хорошо соответствует исходным данным. В пользу достоверности модели говорит и результат суммирования локальных магнитудно-частотных распределений (МЧР), восстанавливающий региональное МЧР.

Сравнение локальных оценок сейсмической активности $a(M \geq 6.0)$ (рис. 8.1в) и положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$, как использованных при определении параметров модели (1995–2022 гг.), так и произошедших за 1900–1994 гг. (7 из 8 произошли до 1995 г.) показало, что большинство эпицентров сильных землетрясений приурочено к локальным зонам их высокой ожидаемой повторяемости.

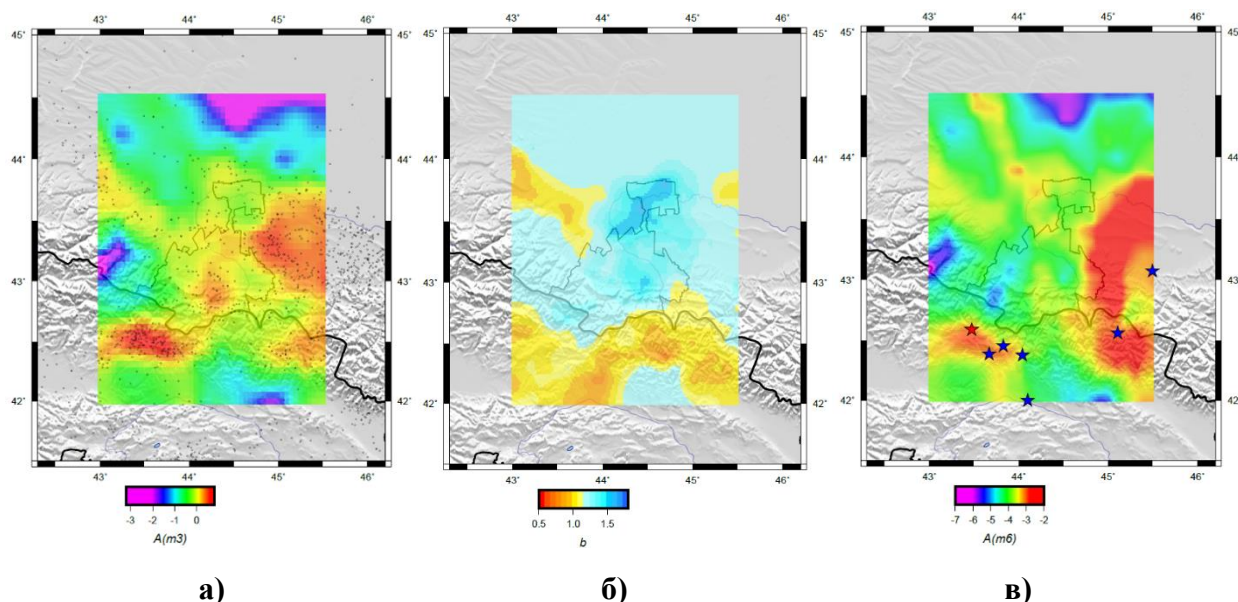
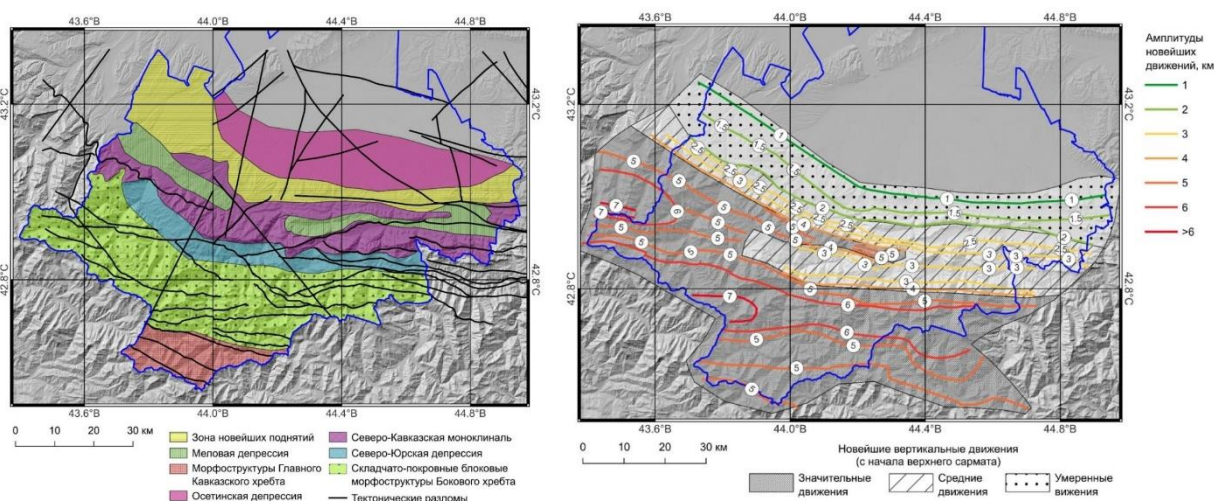


Рисунок 8.1 – Осетинский сектор Большого Кавказа: а) локальные оценки сейсмической активности $a(m3)$; б) локальные оценки параметра $b_{i,j}$ закона Гутенберга-Рихтера; в) сравнение локальных оценок сейсмической активности $a(m6)$ и положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$

На основе комплексного анализа геолого-геофизических данных установлено соотношение между морфоструктурами и современными геодинамическими процессами, проведены полевые геоморфологические исследования на территории Осетинского геодинамического полигона и выполнено дешифрирование морфолинеаментов с учетом [Аристархова, 2000]. Для оценки геодинамической активности территории применялись следующие геоморфологические показатели: плотность морфолинеаментов и индекс извилистости горного фронта (S_{mf}) [Bull, 2008], индекс нормированной крутизны русла (K_{sn}) [Wobus et al., 2006], плотность точек перегиба продольных профилей эрозионной сети.

В целях верификации полученных результатов выполнена программа полевых геоморфологических работ, на базе которых составлены проекты региональных карт морфоструктур и новейших движений (рис. 8.2). На них в горной части Республики Северная Осетия-Алания (РСО-А) выделены следующие морфоструктуры: Осетинская депрессия, зона новейших тектонических поднятий (амплитуда вертикальных движений с начала верхнего сармата +1 – +1.5 км), Северо-Кавказская моноклираль (+1.5 – +5 км), Меловая депрессия (+2 – +2.5 км), Северо-Юрская депрессия (+3 км), Боковой и Главный

Кавказский хребты (+4 – +7 км).



а)

б)

Рисунок 8.2 – Горная часть РСО-А: а) Морфоструктуры; б) Новейшие вертикальные движения (на основе [Теплякова, 1984])

Пространственная ориентация выявленных региональных морфолинеаментов совпадает с установленными разрывными нарушениями [Геологическая..., 2006]. Наиболее высокая плотность морфолинеаментов отмечается в зонах контакта новейших поднятий и Осетинской депрессии, что может свидетельствовать о современном тектоническом подъёме этой области. Данные выводы подтверждаются результатами полевых наблюдений. Максимальная плотность морфолинеаментов наблюдается также в зоне сближения Владикавказского и Ардонского глубинных разломов и в восточной части исследуемой территории – в районе с. Тарское. Здесь обнаружены два крупных морфолинеамента, ранее не идентифицированных.

Значения S_{mf} вдоль южного обрамления Осетинской депрессии составляют 1,0–1,27, что говорит о высокой тектонической активности территории. Отсутствие большого разброса свидетельствует о том, что горы имеют приблизительно одинаковые темпы тектонического поднятия. Высокие значения индекса K_{sn} позволяют идентифицировать области интенсивного врезания рек, что указывает на зоны с повышенными скоростями тектонического поднятия. Значения индекса распределены относительно равномерно (варьируются от 50–200). Выделена линейная зона с аномально высокими значениями K_{sn} , расположенная между Бурон-Ларским и Шаухохскими поддвигами [Греков и др., 2006] ($K_{sn}=400–500$). Она четко выделяется увеличением плотности точек перегибов продольных профилей рек, что в том числе может являться признаком геодинамической активности.

Кроме того, в процессе полевых исследований определены отдельные локальные участки с увеличенными значениями $K_{\text{сп}}$. В одном из них выявлены признаки возможных сейсмодислокаций. Это подчёркивает важность дальнейшего изучения территории для понимания ее современной геодинамики.

На Осетинском геодинамическом полигоне проведен повторный цикл наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) с использованием средств ГНСС. Наблюдения проводились по аналогичной схеме размещения приёмников, использованной в 2023 г. Для проведения измерений использовалось семь комплектов оборудования: четыре комплекта ГНСС-приёмников PrinCe P5U с антенной типа choke-ring C220GR и три комплекта ГНСС-приёмников Javad Delta 3N с антеннами JAVGRANT-G3T и G5T. В результате полевой кампании измерения удалось провести на 36 пунктах геодинамического полигона. Продолжительность наблюдений на каждом пункте составляла от 4 до 12 часов. Обработка данных проводилась с использованием программы *MAGNET Tools*, при этом учитывались точные эфемериды спутников. Среднеквадратические отклонения (СКО) координат пунктов находились в пределах 2–3 мм в горизонтальной плоскости и 4–6 мм по высоте. Средние значения СКО составили 2.9 мм в плане и 5.7 мм по высоте.

На территории РСО-А большинство постоянно действующих ГНСС станций размещено на равнинной части и в населенных пунктах. Например, в г. Владикавказ действует 4 станции. Наличие всего двух пунктов в горной части региона ограничивает точность, т.к. это увеличивает длину базовых линий ГНСС-измерений. Для оценки пространственной неоднородности расположения станций построена триангуляция Делоне, и рассчитано отношение радиусов описанной и вписанной окружностей (R/r), которое составило 3. Такое значение существенно ухудшает точность определения деформаций. Критические формы конечных элементов характерны для границ на контуре геодезической сети.

Проведено обследование перспективных мест для закладки новой постоянно действующей базовой станции (БС) ГНСС. Особое внимание уделялось: качеству приема ГНСС-сигналов, транспортной доступности, существующей инфраструктуре для создания постояннодействующей станции, сохранности оборудования, грунтовому основанию геодезического центра и оценке возможности развития экзогенных процессов, влияющих на стабильность геодезического пункта. При рекогносцировке детально изучено 7 мест



на которых выполнены тестовые измерения для инструментальной оценки радиовидимости горизонта местности и оценка общих условий: источников помех сигналам ГНСС, график маски отсечения сигналов ГНСС, наличие инфраструктуры и транспортной доступности. Установлено, что: 5 мест подходят по своим условиям для установки постояннодействующей БС, 1 место – для установки временной БС, выполняемых на период измерений в полевых кампаниях, 1 место – для установки периодически измеряемой БС в полевых кампаниях.

Создана ГИС-ориентированная база геолого-геофизических, геоморфологических и геодезических данных региона, оптимизированная для обработки методами и алгоритмами системного анализа. База данных (БД) содержит данные механизмов очагов сильных землетрясений, ГНСС-измерений, полевых исследований трещин и разрывов. Визуализация результатов в ГИС отображает азимуты главных напряжений. БД реализована в программной среде QGIS Desktop в виде векторных shape-файлов, растровых изображений с геопривязкой, таблиц, карт, отчетов и т.д. и состоит из: 1) данных, полученных из открытых и архивных источников (карты, космические снимки, отчеты, статьи, публикации и т.д.); 2) результатов инструментальных измерений, полученных в рамках проекта; 3) авторских результатов математического моделирования и геолого-геофизической интерпретации.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) использованы две структурно-тектонические схемы. Первая основана на материалах исследований Е.А. Рогожина, вторая – на основе Государственной геологической карты. Размер модельной области составляет $150 \text{ км} \times 150 \text{ км}$.

Расчёт НДС производился методом конечных элементов с использованием четырёхугольных изопараметрических элементов. Разломы вводились в расчётную схему с учётом зоны динамического влияния радиусом 300 м. В первой модели учтено 14 разломов длиной от 15 до 200 км, во второй – 35 разломов, длина которых не превышает 60 км. Модель была принята в виде упруго-изотропного слоя земной коры с модулем Юнга $E=60 \text{ ГПа}$, для разломных зон модуль Юнга принят на два порядка ниже, коэффициент Пуассона 0,25.

Использовано два варианта граничных условий внешних усилий, заданных по геодезическим измерениям и полевому геологическому обследованию. В первом случае ось максимального горизонтального сжатия SH_{max} ориентирована под углом 10° СВ . Во

втором варианте по результатам полевых измерений трещиноватости ось SH_{max} задана под углом 65° СВ. Для расчётов приняты следующие абсолютные значения усилий: горизонтальное сжатие $SH_{max}=30$ МПа, горизонтальное сжатие $Sh_{min}=10$ МПа.

Построенные карты распределения интенсивности напряжений и отношений главных напряжений позволили выявить области концентраций напряжений. Анализ показал наличие локальных областей повышенных напряжений. Эти зоны могут стать в будущем очагами новых тектонических нарушений, образованных как в режиме крипа, так и в результате сейсмических событий.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о необходимости пересмотра методологических подходов к построению моделей НДС. Прежде всего, распределение полей напряжений характеризуется ярко выраженной анизотропией как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальном направлении. Выплачивание разломов указывает на доминирование горизонтальных напряжений на глубинах от 5 до 20 км. Вероятно, до глубины 5 км геодинамические условия соответствуют преимущественно гравитационным силам (модель Динника). Однако начиная с глубины 5 км, горизонтальные напряжения, направленные поперек простирания Кавказского хребта, увеличиваются (модель Хаста). Эта же закономерность прослеживается и при анализе распространения продольных упругих сейсмических волн по глубине, что подтверждает выдвинутую гипотезу. В сейсмоактивном слое (5–25 км) следует ожидать формирования зон с высокими градиентами касательных напряжений. Таким образом, моделирование НДС в двухмерной постановке оказывается неэффективным, поскольку оно не учитывает анизотропию структуры и физических характеристик среды. Поэтому дальнейшее исследование должно проводиться исключительно в рамках 3D моделей.

Выполнен анализ современных движений земной коры, включающий сопоставление данных по тектонике, сейсмичности, напряженно-деформированному состоянию и геофизическим параметрам. Основной задачей являлось создание геодинамической модели развития региона, учитывающей структуру тектонических формирований первого и второго порядка. В качестве исходных материалов использовались оцифрованные данные геодезических наблюдений за вертикальными перемещениями земной коры за последние сто лет, ГНСС-данные за 30 лет, а также карты неотектонических структур, сейсмологические и геоморфологические сведения различных авторов.



Первая карта вертикальных смещений земной коры охватывает начальную и конечную эпохи повторного нивелирования с 1925 по 1937 годы и с 1946 по 1950 год [Карта..., 1971, 1973]. Вторая картографическая модель вертикальных СДЗК составлена в рамках [Карта..., 1986, 1989]. Третья модель отражена в работе [Кафтан и др., 1995].

Геодинамическую модель Большого Кавказа на новейшем этапе тектонического развития Кавказа наиболее емко сформулировал Ю.Г. Леонов [Большой..., 2007]. Модель геодинамической эволюции региона в новейшее время представляется следующим образом.

1. Главный источник новейших и современных движений Аравийская плита [Reilinger et al., 2006]. В итоге происходит укорочение земной коры в меридиональном направлении и расширение – в субширотном, что подтверждено результатами ГНСС-наблюдений и нивелированием [McClusky et al., 2000].

2. Северный выступ плиты упирается в прочный слой океанической литосферы и меняет направление движения: под углом 90° на западное по Восточно-Анатолийскому разлому и северо-восточное – в Малый Кавказ. Непосредственно с Большим Кавказом взаимодействует система сдвиговых разломов Малокавказской дуги [Большой..., 2007].

3. Давление вызывает подвиг коры Закавказской плиты под окраину Скифской. По данным геофизики между ними находится «прослой» менее плотных, подверженных деформированию пород. Это является причиной подъема Большого Кавказа. При этом в направлении с юга на север абсолютные значения скоростей СДЗК по ГНСС-данным – уменьшаются. Наибольшая скорость отмечена для территории, лежащей к югу от Главного Кавказского разлома.

4. Этот глобальный процесс накладывается на блоковое строение и приводит к формированию деформаций. Различия в скоростях и направленности современных вертикальных и горизонтальных СДЗК, приводят к образованию участков с высоким уровнем кулоновских напряжений. Результаты моделирования [Ребецкий, 2020] показывают, что кулоновские напряжения в блоковой среде могут быть подвержены резким изменениям при высоких скоростях деформаций и приводить к коровым землетрясениям.

Нивелирование показало, что на протяжении 100 лет горные сооружения Кавказа испытывают подъем. Периоды со скоростью подъема более 10 мм/год, чередуются с периодами малых скоростей. Продолжается тенденция тектонической эволюции региона, свойственная ему, по крайней мере со среднего палеогена. Зоны современных поднятий

согласуются с аномалиями геофизических полей и геоморфологическими особенностями. Подъемы демонстрируют пространственно-временную связь с землетрясениями, очаги которых находятся преимущественно в зонах повышенных градиентов скоростей вертикальных движений. Землетрясения происходят после завершения периодов наиболее быстрых движений в течение первых десятилетий после них. Вероятно, в это время в массиве отмечается цикл накопления упругой энергии.

Согласно современным представлениям, сейсмотектоническое деформирование верхней части земной коры Кавказа характеризуется надвигообразованием, со свойственным ей субгоризонтальной ориентацией главной оси сжатия (юг-юго-восток – север-северо-восток) и субвертикальной ориентацией главной оси растяжения. Эти особенности подтверждаются результатами ГНСС-наблюдений. На территории Горной Осетии активно проводились исследования современных движений земной коры средствами ГНСС. Первые результаты получены в 2009–2011 гг. В рамках этих работ созданы 2 полигона: первый, ориентированный на мониторинг восточных ветвей Владикавказского разлома; второй – пересекающий главный Кавказский хребет по территории Северной и Южной Осетии. В результате деформационного анализа получены оценки действующих деформаций для 115 конечных элементов сети. Их важным достоинством, в сравнении с другими источниками данных является покрытие равнинной части территории РСО-А. В каталогах данных «World Stress Map» и «Global CMT Project» отсутствуют ориентации осей действующих напряжений для территории РСО-А. Некоторый объем данных присутствует в приграничной зоне со стороны Грузии (27 точек). Поэтому в августе 2024 г. выполнена полевая съемка разрывов. Площади обнажений пород варьировались от 10 до 100 м². Измерения проведены на 19 площадках.

На основе интеграции региональных данных о механизмах очагов землетрясений [Ребецкий, 2020], информации, полученной с помощью ГНСС-измерений и полевой съемки трещин, разработан проект региональной карты осей главных действующих напряжений сжатия Sh_{max} (рис. 8.3).

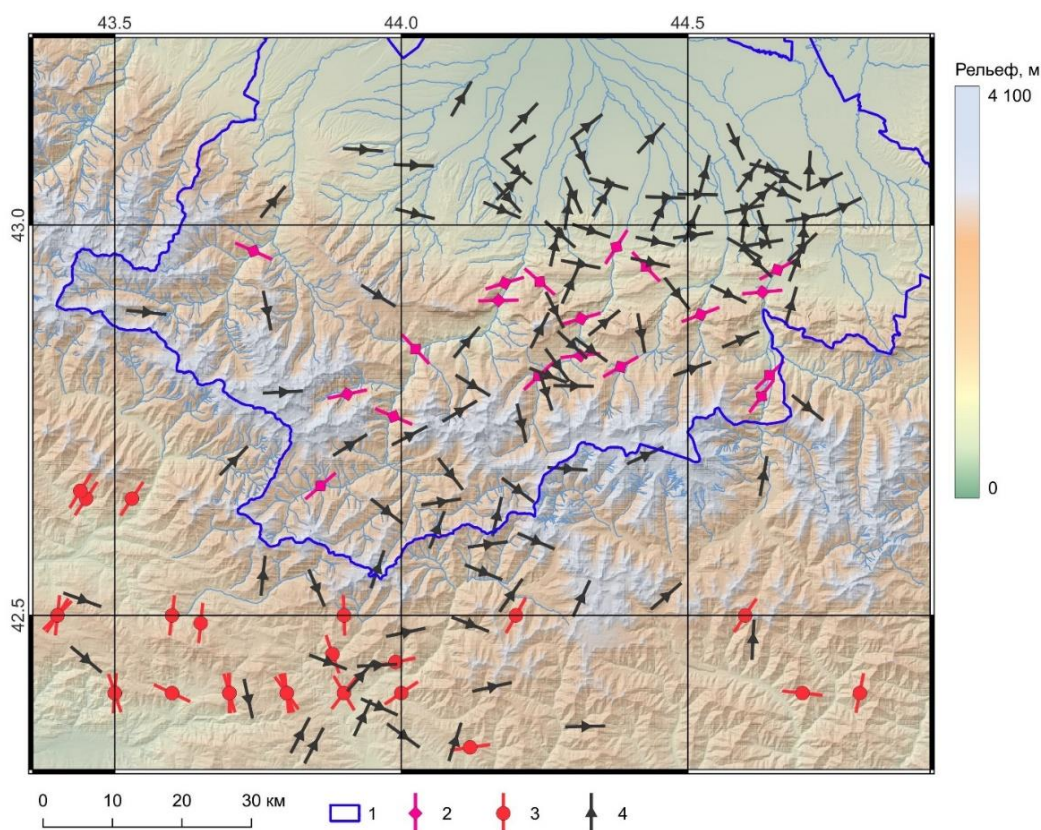


Рисунок 8.3 – Карта главных действующих напряжений Горной Осетии: 1 – границы РСО-А; 2 – восстановленные ориентации осей напряжений по результатам полевой съемки трещин; 3 – ориентации осей напряжений, восстановленные по данным механизмов очагов сильных землетрясений; 4 – ориентации осей напряжений по результатам геодезических измерений

Список использованных источников

- Аристархова Л. Б. Морфоструктурный анализ аэрокосмических снимков и топографических карт. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 65 с.
- Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю. Г. Леонова. – М.: ГЕОС, 2007. – 368 с.
- Геологическая карта Республики Северной Осетии-Алании. Издание второе. Серия Кавказская. Лист К-38-IX, XV (Владикавказ). Письменный А. Н., Зарубина М. А., НРС Роснедра. – 2006 г.
- Греков И. И., Письменный А. Н., Энна Н. Л. Тектодинамика Ардонской очаговой зоны на Большом Кавказе // Региональная геология и металлогения. – 2006, №. 28. – С. 48–59.
- Карта современных вертикальных движений Восточной Европы, м-б 1:10 000 000. – М.: ГУГК СССР, 1971 г.
- Карта современных вертикальных движений Восточной Европы, м-б 1:2 500 000. – М.: ГУГК СССР, 1973 г.
- Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть), Чехословакии. Масштаб 1:25 000 000. – М.: ГУГК, 1986.

Карта современных вертикальных движений на территорию СССР, м-б 1:5 000 000. – М.: ГУГК СССР, 1989 г.

Кафтан В. И., Кузнецов Ю. Г., Серебрякова Л. И., Вережнина А. В. Карта скоростей вертикальных движений земной поверхности Прикаспийского региона // Геодезия и картография. – 1995. – № 12. – С. 18–21.

Ребецкий Ю. Л. Современное напряженное состояние коры Кавказа по данным объединенного каталога механизмов очагов землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 17–29. DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0459.

Теплякова А. С. Основные этапы развития рельефа и новейшая структура Горной Осетии. Кандидатская диссертация. – 1984. – 251 с.

Bull W. B. Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology. – Oxford: John Wiley & Sons, 2008. – 328 p.

McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksöz M.N., Veis G. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105, Is. B3. – P. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351.

Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2006. – Vol. 111, Is. B5. – B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.

Shebalin P. N., Baranov S. V., Vorobieva I. A., Grekov E. M., Krushelnitskii K. V., Skorkina A. A., Selyutskaya O. V. Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 515. – P. 514–525. DOI: 10.1134/S1028334X23603115.

Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., Gvishiani A. D., Zaalishvili V. B., Sergeeva N. A., Nikitina I. M. Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus // Applied Sciences. – 2024a. – Vol. 14, Is. 1. – 172. DOI: 10.3390/app14010172.

Vorobieva I. A., Grekov E. M., Krushelnitskii K. V., Malyutin P. A., Shebalin P. N. High Resolution Seismicity Smoothing Method for Seismic Hazard Assessment // Russian Journal of Earth Sciences. – 2024b. – Vol. 24. – ES1003. DOI: 10.2205/2024ES000892.

Wobus C., Whipple K., Kirby E., Snyder N., Johnson J., Spyropolou K., Crosby B., Sheehan D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls // Special Paper of the Geological Society of America. – 2006. – Vol. 398. – P. 55–74. DOI: 10.1130/2006.2398(04).



9 Определение пространственно-временной структуры магнитного поля Земли в окрестностях геомагнитных обсерваторий РФ с применением БПЛА

Грант РНФ №: 24-17-00346

Регистрационный №: 124071200020-3

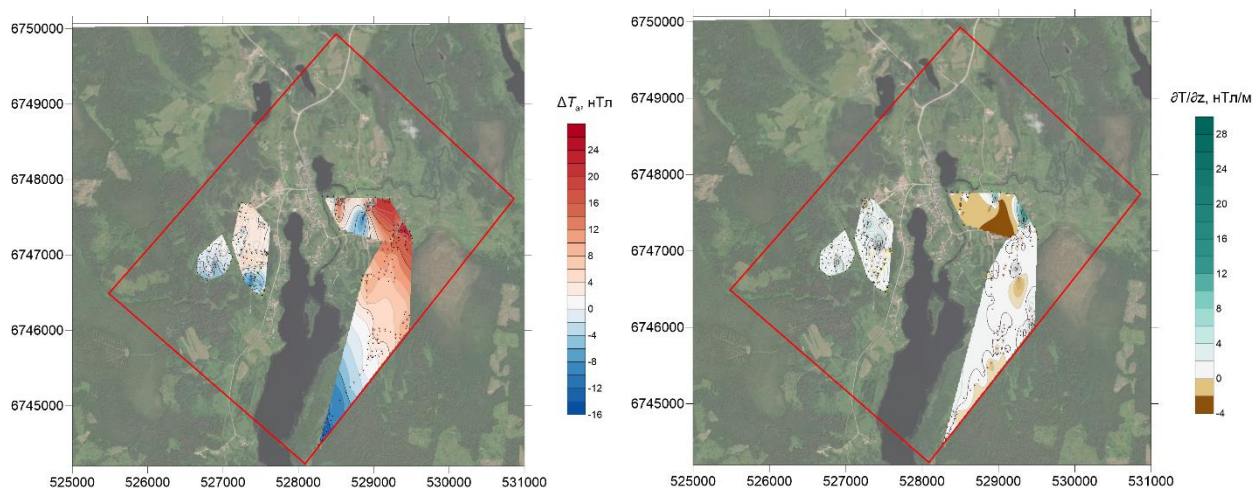
Руководитель: чл.-корр. РАН директор А. А. Соловьёв

9.1 Проведение многоэшелонной градиентной магнитной съёмки в окрестности геомагнитных обсерваторий

При проведении аэромагнитной съёмки с применением беспилотных воздушных средств (БВС) предложен метод измерения вертикального градиента с помощью так называемой повысотной съёмки. Под этим термином мы понимаем совокупность измерений над одним и тем же участком поверхности на нескольких уровнях, расположенных на разных по вертикали удалениях от неё. Если расстояния между уровнями достаточно мало, то такая техника позволяет приблизительно рассчитать площадное распределение вертикального градиента.

Были проделаны многоуровневые измерения магнитного поля в окрестностях трёх геомагнитных обсерваторий («Санкт-Петербург», «Михнево», «Климовская»). В окрестности обсерватории «Борок» была выполнена только аэрофотосъёмка, аэромагнитные измерения не проводились в связи с работой систем РЭБ. Для каждого уровня было рассчитано аномальное магнитное поле. На основании полученных данных был рассчитан вертикальный градиент модуля аномального поля и построены карты. Измерения и расчёты были выполнены для двух участков, один из которых не содержит заметных магнитных аномалий, а на другом такие аномалии присутствовали. Сравнение полученного результата с распределением вертикального, вычисленного традиционным методом, показало, что результат повысотной съёмки позволяет получить более качественное распределение.

В результате сопроводительной пешеходной съёмки в окрестностях обсерваторий построены первичные grids аномальной составляющей и вертикального градиента магнитного поля Земли (рис. 9.1). Изучено распределение магнитных аномалий, сделаны выводы о характерных особенностях, связанных с литосферными аномалиями. Сформированы grids данных для последующего расчёта инверсии на основе аэромагнитных и наземных данных.



(а)(б)

Рисунок 9.1 – Результаты выполнения пешеходной магнитоградиентметрической съемки в окрестности геомагнитной обсерватории «Климовская» (Архангельская обл.): аномальная составляющая (а) и вертикальный градиент (б) магнитного поля

9.2 Создание и программная реализация методов интерпретации результатов аэромагнитной съёмки

Подготовлен обширный обзор методов решения обратной задачи магниторазведки, включающий результаты многоуровневых магнитометрических съемок, подходы к вычислению компонент магнитного поля по значениям модуля вектора магнитной индукции, заданным на разных уровнях, последовательное моделирование распределения намагниченности для заданного участка и совместное моделирование по магнитному полю, наблюдаемому на разных высотных уровнях.

В качестве тестовых данных использовались полученные ранее результаты аэромагнитной съемки, проведенной на трех высотных уровнях на участке «Вялимяки» (респ. Карелия), поскольку регион характеризуется сильно контрастными аномалиями. Выполнено построение ряда трехмерных моделей распределения намагниченности с использованием последовательного и совместного моделирования источников аномального магнитного поля, построены соответствующие карты. Все расчеты выполнены с одинаковыми начальными параметрами решения обратной задачи.

При последовательном моделировании получены следующие выводы. При подборе только на нижнем высотном уровне погрешность подбора для полей на больших высотах ниже за счет эффекта затухания магнитного поля с высотой. При последовательном моделировании сверху вниз погрешность подбора уменьшается медленнее, чем при подборе на одной высоте. При последовательном моделировании снизу вверх после одного цикла подбора (3 итерации) погрешность подбора на верхнем высотном уровне также

оказывается минимальной, но в абсолютном выражении она выше, чем при подборе сверху вниз. Использование двух циклов подбора (6 итераций) демонстрирует динамику на общее снижение погрешности на всех высотных уровнях (рис. 9.2). Повышенное значение погрешности подбора на нижнем высотном уровне по отношению к более высоким высотным уровням может быть связано с 1) погрешностями наблюдаемых полей; 2) неучетом реальной поверхности наблюдения при моделировании; 3) неучетом реальной дневной поверхности, под которой располагаются подбираемые источники поля, при моделировании.

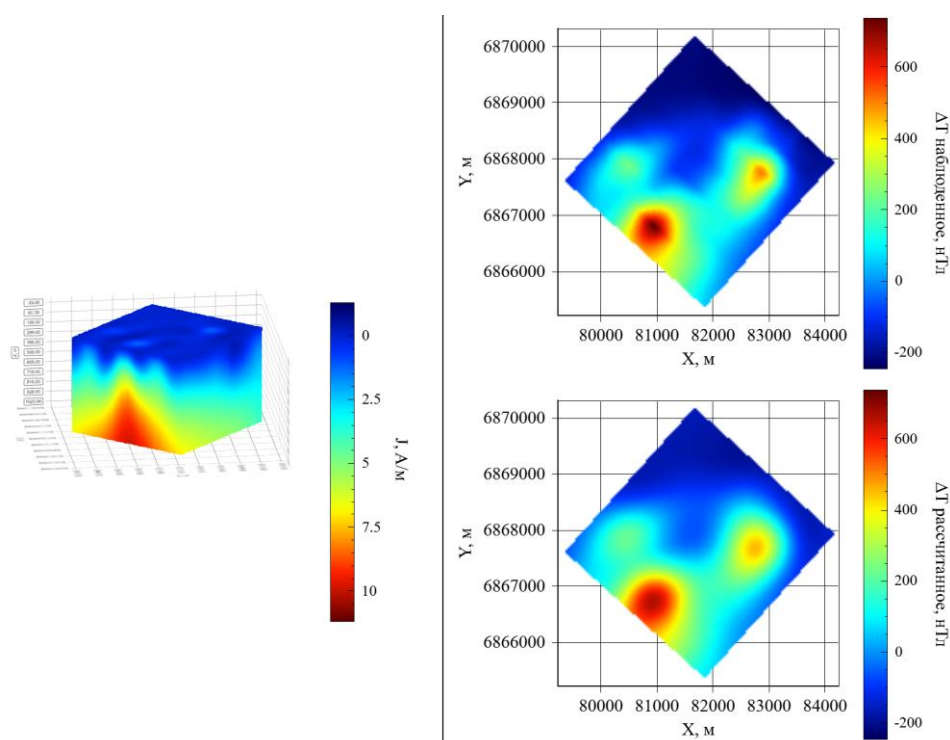


Рисунок 9.2 – Итоговая модель, полученная по 6 итерациям инверсии поля на высотах 340 м, 370 м, 400 м над рельефом

При выполнении совместной инверсии с использованием магнитного поля, наблюдаемого на двух и более высотных уровнях на тестовом примере, были получены следующие результаты. Поскольку погрешность была задана в виде случайного распределения, не зависящего от высоты, использование двух и более уровней не позволяет проникнуть ошибкам в подбираемое распределение намагниченности. В результате подбираемая модель намагниченности даже при двух уровнях наблюдений в несколько раз лучше, чем на любом, но одном высотном уровне (рис. 9.3). Наименьшая погрешность достигается при использовании нижних уровней наблюдения. Вовлечение в подбор наблюдений на больших высотах привносит дополнительную погрешность за счёт возрастания вклада краевых эффектов. Совместное моделирование выполнено

в нескольких вариантах раздельного и совместного моделирования, в зависимости от радиуса учета масс и направления вектора намагниченности. Из анализа результатов следует:

- точность подбора возрастает с увеличением радиуса учета магнитных масс;
- направление вектора намагниченности не сильно влияет на точность подбора;
- при радиусе учета магнитных масс 1 км точности подбора сопоставимы при инверсии по одному или нескольким уровням и составляют первые единицы нТл;
- при совместной инверсии по трем уровням наименьшее отклонение между полем модели и наблюдаемым полем достигается для среднего уровня наблюдения.
- с увеличением количества уровней подбора растет детальность модели распределения намагниченности. Также детальность выше у моделей, которые построены с использованием нижних высотных уровней.

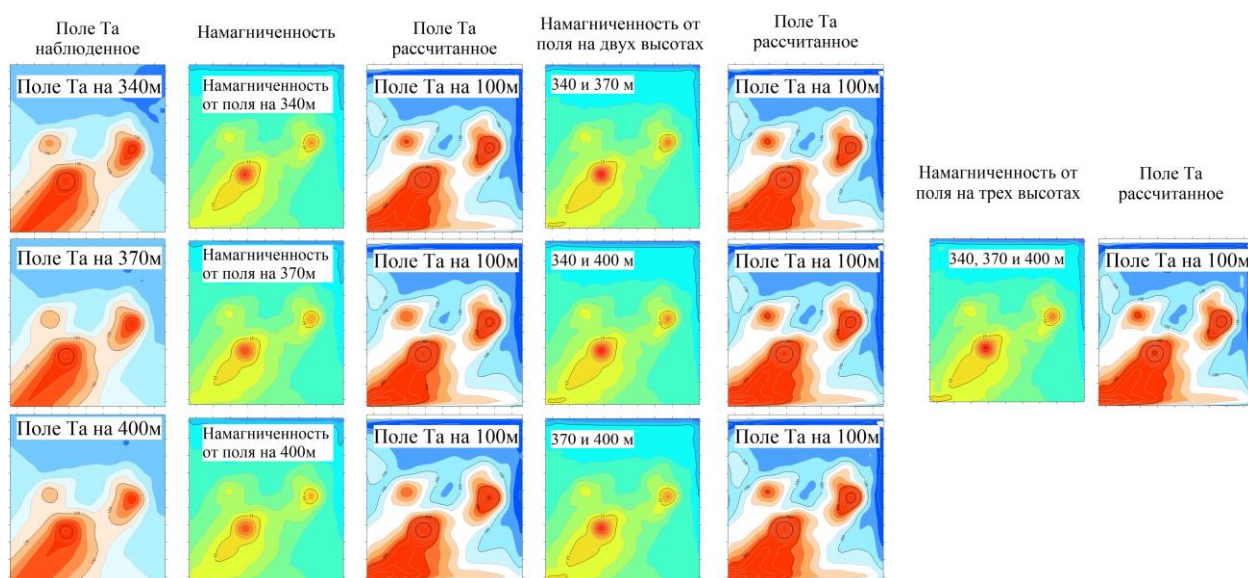


Рисунок 9.3 – Модели намагниченности площади «Велимки»: 1-й столбец – исходные магнитные поля на высотных уровнях 340 м, 370 м, 400 м; 2-й столбец – распределения намагниченности, полученные при одноуровневой инверсии; 3-й столбец – магнитные поля для высоты 100 м от распределений намагниченности, представленных в столбце 2; 4-й столбец – распределения намагниченности, полученные при совместной инверсии по двум высотным уровням; 5-й столбец – магнитные поля для высоты 100 м от распределений намагниченности, представленных в столбце 4; 6-й столбец – распределение намагниченности, полученное при совместной инверсии по трем высотным уровням; 7-й столбец – магнитное поле для высоты 100 м от распределения намагниченности, представленной в столбце 6.

Поскольку нет объективных критериев для выбора предпочтительной модели из полученных, рассчитаны отклонения магнитных полей каждой модели от поля модели, полученного в результате совместной инверсии по трем высотным уровням (рис. 9.4). Наименьшее отклонение имеет магнитное поле, полученное в ходе совместной инверсии

на двух нижних уровнях. Наибольшие отклонения приходятся на модели одноуровневых инверсий.

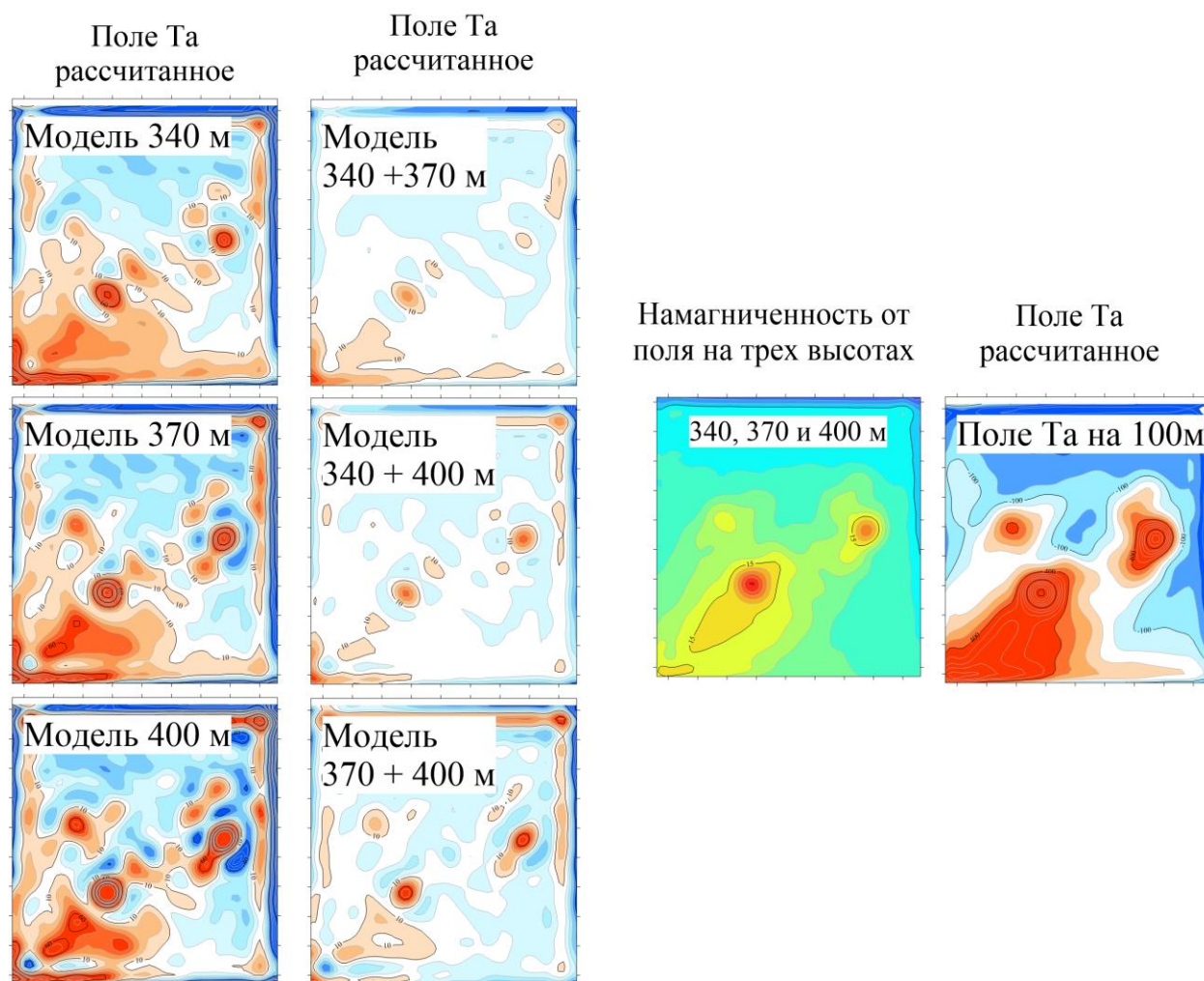


Рисунок 9.4 – Отклонения магнитных полей моделей от поля модели, полученного в результате совместной инверсии по трем высотным уровням: 1-й столбец – отклонения магнитных полей одноуровневой инверсии; 2-й столбец – отклонения магнитных полей двухуровневой инверсии; 3-й столбец – распределение намагниченности, полученное при совместной инверсии по трем высотным уровням; 4-й столбец – магнитное поле для высоты 100 м от распределения намагниченности, представленной в столбце 3.

По модели совместной трехуровневой инверсии рассчитаны компоненты магнитного поля (X , Y , Z) на высоте 100 м, демонстрирующие принципиальную возможность восстановления элементов аномального магнитного поля в любой точке верхнего полупространства по данным многоуровневых магнитных съемок (рис. 9.5).

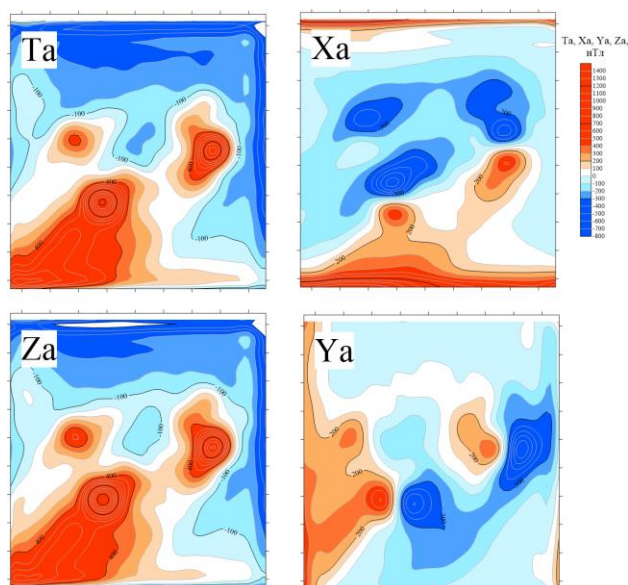


Рисунок 9.5 – Аномальное магнитное поле и его компоненты по модели, полученной в результате совместной инверсии по трем высотным уровням

9.3 Первый этап разработки проекционного метода для решения линейных задач

Интерпретация геофизических аномалий требует решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и включает три этапа: (1) конструктивное описание решений, (2) формализация дополнительной информации об истинном решении через функционалы, (3) выбор функционалов. Участники проекта разработали два метода описания решений СЛАУ: проекционный метод и метод ортогонализации Грама-Шмидта, что улучшает качество и надёжность интерпретации. Объектом исследования является трехмерный универсум с заданным дискретным остовом узлов. Основная информация представляет собой СЛАУ и связана с магнитным полем от истинного дипольного распределения. Для нахождения истинного решения среди других СЛАУ необходима дополнительная статическая информация, формализованная как система признаков, свидетельствующих о наличии истинного магнитного распределения в узлах. Методы Дискретного математического анализа (ДМА) используются для формализации статической информации и создания нечеткой меры присутствия в узлах. Локальная инверсия магнитного поля служит важным источником информации, позволяя учитывать степень близости узлов к результату инверсии. Это дает возможность получить единую меру узлов, что в сочетании с проекционным методом уточняет локальную версию перед применением проекционного метода. После определения весов узлов можно продолжить поиск истинного магнитного распределения среди других решений.



В проекте были рассмотрены три варианта продолжения: корреляция решений с весами узлов, использование магнитной массы дипольного распределения и его ориентации. Продолжения основываются на нелинейной оптимизации функционалов в пространстве интерпретаций магнитного поля. Проекционный метод позволяет провести прямую в направлении градиента функционала и осуществить безусловную оптимизацию, что подтверждает техническую возможность такой оптимизации.

9.4 Разработка структуры базы данных для хранения результатов измерений и их обработки

Работы по проекту подразумевают генерацию большого количества данных с географической привязкой (полевые измерения, результаты их обработки и моделирования) и метаданных (метеоусловия, космическая погода и пр.). Для их централизованного накопления, хранения и последующего анализа был разработан шаблон базы данных (БД) на основе СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS, которое обеспечивает хранение, индексирование и поддержку запросов геопространственных данных. Помимо прочего, такой выбор обеспечивает простую и бесшовную интеграцию с другими проектами, включая ГИС-проекты. Шаблон БД предусматривает эффективный поиск и доступ к описаниям следующих объектов и мероприятий: районы полевых работ, эшелоны съемки, погодные условия, наземные съемки, геодезическое и магнитовариационное обеспечение, данные измерений, карты магнитных аномалий, цифровые модели рельефа и местности, расположение и геометрия аномалообразующих объектов. Схема БД представляет собой двухуровневую иерархическую структуру, где в вершине находится объект, тип которого – «участок полевых работ». Прочие элементы находятся на втором иерархическом уровне, их определение содержит ссылку на участок полевых работ. Предложенная структура предоставляет возможность «вынести на карту» практически всю необходимую для интерпретации имеющихся данных информацию, а также планирования последующих и первичных работ.

10 Международная деятельность ГЦ РАН в 2024 году

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав руководящих органов международных научных организаций. Директор ГЦ РАН, член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв является российским национальным делегатом в Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG). Научный руководитель ГЦ РАН академик А. Д. Гвишиани является членом Европейской академии наук (Academia Europaea), Коллегии экспертов Европейского научного фонда (“ESF College of Expert Reviewers”), почетным исследователем Международного института прикладного системного анализа (IIASA honorary scholar), председателем Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики и членом Межведомственного координационного совета по международному научному и научно-техническому сотрудничеству под руководством президента РАН. Главный научный сотрудник Геофизического центра РАН, академик РАН д.т.н. Игорь Анатольевич Шеремет – почётный член (Fellow) Китайской компьютерной федерации (China Computer Federation, CCF) и приглашённый профессор Харбинского политехнического университета (КНР).

25–27 сентября 2024 г. в Суздале прошла международная конференция «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли». Событие было приурочено к 70-летию Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) и 300-летию РАН. Организатором выступил Геофизический центр РАН при поддержке Российской академии наук, Минобрнауки России, Российского университета транспорта (МИИТ) и Научно-технического центра «Тяжпрессмаш». Ведущие ученые России и зарубежья обсудили актуальные проблемы наук о Земле. Мероприятие посетили ученые из 30 городов России, а также из Австрии, Индии, Китая и ЮАР. На 11 научных сессиях было сделано более 130 устных и стендовых докладов. Подробнее о конференции см. главу 1.

В рамках конференции прошла выставка отечественной научной продукции. В частности, ГЦ РАН представил свою разработку ORBUS-PRO – платформу интерактивной 3D визуализации глобальных геопространственных данных.

ГЦ РАН продолжает выполнять функции информационного узла межрегионального сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ, в который входят Россия, Беларусь, Армения и Казахстан. Проводятся совместные наблюдения и последующая обработка данных, регистрируемых научными организациями стран-участников.

От ГЦ РАН в IAGA представлена модель-кандидат Международного геомагнитного аналитического поля (IGRF) 14-го поколения. Модель-кандидат прошла все стадии отбора



и была использована при расчете коэффициентов окончательной модели IGRF-14. Модель обновляется каждые пять лет. Группа ученых ГЦ РАН стала единственной командой, представляющей Россию.

Геомагнитные обсерватории, данные которых использовались в исследовании, входят в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ (<https://intermagnet.org>). ГЦ РАН выполняет функции информационного узла межрегионального сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ, в который входят Россия, Беларусь, Армения и Казахстан. Со всеми институтами, которые обеспечивают функционирование магнитных обсерваторий, заключены соглашения о научном сотрудничестве и обмене геофизическими данными. Из зарубежных институтов к ним относятся Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН Республики Армения, Институт ионосферы (Казахстан) и Институт сейсмологии им. Г. О. Мавлянова НАН Республики Узбекистан.

ГЦ РАН развивает сотрудничество с научно-исследовательскими институтами Китая в области космического и наземного мониторинга геофизических полей. В этом направлении главным партнером является Институт геофизики Китайской сейсмологической службы (Institute of Geophysics, CEA – IGPCSEA) в г. Пекине, который обеспечивает функционирование всей сети геомагнитных обсерваторий в Китае. Совместно с Центром прикладного спутникового дистанционного зондирования земли Министерства природных ресурсов Китая (LASAC) ведутся работы по накоплению и обработке спутниковых данных ДЗЗ.

В июне 2024 г. ГЦ РАН посетила делегация Института геофизики Китайской сейсмологической службы. Состоялось продуктивное обсуждение сотрудничества организаций в сфере геофизических исследований.

В сентябре 2024 г. ГЦ РАН посетила делегация в составе сотрудников Центра прикладного спутникового дистанционного зондирования Земли Министерства природных ресурсов Китая доктора, профессора Сяотао Чана и доцента Чжэньмин Ван, а также сотрудника Научно-исследовательского института аэрокосмической информации Китайской академии наук доктора, доцента Си Чэня. Участники встречи обсудили перспективные направления совместных исследований. Гостям рассказали о работе Аналитического центра геомагнитных данных на базе ГЦ РАН.

В 2024 г. продолжалась работа по проекту «База данных по наукам о Земле» – ESDB (Earth Science DataBase), целью которого является создание современной системы

регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier). Главной целью проекта является повышение значимости и доступности геофизических данных для научных исследований, облегчение процесса их поиска, идентификации и публикации, а также развитие культуры цитирования данных.

Издаваемый ГЦ РАН Russian Journal of Earth Sciences (RJES) улучшил показатели в базе цитирования Web of Science. Журнал включен в четвертый квартиль (Q4) в отрасли знаний «Науки о Земле, междисциплинарные» (Geosciences, Multidisciplinary). Индекс цитируемости RJES в ядре базы Web of Science Core Collection – Emerging Sources Citation Index. Импакт-фактор журнала (JIF) – 0,7, 5-летний импакт-фактор – 0,8. RJES имеет высокие наукометрические показатели в ведущих базах цитирования: Scopus, Web of Science, RSCI, GeoRef. Журнал входит в третий квартиль (Q3) Scopus в отрасли знаний “Earth and Planetary Sciences”. Он расположен в 3-м квартиле по ScimagoJR и имеет CiteScore = 1,9. В академическом рейтинге журналов RSCI Russian Journal of Earth Sciences находится в первом квартиле K1, с нормированным рейтингом 0,410. В сводном рейтинге журналов RSCI RJES занимает 143 место из 931, а в тематическом рейтинге “OECD 105. Earth and related environmental sciences” – 21 место из 61. 5-летний импакт-фактор РИНЦ – 1,155.

Важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах, которые состоялись в 2024 г. Следует упомянуть некоторые из них:

23–24 января 2024 г. в МГУ имени М. В. Ломоносова прошла Международная конференция «Системный анализ: моделирование и управление», посвященная памяти академика А.В. Кряжмского. На открытии конференции с приветственным словом выступил научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани.

Главный научный сотрудник ГЦ РАН д.т.н. В.И. Кафтан выступил с докладом на II Всероссийской научно практической конференции с международным участием «ГЕОФОРУМ. Нижний Новгород» 25–26 апреля 2024 г. Основные вопросы конференции – механизмы модернизации, инновационно-технологического развития, а также сотрудничества предприятий и организаций России и государств участников СНГ, работающих в сфере геодезии, геоинформатики и геопространственных данных.



- 27–31 мая 2024 г. в г. Подчетртек (Словения) состоялся 10-й Международный семинар: Неоген Центральной и Юго-Восточной Европы. В работе семинара приняла участие главный научный сотрудник д.г.-м.н. Ю. В. Ростовцева.
- 3–6 июня 2024 г. в Баку прошла международная конференция «Caspian Basin in Transition». В конференции с докладом выступили сотрудники ГЦ РАН д.ф.-м.н. С. А. Лебедев и д.ф.-м.н. А. Г. Костяной. Они также были приглашены на международное совещание «The 1st Caspian Blue Horizons Workshop: Synergizing Science and Business for greater Climate Resilience and Caspian Sea Sustainability on the Eve of COP29» 10–11 июня 2024 года в Дипломатической Академии Азербайджана.
- 2–5 июля 2024 г. в подмосковном г. Долгопрудном состоялась 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах». Сотрудники ГЦ РАН выступили с докладами в рамках научной программы конференции: И. О. Белов, д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов, д.т.н. В. И. Кафтан, д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко.
- 8 октября 2024 г. в рамках деловой программы Петербургского международного газового форума – 2024 состоялась сессия «Геолого-геофизические исследования для нефтегазовой и горной промышленности». Одним из организаторов стал ГЦ РАН. В качестве модератора выступил директор ГЦ РАН член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв. С докладом на сессии выступил заведующий сектором геофизического мониторинга ГЦ РАН к.т.н. Д. В. Кудин.
- 24 октября 2024 г. в Российском университете транспорта состоялось открытие Международной научно-практической конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях». Председателем организационного комитета стал научный руководитель РУТ (МИИТ) член-корреспондент РАН И. Н. Розенберг, в числе сопредседателей – научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани и директор ГЦ РАН член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв. На пленарном заседании с докладом вступил ведущий научный сотрудник ГЦ РАН д.ф.-м.н. А. Г. Костяной.
- 1 ноября 2024 г. состоялось открытие X Международного арктического правового форума «Сохранение и устойчивое развитие Арктики: правовые аспекты», приуроченного к 300-летию РАН. От имени Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики участников конференции приветствовал председатель совета, научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани.

11 Деятельность НГК РАН

НГК РАН осуществляет представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе (IUGG) и его восьми ассоциациях. НГК РАН координирует участие институтов РАН в различных международных проектах и программах, проводимых комиссиями и комитетами Союза. Комитет ведет свою деятельность под руководством Бюро Отделения наук о Земле РАН. Базовой организацией НГК РАН является ГЦ РАН. Состав Бюро Комитета утвержден Постановлением Бюро Отделения наук о Земле РАН № 13000/1-2 от 19 февраля 2019 г. Несмотря на усложнившуюся внешнеполитическую ситуацию деятельность секций НГК РАН в 2024 г. была направлена на подготовку к участию российских ученых и специалистов в научных мероприятиях, проводимых под эгидой IUGG.

21–27 сентября 2024 г. на о. Корфу (Греция) состоялась 39-я Генеральная ассамблея Европейской сейсмологической комиссии. В рамках работы Ассамблеи функции национального представителя НГК РАН выполнял д.ф.-м.н. В. Г. Кособоков (ИТПЗ РАН). Также он выполнял функции конвенера сессии “Sinergy in advancing the models, observations, and verification toward Operational Earthquake Forecasting”. В рамках работы Ассамблеи, собравшей более 700 участников из 51 страны мира, были проведены полезные обсуждения насущных проблем сейсмологии и оценки природных опасностей с президентом ESC Дмитрием Сторчаком и многими ведущими зарубежными учёными. В процессе обсуждений многократно высказывалась взаимная заинтересованность в контактах и совместных работах с российскими учёными. Во время заседания Совета ESC 26 сентября 2024 г. было представлено замечание по вопросу места проведения Юбилейной 40-й Генеральной ассамблеи ESC 2026 г., которое было поддержано в выступлениях Йоханнеса Швейцера (Генерального секретаря Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли, IASPEI), Мариано Гарсия-Фернандеса и других членов научного Совета. В результате обсуждения и тайного голосования местом проведения 40-й Генеральной ассамблеи ESC 2026 г. был утвержден г. Стамбул, Турция. Принятое решение создаёт очевидную возможность значительно увеличить число российских учёных с 5 участников на 38-й и 39-й Генеральных ассамблеях в Румынии и Греции до представительной многочисленной делегации Российской Федерации на Юбилейном форуме сейсмологов Европы и мира в 2026 г.

Совет ESC открытым голосованием единогласно подтвердил полномочия до 2026 г. Титулярного представителя России д.ф.-м.н. А. Д. Завьялова, а также



д.ф.-м.н. А. А. Любушина в качестве Председателя Рабочей группы ESC по физике землетрясений: полевые наблюдения, экспериментальное и численное моделирование и комплексный анализ (ESC WG on Earthquake physics: Field observations, experimental and numerical modelling and comprehensive analysis).

Вследствие введенных в 2022 г. со стороны ряда стран ограничений в отношении российского банковского сектора стала невозможной оплата ежегодного взноса России в IUGG. Вопрос оплаты ежегодных взносов в международные научные организации находится на контроле Президента РАН. Управление международного сотрудничества РАН ведет соответствующую работу по обеспечению оплаты взноса в IUGG. Аппарат НГК РАН продолжит деятельность по сохранению полноценного членства России в IUGG, а также по обеспечению участия российских ученых в мероприятиях, проводимых под эгидой Союза. Участие российских ученых в деятельности IUGG имеет большое научное и политическое значение для нашей страны, поскольку Союз является одним из ключевых игроков в сфере научной дипломатии и международного научного сотрудничества.

Список основных научных публикаций за 2024 год

Монографии

1. Кочкин Б. Т., Линге И. И. (ред.) Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. – М.: Наука, 2024. – 368 с.
2. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Колесников И. Ю., Маневич А. И. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений. – М.: РАН, Издательство «Наука», 2024. – 243 с.
3. Осадочные породы. Собрание (научные чтения), посвященные 80-летию основания секции «Осадочные породы» МОИП: Сборник научных материалов: Москва, 14 ноября 2024 г. / Под ред. Ю. В. Ростовцевой; Секция осадочных пород МОИП, Геофизический центр РАН. – Москва: МАКС Пресс, 2024. – 148 с.
 - 1) Ростовцева Ю. В. Карбонатные породы: классификации, породообразующие минералы и компоненты // Осадочные породы. Собрание (научные чтения), посвященные 80-летию основания секции «Осадочные породы» МОИП: Сборник научных материалов: Москва, 14 ноября 2024 г. / Под ред. Ю. В. Ростовцевой; Секция осадочных пород МОИП, Геофизический центр РАН. – Москва: МАКС Пресс, 2024. С. 26–27
 - 2) Ростовцева Ю. В. Навстречу 80-летию юбилею секции «Осадочные породы» МОИП // Осадочные породы. Собрание (научные чтения), посвященные 80-летию основания секции «Осадочные породы» МОИП: Сборник научных материалов: Москва, 14 ноября 2024 г. / Под ред. Ю. В. Ростовцевой; Секция осадочных пород МОИП, Геофизический центр РАН. – Москва: МАКС Пресс, 2024. С. 16–18
 - 3) Попов С. В., Головина Л. А., Палку Д. В., Гончарова И. А., Пинчук Т. Н., Ростовцева Ю. В., Ахметьев М. А., Александрова Г. Н., Запорожец Н. И., Банников А. Ф., Былинская М. Е., Застрожнов А. С., Лазарев С. Ю. Неоген Восточного Паратетиса: региональная шкала, опорные разрезы и проблемы корреляции // Осадочные породы. Собрание (научные чтения), посвященные 80-летию основания секции «Осадочные породы» МОИП: Сборник научных материалов: Москва, 14 ноября 2024 г. / Под ред. Ю. В. Ростовцевой; Секция осадочных пород МОИП, Геофизический центр РАН. – Москва: МАКС Пресс, 2024. С. 27–28
 - 4) Попов С. В., Головина Л. А., Палку Д. В., Гончарова И. А., Пинчук Т. Н., Ростовцева Ю. В., Ахметьев М. А., Александрова Г. Н., Запорожец Н. И., Банников А. Ф., Былинская М. Е., Застрожнов А. С., Лазарев С. Ю. Неоген Восточного Паратетиса: региональная шкала, опорные разрезы и проблемы корреляции // Осадочные породы. Собрание (научные чтения), посвященные 80-летию основания секции «Осадочные породы» МОИП: Сборник научных материалов: Москва, 14 ноября 2024 г. / Под ред. Ю. В. Ростовцевой; Секция осадочных пород МОИП, Геофизический центр РАН. – Москва: МАКС Пресс, 2024. С. 84–86



Статьи в журналах

4. Авдони́на А. М., Кочубей К. А., Маневич А. И., Дзеранов Б. В. (2024). Оценка опасности карстовых просадок в Куртатинском ущелье (Республика Северная Осетия – Алания). Устойчивое развитие горных территорий, 16(3), 1083–1095. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1083-1095
5. Акматов Д. Ж. (2024). Оценка устойчивости участка «Енисейский» Нижне-Канского породного массива на основе трехмерной геомеханической модели. Горный информационно-аналитический бюллетень, -(1), 3–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_2_3
6. Акматов Д. Ж., Маневич А. И., Татаринев В. Н., Шевчук Р. В., Забродин С. М. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок «Енисейский») // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 167–178. EDN: ECCWUV.
7. Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В., Тухель Е. А., Николайчук В. В., Галиева Р. Р. (2024). Создание трехмерной геомеханической модели для оценки устойчивости породного массива. Горная промышленность, -(1), 145–148. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-1-145-148
8. Аксютин О. Е., Соловьёв А. А., Журавлев В. В., Чеканский А. В., Расторгуев В. В., Кузнецов Р. Ю., Агапитов А. Е., Краснощёков Р. И. (2024). Азимут на истинный север: ПАО «Газпром» разработало сервис, по эффективности намного превышающий модели покинувших Россию производителей. Газовая промышленность, -(6), 34–38.
9. Антошин В. В., Маневич А. И., Гаврилова А. А., Камаев А. А. (2024). Перспективы использования баз спутниковых данных эмиссии парниковых газов при мониторинге объектов добывающей промышленности. Горная промышленность, -(4), 118–121. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-118-121
10. Белаховский В. Б., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Вахнина В. В., Селиванов В. Н. (2024). Влияние геомагнитной бури на низкочастотные поля линий электропередачи. Наука и технологические разработки, 103(1), 36–51. DOI: 10.21455/std2024.1-3
11. Воробьёв А. В., Воробьёва Г. Р. (2024). Веб-ориентированный подход к трансформации систем координат геоцентрического типа. Геодезия и картография, -(3), 30–41. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1005-3-30-41
12. Воробьёв А. В., Воробьёва Г. Р. (2024). Подход к динамической визуализации больших объемов пространственной информации на основе геостатистического анализа. Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, -(66), 23–35. DOI: 10.17223/19988605/66/3
13. Воробьёв А. В., Воробьёва Г. Р. (2024). Подход к динамической визуализации разнородных геопространственных векторных изображений. Компьютерная оптика, 48(1), 123–139. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1279



14. Воробьев А. В., Лапин А. Н., Соловьев А. А., Воробьева Г. Р. (2024). Подход к интерпретации естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки эффектов ее воздействия на высокоширотные энергосистемы. *Физика Земли*, 60(4), 100–110. DOI: 10.31857/S0002333724040071
15. Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Орлов Г. О. (2024). Концепция обработки, анализа и визуализации геофизических данных на основе элементов тензорного исчисления. *Информатика и автоматизация*, 23(2), 572–604. DOI: 10.15622/ia.23.2.10
16. Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Фарваев Э. Ф., Орлов Г. О. (2024). Элементы системного и вепольного анализа инфраструктуры мониторинга окружающей среды (на примере геомагнитных данных). *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, -(69), 42–53. DOI: 10.17223/19988605/69/5
17. Воробьева И. А., Шебалин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Дзеранов Б. В., Малютин П. А. (2024). Параметры сейсмического режима восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации. *Физика Земли*, 60(5), 38–56. DOI: 10.31857/S0002333724050034
18. Гвишиани А. Д., Фоменко Н. А., Дзедобоев Б. А. (2024). Нечёткие множества и Большие Данные в трёхмерной интерпретации сейсмического районирования. *Вестник Российской академии наук*, 94(8), 704–711. DOI: 10.31857/S0869587324080026
19. Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Зайцев К. С., Дунаев М. Е., Ехлаков Э. В. (2024). Метод прогнозирования геомагнитных бурь на основе нейронных сетей глубокого обучения с использованием временных рядов матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН. *Геомагнетизм и аэрономия*, 64(6), 822–839. DOI: 10.31857/S0016794024060104
20. Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Зайцев К. С., Дунаев М. Е., Ехлаков Э. В. (2024). Распознавание геомагнитных бурь на основе матричных временных рядов наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН с использованием нейронных сетей глубокого обучения. *Солнечно-земная физика*, 10(1), 83–91. DOI: 10.12737/szf-101202411
21. Гусев И. В., Лебедев С.А., Жуков А.Ю. (2024). Программный комплекс обработки данных спутниковой альтиметрии космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2». *Геодезия и картография*, -(7), 46–58. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1009-7-46-58
22. Камаев А. А., Маневич А. И., Антошин В. В. (2024). Геологическое дешифрирование данных ДЗЗ на примере месторождения Колмозерское Мурманской области. *Горная промышленность*, -(4), 122–125. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-122-125
23. Кафтан В. И., Докукин П. А., Маневич А. И., Татаринцов В. Н., Шевчук Р. В. (2024). Деформационное взаимодействие сильных землетрясений 2011–2016 гг. в зоне



- влияния суперплюма Хикуранги (Новая Зеландия) по данным GPS-наблюдений. Геодинамика и тектонофизика, 15(1), 1–15. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0735
24. Крушельницкий К. В., Шебалин П. Н., Воробьева И. А., Селюцкая О. В., Антипова А. О. (2024). Границы применимости закона Гутенберга–Рихтера в задачах оценки сейсмической опасности и риска. Физика Земли, 60(5), 69–84. DOI: 10.31857/S0002333724050058
25. Кудрявцев Н. Г., Фролов И. Н., Сафонова В. Ю., Кудин Д. В. (2024). Об организации гибридного мониторинга околоземного атмосферного электрического поля и инфразвукового фона в Республике Алтай. Сейсмические приборы, 60(1), 44–65. DOI: 10.21455/si2024.1-4
26. Кузнецов К. М., Лыгин И. В., Шевалдышева О. О., Фадеев А. А., Гудкова Т. В. (2024). Моделирование магнитных и плотностных параметры метеоритного кратера озера Смердячье. Геофизика, -(6), 89–95. DOI: 10.34926/geo.2024.63.49.011
27. Лосев И. В. (2024). Геодинамическое районирование на основе системного анализа геолого-геофизических данных для обеспечения геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО. Горный информационно-аналитический бюллетень, -(1), 17–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_2_17
28. Лыков Н. А., Закирьянов И. Г., Дронов А. В., Ростовцева Ю. В. (2024). Строение нижнеордовикских строматолитовых биогермов в опорном разрезе Р. Мойеро (Тунгусская Синеклиза, Восточная Сибирь). Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, -(2), 45–53. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-45-53
29. Мазур Н. Г., Фёдоров Е. Н., Пилипенко В. А. (2024). Особенности электромагнитного поля литосферных источников. Физика Земли, 60(6), 39–51. DOI: 10.31857/S0002333724060021
30. Малютин П. А., Скоркина А. А., Воробьева И. А., Баранов С. В., Маточкина С. Д., Молокова А. П., Шебалин П. Н. (2024). Характерное распределение глубин коровых землетрясений Южной Сибири. Физика Земли, 60(4), 50–63. DOI: 10.31857/S0002333724040046
31. Маневич А. И., Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Кафтан В. И., Татаринов В. Н., Дзеранов Б. В., Заалишвили В. Б., Лосев И. В., Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В., Габараев А. Ф. (2024). Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга Восточных ветвей Владикавказского разлома. Геология и геофизика юга России, 14(3), 41–56. DOI: 10.46698/q3386-6383-8155-b
32. Маточкина С. Д., Шебалин П. Н., Смирнов В. Б., Пономарёв А. В., Малютин П. А. (2024). Параметры группирования событий акустической эмиссии в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород. Физика Земли, 60(5), 85–96. DOI: 10.31857/S0002333724050066
33. Морозов В. Н., Маневич А. И. (2024). Сейсмотектоническая модель очага землетрясения Акетао 25.11.2016 Mw 6.6 (Китай). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 519(2), 120–127. DOI: 10.31857/S2686739724120155



34. Морозов В. Н., Маневич А. И., Лосев И. В. (2024). Моделирование напряжённо-деформированного состояния в сопоставлении с косейсмическими проявлениями в эпицентральной зоне Тангшаньского землетрясения Ms 7.8 27.07.1976 (Китай). Геотектоника, 58(4), 32–48. DOI: 10.31857/S0016853X24040028
35. Нестеренко М. Ю., Оборин А. В., Цвяк А. В., Маневич А. И., Квятковская С. С., Шевчук С. В. (2024). Перспективы развития системы геодинамического и сейсмологического мониторинга подземных хранилищ газа на примере Елшано-Курдюмского ПХГ. Геодезия и картография, -(12), 46–53. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1014-12-46-53
36. Пилипенко В. А., Позднякова Д. Д., Савельева Н. В. (2024). Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле. Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 45360(96), 163–205. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-9-3-163-205
37. Попов С. Н., Кокорев О. Н., Заведий Т. Ю., Маневич А. И. (2024). Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вблизи нагнетательной скважины на пунктах глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 335(10), 101–110. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4499
38. Сафаргалеев В. В., Сергиенко Т. И., Котиков А. Л., Сафаргалеев А. В. (2024). Сценарий формирования вихреобразных структур в предсуббуревой дуге с учетом изменения высоты дуги в процессе ее эволюции. Геомагнетизм и аэрономия, 64(1), 74–92. DOI: 10.31857/S0016794024010087
39. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Билин В. А., Селиванов В. Н., Аксенович Т. В., Пилипенко В. А. (2024). Параметры, влияющие на эффективность возбуждения геоиндуцированных токов геомагнитными пульсациями Pc5-6/Pi3 вне магнитной бури. Известия Российской академии наук. Серия физическая, 88(3), 340–346. DOI: 10.31857/S0367676524030016
40. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А., Ягодкина О. И., Гаранин С. Л. (2024). Пространственное распределение авроральных высыпаний и сбоев в работе железнодорожной автоматики на севере европейской части России. Солнечно-земная физика, 10(4), 114–121. DOI: 10.12737/szf-104202412
41. Соловьёв А. А. (2024). Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения. Вестник Российской академии наук, 94(10), 885–891. DOI: 10.31857/S0869587324100023
42. Соловьёв А. А. (2024). О прогнозе экстремальных событий в природе и обществе. Земля и вселенная, -(3), 99–118. DOI: 10.7868/S0044394824030071
43. Соловьёв А. А., Алёшин И. М., Анисимов С. В., Гоев А. Г., Морозов А. Н., Сапронов Д. С., Соловьёва Е. Н. (2024). Тонкая структура косейсмического электромагнитного отклика по данным геомагнитных и сейсмологических наблюдений. Физика Земли, 60(5), 195–209. DOI: 10.31857/S0002333724050141



44. Соловьёв А. А., Белов И. О., Воробьёв А. В., Сергеев В. Н. (2024). Идентификация геомагнитных вариаций в околоземном пространстве по спутниковым наблюдениям во время бури 8–9 марта 1970 г. Геомагнетизм и аэрономия, 64(5), 635–648. DOI: 10.31857/S0016794024050046
45. Соловьёв А. А., Лисенков (2024). Обзор и перспективы использования современных подходов комплексного анализа геоданных для оценки пространственного распределения геолого-геофизических параметров. Геофизические исследования, 25(2), 20–45. DOI: 10.21455/gr2024.2-2
46. Тарасов А. И., Тумской В. Е., Ростовцева Ю. В. (2024). Гранулометрический и минеральный состав отложений ледового комплекса среднего и нижнего течений бассейна реки Индигирки. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 11(-), 594–601. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-594-601
47. Татаринев В. Н., Акматов Д. Ж., Маневич А. И., Шевчук Р. В. (2024). Иерархический подход к оценке устойчивости геологической среды в геомеханических исследованиях. Горный журнал, -(1), 15–21. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.03
48. Татаринев В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзедобов Б. А., Дзеранов Б. В., Авдоница А. М., Лосев И. В., Королькова А. А. (2024). Новейшая тектоническая эволюция Кавказа: современные вертикальные движения и механизм деформирования земной коры. Физика Земли, 60(4), 76–99. DOI: 10.31857/S0002333724040068
49. Фролов И. Н., Кудрявцев Н. Г., Сафонова В. Ю., Кудин Д. В. (2024). Использование технологий машинного обучения при решении задачи классификации сигналов мониторинга инфразвукового фона. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 24(1), 156–164. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-156-164
50. Шебалин П. Н., Баранов С. В., Воробьёва И. А., Греков Е. М., Крушельницкий К. В., Скоркина А. А., Селюцкая О. В. (2024). О моделировании сейсмического режима в задачах оценки сейсмической опасности. Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах, 515(1), 95–109. DOI: 10.31857/S2686739724030121
51. Шевчук Р. В. (2024). Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа. Горный информационно-аналитический бюллетень, -(1), 29–42. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_2_29
52. Шевчук Р. В., Маневич А. И., Лосев И. В., Алёшин И. М., Акматов Д. Ж., Татаринев Т. А., Урманов Д. И. (2024). Анализ воздействия радиопомех и параметров навигационных спутниковых измерений на их точность на залесенных территориях. Геодезия и картография, -(8), 23–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1010-8

53. Шеремет И. А. (2024). Мультимножественные грамматики как базовая модель представления знаний для интеллектуальных систем инжиниринга химических реакций. Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах, 517(1), 24–32. DOI: 10.31857/S2686953524040031
54. Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Пилипенко В. А., Селиванов В. Н. (2024). Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы. Солнечно-земная физика, 10(3), 146–156. DOI: 10.12737/szf-103202415
55. Яковишина Е. В., Бордунов С. И., Коротаев М. В., Копаевич Л. Ф., Одинцова А. А., Митрофанова Н. О., Краснова Е. А. (2024). Палеообстановки и биостратиграфия маастрихта разреза реки Дарья (Северный Кавказ). Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, -(5), 58–72. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-58-72
56. Agayan S. M., Bogoutdinov S. R., Firsov I. A. (2024). Solving inverse magnetometry problems using fuzzy logic. Russian Journal of Earth Sciences, 24(4), 1–23. DOI: 10.2205/2024ES000932
57. Agayan S. M., Bogoutdinov S. R., Kamaev D. A., Dzeboev B. A., Dobrovolsky M. N. (2024). Trends and extremes in time series based on fuzzy logic. Mathematics, 12(2), 1–35. DOI: 10.3390/math12020284
58. Aleshin I. M., Soloviev A. A., Kholodkov K. I., Perederin F. V., Taran Y. V. (2024). Vertical gradient of the geomagnetic field by multiple altitude aeromagnetic survey. Doklady Earth Sciences, 519(2), 2232–2235. DOI: 10.1134/S1028334X24603626
59. Bocharov A. V., Kostianoy A. G., Lebedev S. A. (2024). Assessment of the accuracy of determining the Caspian Sea surface temperature by Landsat-5, -7 satellites based on the measurements of drifters. Ecologica Montenegrina, 76(-), 1–13. DOI: 10.37828/em.2024.76.1
60. Burov V. A., Kholodkov K. I., Aleshin I. M. (2024). May 11–12 Extreme Space Weather Events Brief and Dose Rate Model Response. Russian Journal of Earth Sciences, 24(4), 1–5. DOI: 10.2205/2024ES000929
61. Gabyshev D. N., Ganopolsky R. M. (2024). Improved calculation of the Mie solution and the geometrical optics approximation for large droplets. Laser Physics, 34(1), 1–15. DOI: 10.1088/1555-6611/ad0ec1
62. Gvishiani A., Dzeranov B., Skorkina A., Dzeboev B. (2024). World seismic networks and earthquake catalogs. Russian Journal of Earth Sciences, 24(1), 1–22. DOI: 10.2205/2024ES000901
63. Kaban M. K., Chen B., Sidorov R. V., Petrunin A. G. (2024). Variations of the effective elastic thickness evidence for a wide diffusive boundary between the North American and Eurasian plates in Siberia. Journal of Geodynamics, 159(102015), 1–7. DOI: 10.1016/j.jog.2023.102015



64. Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Manevich A. I., Dzeboev B. A., Tatarinov V. N., Dzeranov B. V., Avdonina A., Losev I. V. (2024). An Analytical Review of the Recent Crustal Uplifts, Tectonics, and Seismicity of the Caucasus Region. *Geosciences*, 14(3), 1–20. DOI: 10.3390/geosciences14030070
65. Komitov B. P., Kaftan V. I. (2024). Trigger effects of space weather impact on Earth tectonics and their impact on climate. *Geomagnetism and Aeronomy*, 64(8), 146–158. DOI: 10.1134/S0016793224700488
66. Kudin D. V., Gvishiani A. D., Nikitina I. M., Belov I. O., Dzeboev B. A., Grudnev A. A., Dzeranov B. V., Krasnoperov R. I. (2024). Storage and processing of Big Data for geomagnetic support of directional drilling. *Applied Sciences*, 14(21), 1–14. DOI: 10.3390/app14219730
67. Li Z., Guo J., Zhu C., Liu X., Hwang C., Lebedev S., Chang X., Soloviev A., Sun H. (2024). The SDUST2022GRA global marine gravity anomalies recovered from radar and laser altimeter data: contribution of ICESat-2 laser altimetry. *Earth System Science Data*, 16(9), 4119–4135. DOI: 10.5194/essd-16-4119-2024
68. Lykov N., Rostovtseva Yu., Dronov A. (2024). Late Middle to Late Ordovician phosphate accumulation of the Moyero river section (Siberia): a record of upwelling and global cooling. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(6), 1–12. DOI: 10.2205/2024ES000946
69. Martines-Bedenko V. A., Pilipenko V. A., Shiokawa K., Kasimova V. A. (2024). Search for pulsed ultralow-frequency electromagnetic precursors of earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 60(4), 726–735. DOI: 10.1134/S106935132470071X
70. Morozov A. N., Vaganova N. V., Konechnaya Ya. V., Mikhailova Ya. A., Petrova N. V. (2024). Low-magnitude seismicity of the continent-ocean transition zone in the Eurasian Arctic. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(4), 1–12. DOI: 10.2205/2024ES000927
71. Pilipenko V., Kozyreva O., Belakhovsky V., Sakharov Ya., Selivanov V. (2024). What should we know to predict geomagnetically induced currents in power transmission lines? *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(6), 1–15. DOI: 10.2205/2024ES000954
72. Pilipenko V., Shiokawa K. (2024). A closer cooperation between space and seismology communities – a way to avoid errors in hunting for earthquake precursors. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1), 1–22. DOI: 10.2205/2024ES000899
73. Rostovtseva Yu. V. (2024). The cyclostratigraphy of the Eastern Paratethys Konkian: Zelensky section (Taman peninsula). *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1), 1–6. DOI: 10.2205/2024ES000900
74. Rostovtseva Yu. V. (2024). Upper Miocene aragonite sediments of the Eastern Paratethys (Zelesnyi Rog section): whiting events or not? *Geoloski Anali Balkanskoga Poluostrva*, 85(1), 113–124. DOI: 10.2298/GABP240218006R
75. Sheremet I. A. (2024). Multigrammatical modelling of neural networks. *Computer Optics*, 48(4), 619–632. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1436



76. Sobisevich A. L., Steblor G. M., Agibalov A. O., Aleshin I. M., Balashov G. R., Kondratov A. D., Makeev V. M., Perederin V. P., Perederin F. V., Sencov A. A., Kholodkov K. I. (2024). Seismic domain identification algorithm using fuzzy logic methods with combined geological and geomorphological data for the case of Sakhalin Island. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(2), 1–8. DOI: 10.2205/2024ES000906
77. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. (2024). Diagnostics of Geoinduced Currents in High Latitude Power Systems Using Machine Learning Methods. *Moscow University Physics Bulletin*, 79(-), S807–S817. DOI: 10.3103/S0027134924702278
78. Vorobieva I. A., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., Gvishiani A. D., Zaalishvili V. B., Sergeeva N. A., Nikitina I. M. (2024). Integrated Earthquake Catalog of the Ossetian Sector of the Greater Caucasus. *Applied Sciences*, 14(1), 1–22. DOI: 10.3390/app14010172

Конференции

Статьи в сборниках трудов конференций

1. Докукин П. А., Кафтан В. И. Синоптические анимации результатов многолетних ГНСС наблюдений как средство изучения геодинамических процессов. В кн.: Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024. Материалы LV Тектонического совещания. Т. 1. - М.: ГЕОС, 2024. - 289 с. DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38796
2. Кафтан В. И., Дзебоев Б. А., Маневич А. И., Татаринев В. Н. Вековая история изучения современных вертикальных движений земной коры Кавказа в аспекте геодинамических и тектонических представлений. В кн.: Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024. Материалы LV Тектонического совещания. Т. 1. - М.: ГЕОС, 2024. - 289 с. DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38796
3. Комитов Б. П., Кафтан В. И. Годовые кольца деревьев и солнечные циклы в климате Земли. Сборник трудов XXVIII всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2024» (7–11 октября 2024 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН), 2024
4. Побединский Г. Г., Кафтан В. И., Еруков С. В. О конструкции центров пунктов спутниковых геодезических сетей // Метрология времени и пространства: XI международный симпозиум, Россия, Московская область, Менделеево, 27–29 сентября 2023 г.: материалы симпозиума. - Менделеево, Московская область: ВНИИФТРИ, 2024.
5. Ростовцева Ю. В. Верхнемиоценовые отложения арагонита Восточного Паратетиса (разрез Железный Рог, Тамань) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVIII Геологического съезда Республики Коми, место издания ИГ Коми НЦ УрО РАН Сыктывкар, 2024, том 2, с. 213–215. DOI: 10.19110/978-5-98491-101-6



6. Слободянюк А. О., Лебедев С. А. Оценка точности расчёта высоты морской поверхности при отклонении оси антенны альтиметра от положения надир // XX Малышевские чтения: образование, технологии и общество на смене эпох. Москва, 28–29 марта 2024 г. Материалы XX международного конгресса с элементами научной школы для молодых ученых. В 2-х томах. Москва, 2024.

Тезисы

7. Авдоница А. М., Кочубей К. А. Карстовая опасность окрестностей Куртатинского ущелья (Республика Северная Осетия – Алания) // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
8. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. Нечеткие спектры временных рядов // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
9. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. О последних результатах в ДМА // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
10. Акматов Д. Ж. Геомеханические исследования скальных массивов для специальных объектов // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
11. Акматов Д. Ж., Татаринов В. Н. Геомеханическое моделирование для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов // II Всероссийская конференция «Добрецовские чтения: наука из первых рук» и XX Всероссийская конференция «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Новосибирск – Горный-Алтай, 18–26 июля 2024 г.), 2024.
12. Алёшин И. М. Применение kNN-анализа для интерпретации геофизических измерений // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
13. Белов И. О., Пилипенко В. А., Кудин Д. В. Онлайн система TeslaSwarm для анализа токов в верхней ионосфере по данным спутников Swarm и наземных станций // 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (Долгопрудный, 2–5 июля 2024 г.), 2024.
14. Бочаров А. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А. Сезонные изменения точности определения температуры водной поверхности Каспийского моря по данным спутников Landsat-5,7 // Сборник тезисов докладов (трудов, аннотаций) 22-й



- Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.), 2024.
15. Великин С. А., Милановский С. Ю., Истратов В. А., Иванов Ю. Г., Петрунин А. Г. Техногенный талик как индикатор состояния мерзлоты, взаимодействующей с гидротехническими объектами // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 16. Воробьев А.В., Соловьев А.А., Воробьева Г. Р. Подход к безаппаратной оценке уровня геоиндуцированных токов в энергосистемах Арктического региона // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 17. Воробьева Г.Р., Воробьев А. В. Опыт применения технологий веб-ГИС в задачах глобального геофизического прогноза // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 18. Воробьева И. А., Шебалин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Дзеранов Б. В. Объединенный каталог землетрясений российской Арктики // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 19. Габышев Д. Н. Зависимость роста капель облаков от их размера и наличия электрического поля // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 20. Гвишиани А. Д. Нечёткие множества и Большие данные в анализе природных катастроф // Всероссийская конференция с международным участием «III Юдахинские чтения» (Архангельск, 25–28 июня 2024 г.), 2024.
 21. Гвишиани А. Д. Системный анализ и методы Больших данных в приложении к проблемам опасных природных явлений и катастроф // Всероссийская конференция «Опасные природные явления и катастрофы: причины, последствия, возможности предотвращения». «Лаверовские чтения – 2024». (Москва, 1 февраля 2024 г.), 2024.
 22. Гвишиани А. Д., Кедров Э. О., Фоменко Н. А., Фирсова Е. Ю., Кудрявцева Т. М. Электронный научный журнал «Russian Journal of Earth Sciences». 25 лет в науках о Земле // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
 23. Гвоздик Г. А. Программная реализация совместности палеонаправлений методом Confidence Areas Configuration // Международная научная конференция студентов,



- аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2024» (Москва, 12–26 апреля 2024 г.), 2024.
24. Гвоздик Г. А., Хохлов А. В. Анализ палеомагнитных данных методом конфигурации зон доверия // II Всероссийская конференция «Добрецовские чтения: наука из первых рук» и XX Всероссийская конференция «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Новосибирск – Горный-Алтай, 18–26 июля 2024 г.), 2024.
25. Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Пилипенко В. А., Стуков Д. А. Цифровая обработка геомагнитных наблюдений на основе методов аппроксимационных моделей // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
26. Гетманов В. Г., Пилипенко В. А., Стуков Д. А. Вычисление частотных характеристик геомагнитных сигналов на основе метода локальных аппроксимационных моделей // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
27. Дзедобоев Б. А. О сейсмичности Арктической зоны Российской Федерации // Всероссийская конференция с международным участием «III Юдахинские чтения» (Архангельск, 25–28 июня 2024 г.), 2024.
28. Дзедобоев Б. А. О сейсмическом районировании территории Российской Федерации // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
29. Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Воробьёва И. А., Маневич А. И., Дзеранов Б. В., Шевчук Р. В., Акматов Д. Ж., Лосев И. В., Кочубей К. А. Геодинамические исследования в задаче системной оценки сейсмической опасности Осетии // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
30. Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзеранов Б. В., Шевчук Р. В., Акматов Д. Ж., Лосев И. В. Геодинамические исследования осетинского сектора большого Кавказа в задачах системной оценки сейсмической опасности: первые результаты // 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (Долгопрудный, 2–5 июля 2024 г.), 2024.
31. Дзеранов Б. В., Сергеева Н. А., Дзедобоев Б. А., Забаринская Л. П., Кедров Э. О., Ишков В. Н., Крылова Т. А. О деятельности Мировых Центров Данных // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.



32. Докукин П. А., Кафтан В. И. Синоптические анимации результатов многолетних ГНСС наблюдений как средство изучения геодинамических процессов // LV (55) Тектоническое совещание «Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2024» (Москва, 29 января – 3 февраля 2024 г.), 2024.
33. Докукин П. А., Кафтан В. И., Мельников А. Ю. Развитие дефицита внутренних смещений земной коры по данным ГНСС до и во время землетрясения Hualien, Taiwan (03 April 2024, Mw=7.4) // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
34. Ишков В. Н. и др. Ветвь роста текущего 25 цикла солнечной активности: характеристики, особенности, прогноз на ветвь спада // Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» (ПРОГНОЗ – 2024) (Троицк, Москва, 27–31 мая 2024 г.), 2024.
35. Ишков В. Н. и др. Симпатические вспышки фазы максимума текущего 25 солнечного цикла: особенности реализации // Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» (ПРОГНОЗ – 2024) (Троицк, Москва, 27–31 мая 2024 г.), 2024.
36. Кабан М. К., Петрунин А. Г., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А., Гвишиани А. Д. Многокомпонентная геофизическая модель литосферы и верхней мантии Арктики // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
37. Кабан М. К., Чен Б., Сидоров Р. В., Петрунин А. Г. Вариации эффективной упругой толщины литосферы, выявляющие различные тектонические режимы в Северо-Восточной Евразии // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
38. Кафтан В. И. Медленные деформационные волны, как триггер сильных землетрясений, по данным ГНСС наблюдений // 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (Долгопрудный, 2–5 июля 2024 г.).
39. Кафтан В. И. Экспериментальная регистрация медленных деформационных волн по данным ГНСС в связи с сильными землетрясениями // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
40. Кафтан В. И., Дзедобоев Б. А., Маневич А. И., Татаринов В. Н. Вековая история изучения современных вертикальных движений земной коры Кавказа в аспекте геодинамических и тектонических представлений // LV (55) Тектоническое совещание «Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2024» (Москва, 29 января – 3 февраля 2024 г.), 2024.



41. Кафтан В. И., Маневич А. И. Влияние катастрофических землетрясений Караманмараш (Турция, февраль 2023 г.) на скорости движения станций ГНСС Кавказского региона в аспекте развития геодезических координатных основ // II Всероссийская научно-практическая конференция «ГЕОФОРУМ. Нижний Новгород» (Нижний Новгород, 25–26 апреля 2024 г.), 2024.
42. Костяной А. Г., Гвишиани А. Д., Розенберг И. Н., Соловьёв А. А., Краснопёров Р. И., Дзедоев Б. А., Гвоздик С. А., Лебедев С. А., Никитина И. М., Дубчак И. А., Сазонов Н. В., Шевалдышева О. О., Сергеев В. Н., Гвоздик Г. А. Геоинформационный анализ региональных климатических изменений в центральной и западной частях Российской Арктики для развития железных дорог // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
43. Краснопёров Р. И. Современные спутниковые методы исследований Земли и Арктики // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
44. Краснопёров Р. И., Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Кудин Д. В., Груднев А. А., Сергеев В. Н. Развитие сети магнитных обсерваторий в России и сопредельных странах: последние достижения и актуальные проблемы // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
45. Кудин Д. В., Белов И. О., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Груднев А. А. Система накопления, обработки и анализа геомагнитных данных МАГНУС // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
46. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Сезонная и межгодовая изменчивость водообмена через Керченский пролив по данным спутниковой альтиметрии // Сборник тезисов докладов (трудов, аннотаций) 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.), 2024.
47. Лисенков И. А. Применение методов машинного обучения при решении задач в науках о Земле // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
48. Лосев И. В. Геодинамическое районирование на основе системного анализа геолого-геофизической информации территории подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Международная конференция к 70-летию



- Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
49. Маневич А. И., Морозов В. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений Тангшань 27.07.1976 и Акетао 25.11.2016 (Китай) // II Всероссийская конференция «Добрецовские чтения: наука из первых рук» и XX Всероссийская конференция «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (Новосибирск – Горный-Алтай, 18–26 июля 2024 г.), 2024.
50. Морозов В. Н., Маневич А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
51. Никитина И. М. Большие данные в науках о Земле // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
52. Пилипенко В. А. Как Солнце воздействует на электромагнитную «погоду» на Земле? // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
53. Пилипенко В. А. Электромагнитный отклик околоземного пространства на грозы и промышленную активность // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
54. Сахно А. В., Лебедев С. А. Адаптация вдольтрековых данных спутниковой альтиметрии в термогидродинамической модели Чёрного моря // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии» (ИТСиТ – 2024) (г. Кемерово, 23–25 октября 2024 г.), 2024.
55. Сахно А. В., Лебедев С. А. Метод вдольтрековой адаптации данных дистанционного зондирования в численной модели термогидродинамики Чёрного моря // Сборник тезисов докладов (трудов, аннотаций) 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.), 2024.
56. Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Крылова Т. А., Книппер Н. И. Базы данных о землетрясениях в сейсмоактивных зонах территории СССР в период 1911–1957 гг. // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.



57. Сидоров Р. В. Комплексная модель геофизических полей и параметров литосферы и верхней мантии Арктики // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
58. Слободянюк А. О., Лебедев С. А. Моделирование формы отражённого импульса от взволнованной поверхности при отклонении оси антенны альтиметра от положения надира // Сборник тезисов докладов (трудов, аннотаций) 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.), 2024.
59. Слободянюк А. О., Лебедев С. А. Оценка точности расчёта высоты морской поверхности при отклонении оси антенны альтиметра от положения надира // XX Малышевские чтения: образование, технологии и общество на смене эпох. (Москва, 28–29 марта 2024 г.), 2024.
60. Соловьёв А. А. Высокоточные наблюдения магнитного поля Земли: от идей М. В. Ломоносова до наших дней // Всероссийская конференция с международным участием «III Юдахинские чтения» (Архангельск, 25–28 июня 2024 г.), 2024.
61. Соловьёв А. А. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения в Арктике // IV Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (г. Видное, Московская область, 4–7 июня 2024 г.), 2024.
62. Соловьёв А. А., Гвишиани А. Д. 70 лет Геофизическому центру РАН: история становления и современный статус // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
63. Татарин В. Н. Геодинамические исследования в районе строительства подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Горно-геологический семинар ИГЕМ РАН (Москва, 4 июля 2024 г.).
64. Хвощевский Д. А., Леперт М. В., Лебедев С. А. Алгоритм классификации форм отражённых импульсов спутникового альтиметра // Сборник тезисов докладов (трудов, аннотаций) 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.), 2024.
65. Шеремет И. А. Мультимножественные методы оценки устойчивости и восстанавливаемости систем // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
66. Шевалдышева О. О., Гвоздик С. А., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Краснощёков Р. И., Николова Ю. И. Анализ временной изменчивости гидрометеорологических параметров вдоль железных дорог с использованием



- ГИС-технологий // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН – 2024 (г. Москва, ИФЗ РАН, 6–8 ноября 2024 г.), 2024.
67. Шевалдышева О. О., Морозов А. В., Гольцова А. Ю. Комплексные магнитометрические и гравиметрические исследования метеоритного озера Смердячье (Шатурский район Московской области) // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2024» (Москва, 12–26 апреля 2024 г.), 2024.
68. Шевчук Р. В. Геодинамическая модель северной части Нижнеканского массива // Международная конференция к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (г. Суздаль, 25–27 сентября 2024 г.), 2024.
69. Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Пилипенко В. А., Селиванов В. Н. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы // 19-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 5–9 февраля 2024 г.), 2024.
70. Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н., Пилипенко В. А. Вариации геомагнитного поля и геоиндуцированных токов в УНЧ диапазоне в периоды совпадения во времени ближней грозы и геомагнитных возмущений // 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (Долгопрудный, 2–5 июля 2024 г.), 2024.
71. Bocharov A. V., Lebedev S. A., Kravchenko P. N. Refinement of algorithms for calculating the Caspian Sea surface temperature using Landsat data // Caspian Basin in Transition Conference 2024, Bridging Geosciences and Environmental Challenges (Baku, 3–6 June 2024), 2024.
72. Kostianoy A. G., Lebedev S. A. 30 Years of Radar Altimetry in the Caspian Sea // "30 Years of Progress in Radar Altimetry" Symposium, Le Corum – Place Charles de Gaulle (Montpellier, France, 2–7 September 2024), 2024.
73. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Interannual Variability of Water Level in Ladoga and Onega Lakes Based on Radar Altimetry // "30 Years of Progress in Radar Altimetry" Symposium, Le Corum – Place Charles de Gaulle (Montpellier, France, 2–7 September 2024), 2024.
74. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Seasonal and Interannual Variability of Water Exchange Through the Kerch Strait Based on Radar Altimetry // "30 Years of Progress in Radar Altimetry" Symposium, Le Corum – Place Charles de Gaulle (Montpellier, France, 2–7 September 2024), 2024.
75. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Popov S. K. Comparison of Water Exchange Between Different Parts of the Caspian Sea Calculated from Satellite Altimetry and Numerical Modelling // Caspian Basin in Transition Conference 2024, Bridging Geosciences and Environmental Challenges (Baku, 3–6 June 2024), 2024.



76. Rostovtseva Yu. V. Facies associations of Middle Miocene (Konkian of Eastern Paratethys) sedimentary succession of the Kura Basin (Ujarma section, Georgia) // 10th International Workshop: Neogene of Central and South-Eastern Europe (Podčetrtek, Slovenia, 27–31 May, 2024), 2024.

Данные

1. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the crustal inner shear deficit in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // Earths Science DataBase, 2024.
2. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the crustal total shear strain in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // Earths Science DataBase, 2024.
3. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the dilatation strain in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // Earths Science DataBase, 2024.
4. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the horizontal and vertical displacements in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // Earths Science DataBase, 2024.
5. Kaftan V. I., Melnikov A. Yu., Dokukin P. A. Evolution of crustal inner displacement deficit in connection with strongest Taiwan's earthquakes migration according to GPS data from 2014 to 2024 // Earths Science DataBase, 2024.

Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН

Программы для ЭВМ

1. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. Программа поиска возвышенностей на положительно-определенном рельефе «Crystal» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689282 от 5 декабря 2024 г.
2. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. Программа распознавания трендов на временных рядах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689281 от 5 декабря 2024 г.
3. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. Программа четырехмерного морфологического анализа магнитограмм / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687647 от 20 ноября 2024 г.
4. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А. Fuzzy Logic Choice / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687461 от 19 ноября 2024 г.



5. Антошин В. В., Маневич А. И., Гаврилова А. А., Камаев А. А. Программа для расчета выбросов парниковых газов при мониторинге объектов добывающей промышленности / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664316 от 16 июня 2024 г.
6. Гвоздик Г. А., Хохлов А. В. Confidence Areas Configuration / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689164 от 4 декабря 2024 г.
7. Гетманов В. Г., Алёшин И. М. Программа вычисления аномалий геомагнитного поля на основе аппроксимационных моделей с применением наблюдений беспилотных летательных аппаратов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687390 от 18 ноября 2024 г.
8. Гетманов В. Г., Пилипенко В. А., Стуков Д. А. Программа вычисления оценок функций частоты и функции первой производной частоты для экспериментальных наблюдений геомагнитных сигналов диапазона РС1 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689162 от 4 декабря 2024 г.
9. Гетманов В. Г., Пилипенко В. А., Стуков Д. А. Программа вычисления параметров кусочно-синусоидальных с низкочастотным аддитивным трендом моделей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689163 от 4 декабря 2024 г.
10. Камаев А. А., Маневич А. И., Антошин В. В. Программа для расчета эрозионного потенциала региона на основе карт осадков и цифровой модели высот / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668956 от 13 августа 2024 г.
11. Маневич А. И., Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В., Лосев И. В. Программа для моделирования ориентаций действующих напряжений на основе структурных данных / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688017 от 25 ноября 2024 г.

Базы данных

1. Кабан М.К., Петрунин А.Г. База данных упругих параметров литосферы Арктики и северной Евразии / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024626005 от 13 декабря 2024 г.
2. Лосев И. В., Маневич А. И., Шевчук Р. В., Акматов Д. Ж., Татаринцов В. Н. База данных по геодинамике Нижне-Канского массива 2.0 (Geodynamics DataBase NKM 2.0) / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625328 от 19 ноября 2024 г.
3. Маневич А. И., Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В., Дзеранов Б. В., Дзедобоев Б. А., Лосев И. В. База данных действующих напряжений территории Республики



- Северная Осетия – Алания / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625324 от 19 ноября 2024 г.
4. Маневич А. И., Лосев И. В., Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В., Кочубей К. А., Камаев А. А., Дзедоев Б. А., Дзеранов Б. В. ГИС-ориентированная база данных по геодинاميке территории Республики Северная Осетия – Алания 1.0 (Geodynamics DataBase Ossetia 1.0) / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625429 от 25 ноября 2024 г.
 5. Самохина О. О., Бояршинов Г. С., Боровская Т. Е., Пресняков С. В. База сферических визуализаций: Антропосфера / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625449 от 25 ноября 2024 г.
 6. Самохина О. О., Бояршинов Г. С., Боровская Т. Е., Пресняков С. В. База сферических визуализаций: Арктика / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625428 от 25 ноября 2024 г.
 7. Самохина О. О., Бояршинов Г. С., Боровская Т. Е. База сферических визуализаций: Астрономия (спутники планет и другие астротела) / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625448 от 25 ноября 2024 г.
 8. Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Книппер Н. А., Крылова Т. А. Землетрясения в Среднеазиатской сейсмоактивной зоне, 1957–1961 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625422 от 22 ноября 2024 г.
 9. Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Книппер Н. А., Крылова Т. А. Землетрясения в Кавказской сейсмоактивной зоне, 1957–1961 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625455 от 25 ноября 2024 г.