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 2025 год.

Результаты научных исследований

и международных проектов

Москва

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 2025

Results of Scientific Research

and International Projects

Moscow



This volume presents information on scientific activities of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences in 2025. It contains information on the main results obtained within the budgetary funding projects. It also includes the results of scientific research within the projects of the Russian Science Foundation (RSF). This volume gives an outlook of the international activities of the Geophysical Center, including the National Geophysical Committee of the Russian Academy of Sciences (NGC RAS). The report contains a list of publications as well as information on intellectual property of the Geophysical Center for the year 2025.

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 01.10.2026

Layout Production:

E. O. Kedrov

https://doi.org/10.2205/10.2026BS060

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2026), Report of Geophysical Center RAS for 2025. Results of Scientific Research and International Projects, Geoinf. Res. Papers, Vol. 14, No. 1, 152 pp., BS1001, https://doi.org/10.2205/10.2026BS060

M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 2026, 152 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2026 Geophysical Center RAS

В настоящем издании содержатся сведения о научной деятельности Геофизического центра Российской академии наук в 2025 г. Представлены сведения об основных результатах, полученных в рамках государственного задания по темам научно-исследовательских работ. В отчет включены результаты научных исследований по грантам Российского научного фонда (РНФ). Приведена информация о международной деятельности Геофизического центра, включая работу Национального геофизического комитета Российской академии наук (НГК РАН). Отчет содержит перечень публикаций и результатов интеллектуальной деятельности Геофизического центра в 2025 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 01.10.2026 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

https://doi.org/10.2205/10.2026BS060

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснопёров (ред.) (2026) Отчет о деятельности Геофизического центра РАН за 2025 год. Результаты научных исследований и международных проектов. М.: Исследования по геоинформатике, т. 14, № (1), С. 152 https://doi.org/10.2205/10.2026BS060

М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 2026, 152 с.

ISSN: 2308-5983

© ГЦ РАН, 2026

Содержание

Содержание 5

1 Научная деятельность ГЦ РАН 6

2 Разработка методов системного анализа пространственных данных, моделирования и деформационного мониторинга с использованием ГНСС для оценки устойчивости геологической среды и предупреждения природно-техногенных катастроф 23

3 Развитие методов системного анализа данных геофизических наблюдений для задач изучения характеристик электромагнитного поля земли и околоземного пространства 35

4 Аккумулирование, структурирование, депонирование, визуализация, диссеминация, системный анализ и комплексирование геолого-геофизических данных 49

5 Создание теоретических основ, методик и алгоритмов для развития пунктов и сетей мониторинга геофизических процессов 81

6 Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях. 91

7 Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта 108

8 Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор) 119

9 Определение пространственно-временной структуры магнитного поля Земли в окрестностях геомагнитных обсерваторий РФ с применением БПЛА 128

10 Международная деятельность ГЦ РАН в 2025 году 133

11 Деятельность НГК РАН 137

Список основных научных публикаций за 2025 год 138

Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН 151

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 2025 г. была сосредоточена на выполнении государственного задания № 075-00439-25-01, утвержденного 18 марта 2025 г. Исследования проводились в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы). Направление науки: 1.5. Науки о Земле.

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

1 Тема НИР: «Применение теории и практики Больших данных в арктических исследованиях» (тема молодёжной 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. Дзебоев

2 Тема НИР: «Разработка методов системного анализа пространственных данных, моделирования и деформационного мониторинга с использованием ГНСС для оценки устойчивости геологической среды и предупреждения природно-техногенных катастроф»

Шифр темы: FMWG-2025-0005
Регистрационный номер: 125062507522-9
Структурное подразделение: Лаборатория геодинамики
Руководитель: чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов

3 Тема НИР: «Развитие методов системного анализа данных геофизических наблюдений для задач изучения характеристик электромагнитного поля Земли и околоземного пространства»

Шифр темы: FMWG-2025-0006
Регистрационный номер: 125062507525-0
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований
Руководитель: к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров

4 Тема НИР: «Аккумулирование, структурирование, депонирование, визуализация, диссеминация, системный анализ и комплексирование геолого-геофизических данных»

Шифр темы: FMWG-2025-0007
Регистрационный номер: 125062507528-1
Структурное подразделение: Лаборатория геофизических данных; Лаборатория электронных публикаций
Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев

5 Тема НИР: «Создание теоретических основ, методик и алгоритмов для развития пунктов и сетей мониторинга геофизических процессов»

Шифр темы: FMWG-2025-0008
Регистрационный номер: 125062407514-5

Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Лаборатория геодинамики; Сектор геофизического мониторинга

Руководитель: к.т.н. Д. В. Кудин

1.2 Проекты научных фондов

В 2025 г. в ГЦ РАН выполнялись исследования по 3 грантам Российского научного фонда (РНФ):

1 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/

2 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. Дзебоев

https://rscf.ru/project/23-17-00176/

3 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

Методика построения прогнозных карт изосейст эпицентральных зон сильных коровых землетрясений по данным моделирования напряженно-деформированного состояния

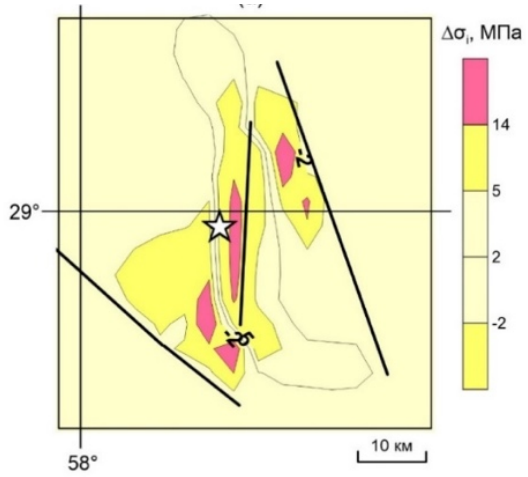
Д.т.н. В. Н. Морозов, А. И. Маневич

(Тема НИР «Разработка методов системного анализа пространственных данных, моделирования и деформационного мониторинга с использованием ГНСС для оценки устойчивости геологической среды и предупреждения природно-техногенных катастроф»)

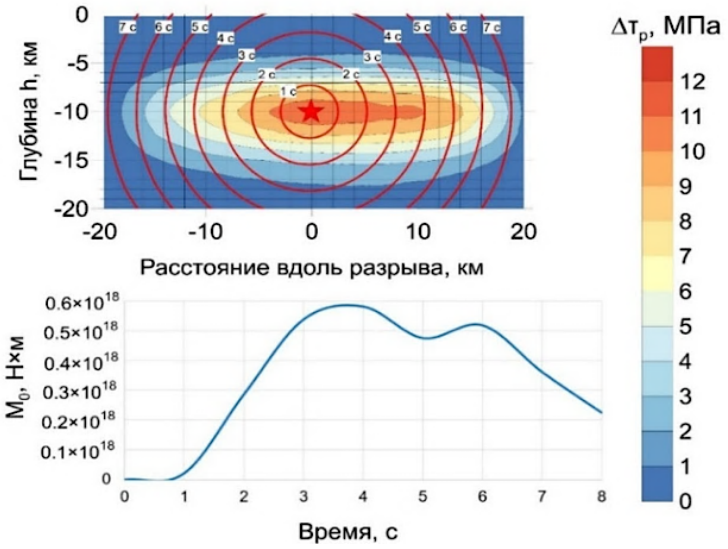
Разработана методика построения прогнозных карт изосейст эпицентральных зон сильных коровых землетрясений, основанная на ретроспективном моделировании полей тектонических напряжений в эпицентральных зонах. Математические модели сейсмогенерирующего слоя эпицентральных зон сильных землетрясений (M > 6) учитывают пространственную ориентацию и геометрию активных разломов, определяющих локальную концентрацию упругой потенциальной энергии внешнего поля тектонических напряжений и её трансформацию в блоковые смещения.

Показано, что локальная концентрация интенсивности тектонических напряжений в эпицентральной зоне перед сильным землетрясением определяет параметры будущего события (рис. 1.1): протяжённость разрыва L, статический сейсмический момент Mo, временную функцию сейсмического момента Mo(t), а также магнитуду M. Предложенный

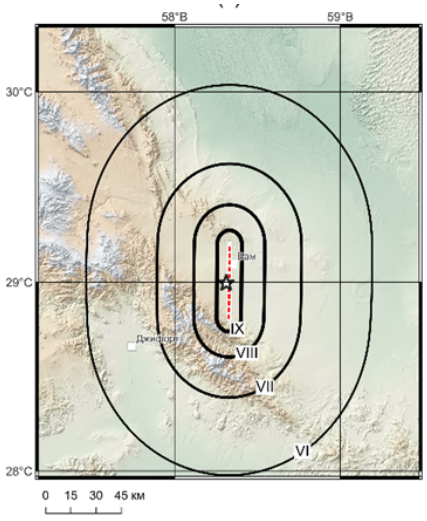
подход дает возможность построения синтетических сейсмограмм при дефиците инструментальных записей. Ретроспективный прогноз положения и интенсивности очагов сильных коровых землетрясений на основе моделирования создает дополнительные возможности для оценки ожидаемого сейсмического воздействия, в т. ч. в районах высокой плотности населения и при проектировании объектов повышенной экологической опасности.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Моделирование НДС и сейсмического момента землетрясения Бам 26.12.2003 г. (Иран): а) карта разности интенсивности напряжений Δσi до и после землетрясения; б) сброшенные напряжения Δτр, модель ячеек 2×2 км и распространение разрыва со скоростью 2,8 км/с (сверху) и функция временного сейсмического момента по результатам моделирования (снизу); в) изосейсты протяженного источника на основе моделирования НДС

Morozov V. N., Manevich A. I. Prediction of the Location and Intensity of Strong Continental Earthquakes (Based on Mathematical Modeling Results) // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. No. 6. DOI: 10.2205/2025es001086

Шестилетняя квазипериодичность всплесков векового ускорения магнитного поля на границе ядро-мантия за 90 лет наблюдений

Чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров, к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов

(Тема НИР «Развитие методов системного анализа данных геофизических наблюдений для задач изучения характеристик электромагнитного поля Земли и околоземного пространства»)

Установлена 6-летняя квазипериодичность всплесков векового ускорения МПЗ на границе ядро-мантия за 90-летний период (1932–2022 гг.). Для устойчивого выделения сигнала главного МПЗ из зашумленных данных магнитных обсерваторий применялись современные алгоритмы нечеткой математики. Ранее выявленная периодичность определялась только по данным высокоточных спутниковых наблюдений, получаемых с 2000 г. Детальный анализ отдельных компонент МПЗ позволил выделить два пика в спектральной плотности мощности векового ускорения одинаковой полярности: ~5–6 лет и ~7–8 лет (рис. 1.2).

Первый пик подтверждает выявленную ранее связь периодической 6-летней осцилляции продолжительности суток с осесимметричными экваториальными альвеновскими волнами на поверхности жидкого ядра [*Duan and Huang*, 2020]. Второй пик экспериментально подтверждает существование недавно предсказанных теоретически неосесимметричных магнито-кориолисовых волн с периодом ~7 лет, которые также влияют на вариабельность МПЗ [*Gillet et al.*, 2023]. Этот результат открывает новые знания о быстрых вариациях главного МПЗ и стоящих за ними волновых процессах на границе ядро-мантия.

Sidorov R., Soloviev A., Bogoutdinov Sh. A 6-year quasi-periodicity in the geomagnetic secular acceleration pulses over 1932–2022 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2025. Vol. 361. Art. 107330. DOI: 10.1016/j.pepi.2025.107330

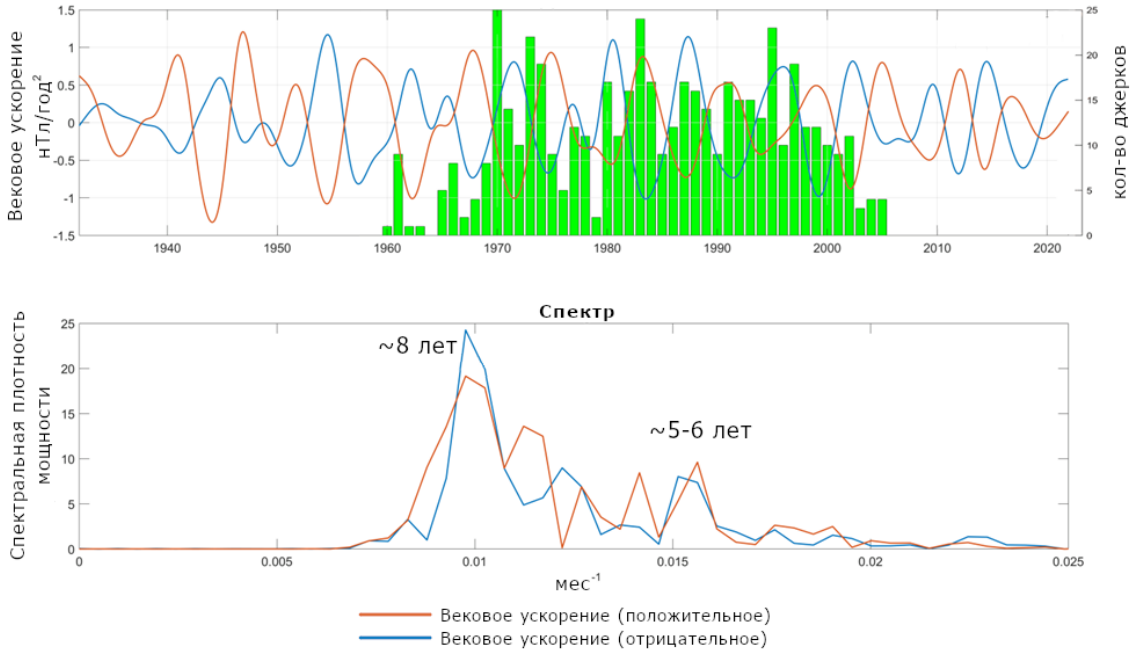


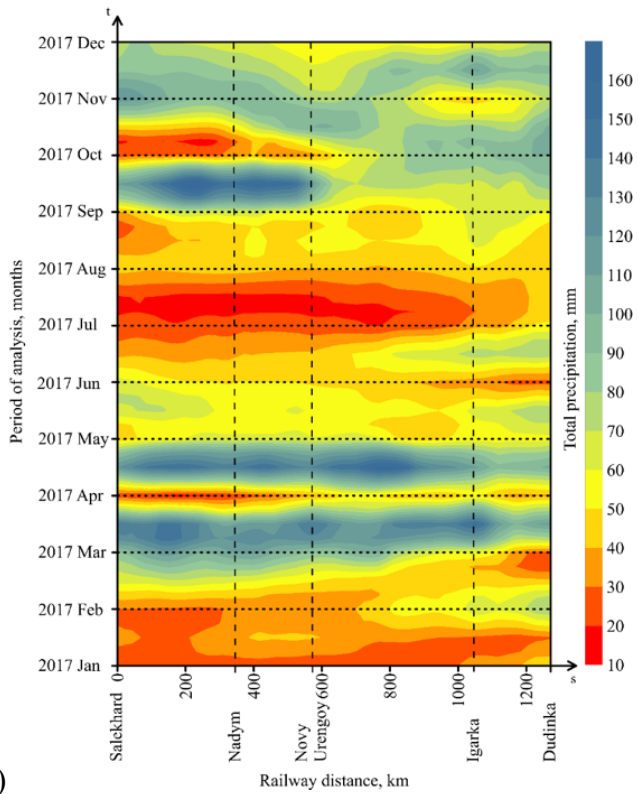
Рисунок 1.2 – Положительные (красные) и отрицательные (синие) огибающие сигнала векового ускорения главного МПЗ для компоненты X (вверху) и их спектральная плотность мощности (внизу). Количество ежегодных геомагнитных джерков в компоненте X, наблюдавшихся во всем мире в 1957–2008 гг., показано столбчатой диаграммой

Климатический атлас ретроспективных и прогнозных изменений основных гидрометеорологических параметров западного сектора российской Арктики за период 1950–2064 гг. в интересах развития транспортной инфраструктуры

Академик РАН А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН И. Н. Розенберг, чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, д.ф.-м.н. А. Г. Костяной, О. О. Шевалдышева, С. А. Гвоздик, д.ф.-м.н. С. А. Лебедев, к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров

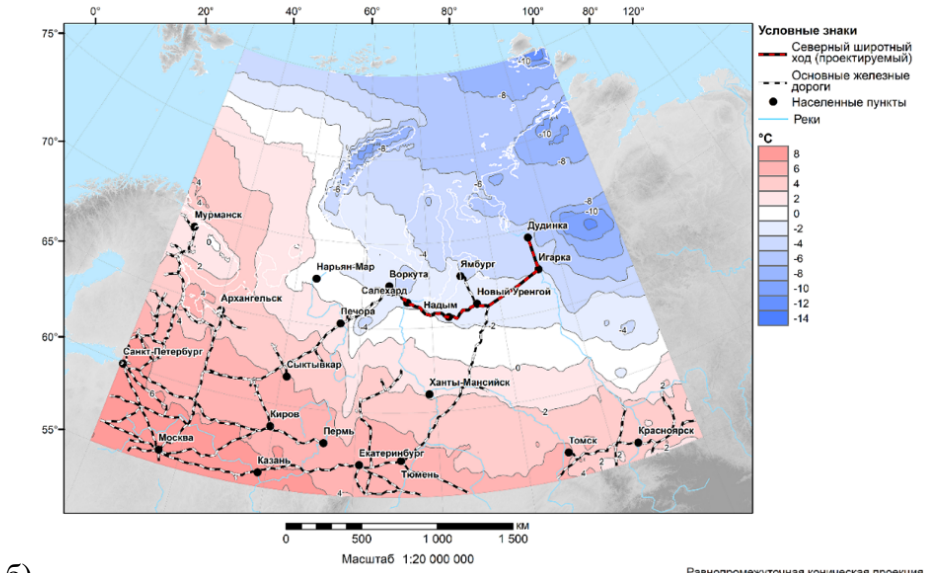
(Грант РНФ № 21-77-30010-П «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»)

Для региона западного сектора российской Арктики создан цифровой атлас климатических изменений основных гидрометеорологических параметров: температура воздуха у поверхности, общее количество осадков, скорость ветра у поверхности, температура почвы, влагосодержание почвы, влажность воздуха и толщина снежного покрова. Ретроспективная часть Атласа охватывает период с 1950 г., прогнозная часть – до 2064 г. Атлас, включающий в себя более 1000 цифровых карт и более 150 пространственно-временных диаграмм Хофмюллера, позволяет проводить комплексный анализ влияния долговременных климатических изменений на развитие транспортной инфраструктуры региона, включая проектируемый Северный широтный ход (рис. 1.3). Отдельно Атлас содержит информацию о вариациях указанных параметров в ключевых узлах сопряжения железнодорожных, автомобильных, речных и морских транспортных путей. В качестве исходной информации использованы данные ретроспективного анализа MERRA-2 [*Gelaro et al.*, 2017] и международной прогнозной модели CNRM-CM6-1-HR [*Voldoire*, 2019].

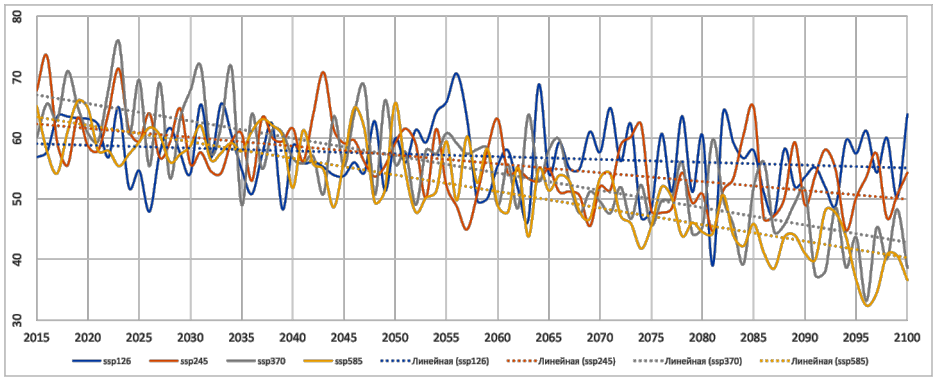


а)

Рисунок 1.3 – а) Диаграмма Хофмюллера изменчивости общего количества осадков вдоль магистрали Салехард – Дудинка в декабре – январе 2017 г.;



б)



в)

Рисунок 1.3 (продолжение) – б) средние значения температуры воздуха у поверхности за период 2043–2064 гг.; в) межгодовая изменчивость концентрации льда в акватории, прилегающей к Ямбургу по 4 сценариям климатических изменений и их линейные тренды за 2015–2100 гг.

Kostianoy A. G., Gvishiani A. D. et al. Geoinformation analysis of regional climatic changes in the Central and Western Russian Arctic for railway development // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. No. 1. P. 1–34. DOI: 10.2205/2025es000956

Kostianoy A. G., Gvishiani A. D. et al. Projection of regional climate change for 2023–2064 in the northern part of the Western Russian Arctic: A support for Russian Railways // Geography, Environment, Sustainability. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 61–79. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-4179

Модель мощности литосферы Северо-Восточной Евразии

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

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

До настоящего времени имеющиеся модели литосферы Северо-Восточной Евразии были получены в рамках отдельных методов по данным сейсмической томографии, теплового моделирования, гравитационного поля и др. Они разнородны и дают различные оценки мощности литосферы: максимальные значения варьируются от 225 до 350 км. В 2025 г. получена модель, которая впервые основана на комплексном анализе практиче-

ски всех имеющихся геофизических данных (сейсмических, геохимических, данных о тепловом потоке, гравитационном поле и его производных). Полученная модель согласуется со всеми полями и может считаться наиболее реалистичной на сегодня. Распределение мощности литосферы хорошо соответствует тектонической фрагментации территории и представляет несколько существенно новых деталей. Одной из ключевых особенностей является смещение корня Сибирского кратона в юго-восточном направлении по сравнению с предыдущими моделями. Также выделяется глубокий корень литосферы под Тимано-Печерским блоком (рис. 1.4).

Kaban M., Petrunin A., Shevaldysheva O. Thickness of the lithosphere in Northeastern Eurasia // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. No. 6. DOI: 10.2205/2025es000956

Kaban M., Tesauro M., Soloviev A., Gvishiani A. An integrative 3D model of the lithosphere and upper mantle of Asia (Keynote presentation) // TopoAsia International Workshop. Shanghai, China. 2025

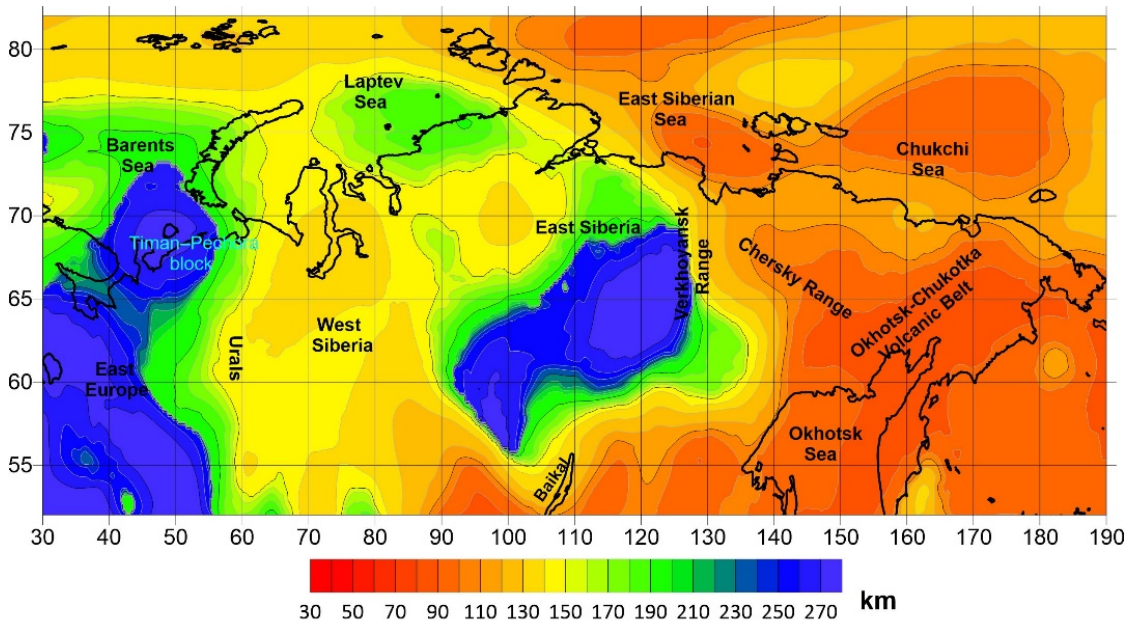


Рисунок 1.4 – Глубина до подошвы литосферы Северо-Восточной Евразии

Исследование пространственно-временной эволюции деформаций земной коры в сейсмоактивных регионах по данным непрерывных ГНСС-наблюдений

Д.т.н. В. И. Кафтан

(Тема НИР «Разработка методов системного анализа пространственных данных, моделирования и деформационного мониторинга с использованием ГНСС для оценки устойчивости геологической среды и предупреждения природно-техногенных катастроф»)

Исследование посвящено анализу закономерностей пространственно-временной эволюции деформаций земной коры по результатам ГНСС-наблюдений и установления причинно-следственной связи с сейсмичностью. Разработана оригинальная методика анализа и выявления кинематических особенностей сейсмодеформационного процесса по синоптическим визуализациям. Исследованы районы сильных землетрясений Камчатки, Средиземноморья (рис. 1.5), Тихоокеанского складчатого пояса и др. Обнаружено явление

медленной миграции деформационных волн перед сильными землетрясениями на временных интервалах до 15 лет. Результаты имеют важное научное значение как прямые доказательства существования деформационных волн и могут стать основой прогноза местоположения мест будущих сильных землетрясений по результатам режимных наблюдений за деформациями с использованием средств ГНСС.

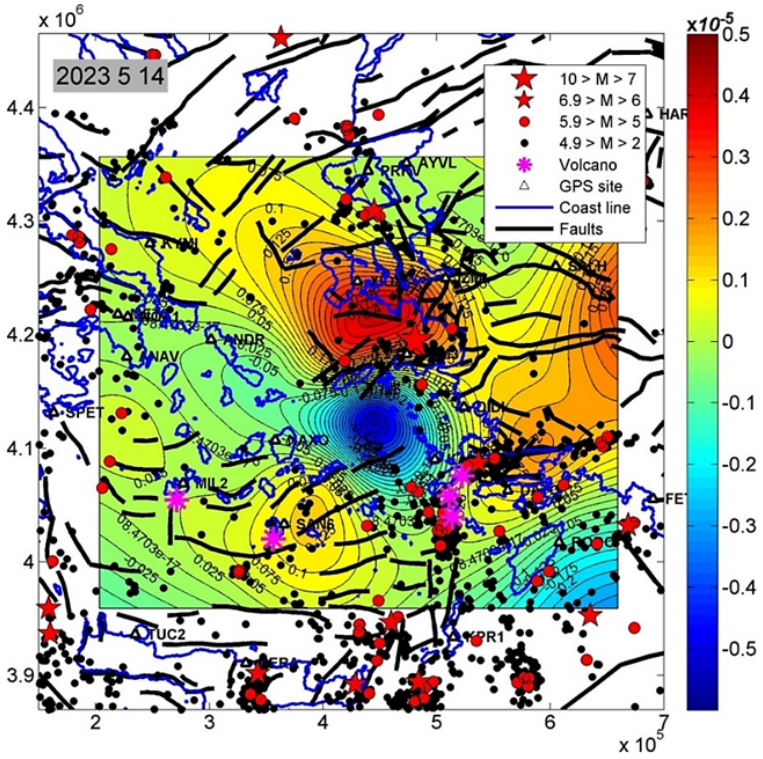


Рисунок 1.5 – Накопленная деформация дилатации за период с 13.10.2011 по 14.05.2023 г. в районе землетрясения Самос M7, 2020 г. (синий цвет – сжатие, красный – растяжение)

Кафтан В. И., Миронов И. К., Маневич А. И., Шевчук Р. В. Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана (п-ов Камчатка) с 2015 по 2023 гг. // Физика Земли. 2025. № 3. С. 115–128. DOI. 10.31857/S0002333725030093

Кафтан В. И., Мельников А. Ю., Докукин П. А. Эволюция дефицита внутренних смещений земной коры по данным GPS в связи с сейсмичностью 2014–2024 гг. и землетрясением Хуалянь, Тайвань (MW=7,4) // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 1. С. 1–14. DOI: 10.5800/GT-2025-16-1-0812

Какие регионы РФ могут быть подвержены воздействию экстремальных магнитных бурь?

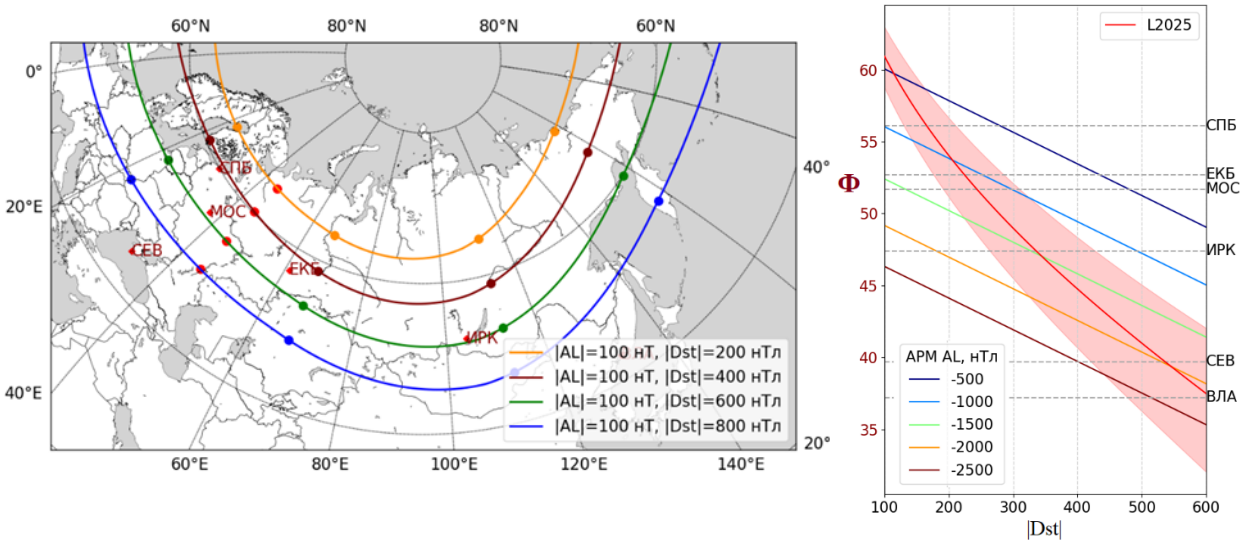
Д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко, Н. В. Савельева

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

Информация о положении экваториальной границы аврорального овала позволяет предсказать, на каких широтах могут наблюдаться наиболее интенсивные вариации геомагнитного поля, которые являются источником геоиндуцированных токов (ГИТ), представляющих угрозу стабильной работе энергетической инфраструктуре. Для оценки минимальной широты овала в настоящее время наиболее широко используются модели Старкова-93 (C93), Auroral Precipitation Model (APM) и APM_Geo, Ovation-prime (OP), и L2025

для экстремальных бурь с |Dst|>400 нТл. Сопоставление зависимости широты экваториальной границы овала от интенсивности бури по разным моделям показало, что закономерности связи границы овала и интенсивности бури, установленные для средних и умеренных бурь (|Dst|<400 нТл), нарушаются при экстремальных бурях (|Dst|>400 нТл). Для оценки вызванных бурями ГИТ возможных рисков на территории РФ по всем анализируемым моделям построены карты положения экваториальных границ овала в условиях экстремальной геомагнитной активности (большие значения Dst и AL-индексов). Анализ предсказываемого положения границы овала показал, что интенсивные суббури, регистрируемые во время бурь, приводят к значительному экваториальному смещению границы овала (рис. 1.6). Таким образом, все крупные энергетические сети РФ могут быть подвержены влиянию ГИТ не только при экстремальных, но и при умеренных магнитных бурях, при наличии на их фоне интенсивных суббурь.

Савельева Н. В., Пилипенко В. А., Ягодкина О. И. Какие широты Российской Федерации могут быть подвержены воздействию экстремальных магнитных бурь? // Солнечно-земная физика. 2026. Т. 12. №2. С. 24–37. DOI: 10.12737/szf-122202603



а) б)

Рисунок 1.6 – а) Положение экваториальной границы овала по модели APM_GEO для магнитных бурь разной интенсивности (характеризуемых индексом Dst) без суббурь на их фоне; б) Зависимость широты границы сияний от индекса интенсивности магнитной бури Dst при возникновении на их фоне суббурь разной интенсивности (характеризуемых индексом AL). Пунктирные линии указывают широты крупных городов РФ

Модель конденсационного роста капель в земной атмосфере

К.ф.-м.н. Д. Н. Габышев

(Тема НИР: «Создание теоретических основ, методик и алгоритмов для развития пунктов и сетей мониторинга геофизических процессов»)

Разработана комплексная термодинамическая модель конденсационного роста капель, количественно описывающая влияние электрических полей характерной для облаков интенсивности (~10^5 В/м). Модель учитывает суперпозицию полей от различных источников и подтверждает наблюдаемые в природе закономерности усиления конденсации:

$$\frac{\Delta c(E_0)}{c_{flat}} = \frac{M}{RT\rho}\frac{\varepsilon_o}{2}\left(\frac{\zeta}{\delta}\right)^2\left(1 + 2P\frac{\delta}{\zeta}E_0\right).$$

Эффективное приращение концентрации водяного пара Δc в электрическом поле E_0 по сравнению со случаем плоской поверхности c_{flat} зависит от термодинамической температуры T, плотности водяного пара ρ и толщины диффузионного слоя δ. Здесь M – молярная масса воды, R – универсальная газовая постоянная, P – дипольный момент, ε_o – электрическая постоянная.

Gabyshev D. N. Condensational growth of spherical water droplets altered under external electric fields // Journal of Aerosol Science. 2025. Vol. 186. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2025.106554

Gabyshev D. N. Semi-analytical refinement of submicron droplet growth by condensation // Russian Journal of Earth Sciences. Vol. 25. No. 2. P. 1–8. DOI: 10.2205/2025ES000974

1.4 Договорная деятельность

В 2025 г. договорная деятельность ГЦ РАН включала выполнение обязательств по 13 договорам.

1 Лицензионные договоры (2)
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

2 Договор на выполнение НИР
Предмет: Анализ геодинамических и сейсмических процессов в районе размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов
Заказчик: ИБРАЭ РАН, ГК «Росатом»

3 Договор на выполнение НИР
Предмет: Обоснование методики прогноза оседаний земной поверхности при разработке месторождений калийно-магниевых солей
Заказчик: Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

4 Договор на выполнение НИР
Предмет: Геоинформационный анализ гидрологической информации и гидродинамических процессов в устьевой области реки Онеги
Заказчик: РУТ (МИИТ)

5 Договоры на выполнение НИР (2)
Предмет: Литолого-фациальная интерпретация верхнетюменских и картирование тюменских отложений
Заказчик: ООО «НК «Югранефтепром» / ПАО «Лукойл»

6 Договор 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»

7 Договор на оказание услуг
Предмет: Организация передачи в реальном времени измерений, получаемых от магнитной обсерватории «Иркутск»
Заказчик: Научно-Технический Центр «ТПМ» / ПАО «Газпром»

8 Договор на выполнение НИР
Предмет: Расчет прогнозных значений компонент геомагнитного поля по территории России
Заказчик: АО «ИГиРГИ» / ПАО «НК „Роснефть“»

9 Договор на выполнение НИР
Предмет: Расчет референсных значений геомагнитного поля
Заказчик: ООО «Интеллектуальные системы» / ПАО «НК „Роснефть“»

10 Договор на выполнение НИР
Предмет: Измерение магнитного склонения и расчет прогноза его изменений на три года на территории Ярудейского НГКМ
Заказчик: ООО «ЯРГЕО» / ПАО «Новатэк»

11 Договор на выполнение НИР
Предмет: Создание магнитной обсерватории на полуострове Ямал (пос. Сабетта) для проведения геомагнитных исследований в арктическом регионе
Заказчик: Компания Schlumberger

1.5 Экспедиции и полевые работы

В 2025 г. сотрудники ГЦ РАН приняли участие в целом ряде экспедиций и выезжали на научные полевые работы (рис. 1.7). 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)
- Обсерватория «Михнево», Московская область (март, май, июль, август, сентябрь, ноябрь)
  Участники: А. А. Груднев, С. А. Дакалов, В. Ю. Катков, Д. В. Кудин, В. Н. Сергеев, Р. В. Сидоров, Т. М. Кудрявцева
  Задачи: Работы по модернизации инфраструктуры обсерватории. Исследование локальной магнитной обстановки
- Обсерватория «Климовская», Архангельская область (январь, март, ноябрь)
  Участники: А. А. Груднев, В. Ю. Катков, М. А. Пасишниченко, В. Н. Сергеев, Р. В. Сидоров
  Задачи: Регламентные работы. Подготовительные работы по возведению вариометрического павильона. Установка резервного магнитометра
- Обсерватория «Чикан», Иркутская область (март, июнь, июль)
  Участники: Д. Н. Габышев, А. А. Груднев, Д. В. Кудин, В. Н. Сергеев, Р. В. Сидоров
  Задачи: Работы по развертыванию обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ в окрестностях Ковыктинского ГКМ. Подготовительные работы к пуско-наладке оборудования
- г. Надым, ЯНАО (апрель)
  Участники: А. А. Груднев, В. В. Кабров, М. А. Пасишниченко, В. Н. Сергеев
  Задачи: Проведение абсолютных наблюдений вблизи месторождения
- Республика Карелия (май)

Участники: Р. В. Сидоров, Р. В. Шевчук, Д. К. Мокров, Ф. В. Передерин, К. И. Холодков, В. М. Щербаков
Задачи: Проведение аэромагнитной съемки. Профиль от оз. Лоймоланъярви (Суоярвский район) до оз. Янисъярви (Сортавальский район)

– Обсерватория «Арти», Свердловская область (июль)
Участники: Д. К. Мокров, Ф. В. Передерин, К. И. Холодков
Задачи: Проведение аэромагнитной съемки
– Республика Северная Осетия – Алания (август – сентябрь)
Участники: Д. Ж. Акматов, Б. В. Дзеранов, А. А. Камаев, К. А. Кочубей, А. И. Маневич, М. А. Пасишниченко, Р. В. Шевчук
Задачи: Геодезическая съемка на геодинамическом полигоне в районе Восточных ветвей Владикавказского разлома в рамках гранта РНФ № 23-17-00176
– Обсерватория «Норильск», Красноярский край (сентябрь)
Участники: Ф. В. Передерин, Д. К. Мокров, К. И. Холодков
Задачи: Проведение аэромагнитной съемки
– Оймяконский район, Республика Саха (Якутия) (сентябрь)
Участники: Д. Д. Вейс
Задачи: Проведение геологических изысканий

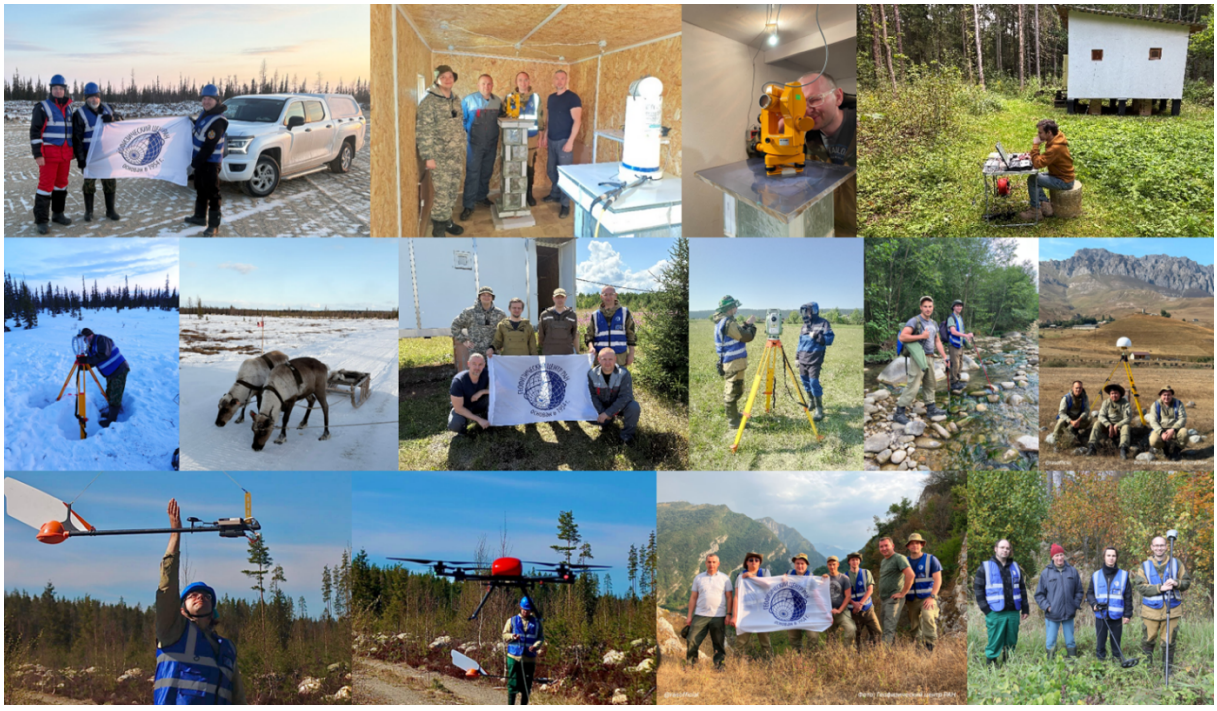


Рисунок 1.7 – Экспедиции ГЦ РАН в 2025 г.

1.6 Научные мероприятия

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

С 22 по 24 сентября 2025 г. в Москве прошла V Всероссийская школа молодых ученых «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике». Организатором Школы выступил ГЦ РАН. Школа собрала более 50 участников, из них 17 российских ученых-лекторов и 26 слушателей из ГЦ РАН, Института географии РАН, Института динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Института проблем комплексного освоения недр РАН, Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Российского университета транспорта (МИИТ), МГУ им. М. В. Ломоносова и Института глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля (рис. 1.8). 24 сентября участники мероприятия познакомились с постоянной экспозицией Государственного геологического музея им. В. И. Вернадского РАН: услышали о геологической истории Земли, геологии Подмосковья, увидели минералы из частных собраний и многое другое.

Мероприятие продолжило серию ежегодных школ молодых учёных, проводимых в рамках проекта Российского научного фонда «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (грант № 21-77-30010-П). Так, в сентябре 2021 г. на базе Северного (Арктического) федерального университета (САФУ) в Архангельске прошла I Школа. II, III, IV Школы были организованы в Подмосковье в июне 2022, 2023 и 2024 гг. соответственно. Подробная информация о мероприятии размещена на сайте: https://school2025.gcras.ru/.



Рисунок 1.8 – Участники V Всероссийской школы молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике»

Научные чтения (конференция) «Экзолит-2025»

13 и 14 ноября 2025 г. в стенах Геофизического центра РАН прошли научные чтения «Экзолит-2025», посвященные 220-летию основания Московского общества испытателей природы (МОИП). Организаторами выступили секция «Литология» МОИП совместно с ГЦ РАН. В научных чтениях приняли участие специалисты в области литологии из разных

регионов страны, были заслушаны многочисленные доклады (рис. 1.9). Ученые представили результаты изучения осадочных пород, обсудили методы их исследования, продемонстрировали новые палеогеографические реконструкции, рассмотрели проблемы нефтяной литологии и другие важные научные вопросы. В рамках чтений прошли студенческая сессия и круглый стол на тему актуальных вопросов типизации микробиалитов. Желающие посетили минералого-петрографический музей им. Л. В. Пустовалова Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. Материалы чтений изданы в печатном сборнике «Экзолит – 2025» (https://gcras.ru/doc/pdf/Exolith2025_Reports.pdf).



Рисунок 1.9 – Участники Научных чтений (конференции) «Экзолит-2025»

Участие сотрудников ГЦ РАН в научных мероприятиях

В 2025 г. сотрудники ГЦ РАН приняли участие в ряде российских и международных научных мероприятий (рис. 1.10). Среди прочих можно выделить:

- Международная конференция «Методы и модели системного анализа для изучения, прогнозирования и оценки рисков наводнений и других стихийных бедствий» (Астана, Казахстан)
- Научная ассамблея IAGA-IASPEI (Лиссабон, Португалия)
- Topo-Asia International Workshop (Шанхай, Китай)
- Научный семинар Департамента космических исследований Южно-Африканского космического агентства – SANSA (Херманус, ЮАР)
- 51-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского – В. Н. Страхова (Пермь)
- LVI Тектоническое совещание «Тектоника и геодинамика земной коры и мантии – 2025» (Москва)
- Всероссийская конференция «Лаверовские чтения – 2025» (Москва)
- 20-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва)
- Всероссийская научная конференция «Перспективы геофизики и геологии первой половины XXI века» (Новосибирск)
- Всероссийская школа-конференция «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» (Казань)

- VIII Международная научно-практическая конференция «Вселенная белого медведя: эффективное сотрудничество в Арктике» (Москва)
- VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп)
- VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия – 2025» (Москва)
- XIX Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (Махачкала)
- 35-я международная конференция «ГрафиКон-2025» (Йошкар-Ола)
- II Международная научно-практическая конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях» (Москва)
- XVII Съезд Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» (Москва)
- IV Всероссийская научная конференция «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (Москва)
- Третья конференция «Геофизика и Математика» (Екатеринбург)
- 14-е заседание Совместной Российско-Южноафриканской комиссии по научно-техническому сотрудничеству (Москва)
- V Школа-конференция «Гординские чтения» (Москва)
- VI Северный Форум «Север и Арктика – партнерство в меняющемся мире» и IV Федеральным форум «Цифровой Алмаз» (Якутск)
- V Конгресс молодых ученых (Ф/Т «Сириус»)
- Выездное заседание Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики (Петрозаводск)



Рисунок 1.10 – Участие сотрудников ГЦ РАН в научных мероприятиях

1.7 Популяризация науки

СМИ

В 2025 г. сотрудники ГЦ РАН также вели активную работу в сфере популяризации и широкого распространения научного знания в СМИ (рис. 1.11).

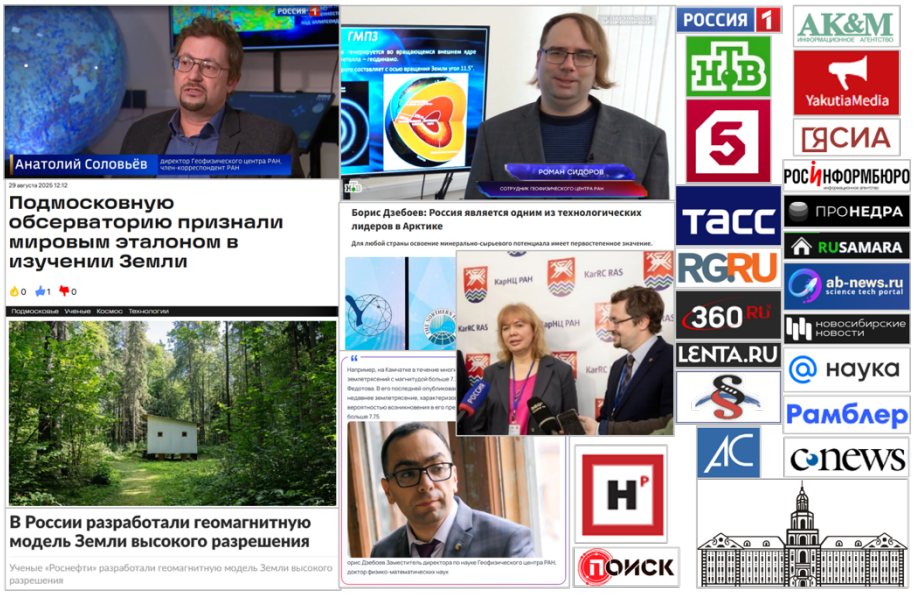


Рисунок 1.11 – Освещение деятельности ГЦ РАН в СМИ

V Конгресс молодых ученых

Сотрудники ГЦ РАН Г. С. Бояршинов и Д. Д. Вейс приняли участие в работе V Конгресса молодых ученых (26–28 ноября, Федеральная территория «Сириус»). На выставке в рамках Конгресса была представлена интерактивная демонстрационная платформа ORBUS-PRO, разработанная ГЦ РАН. ORBUS-PRO стала частью экспозиции «Мы создаем движение» Министерства транспорта России благодаря научному партнерству ГЦ РАН и РУТ (МИИТ) (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Представление платформы ORBUS-PRO на V Конгрессе молодых ученых

1.8 Награды и премии

В 2025 г. сотрудники ГЦ РАН были удостоены престижных ведомственных наград (рис. 1.13).

А. Д. Гвишиани, академик РАН – Медаль «За труды воздаяние» к 260-летию Вольного экономического общества России;

Б. А. Дзебоев, д.ф.-м.н. – Медаль «За безупречный труд и отличие» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации;

В. П. Дасаева – Благодарность Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.







Рисунок 1.13 – Вручение наград сотрудникам ГЦ РАН:
академик РАН А. Д. Гвишиани, д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев, В. П. Дасаева

2 Разработка методов системного анализа пространственных данных, моделирования и деформационного мониторинга с использованием ГНСС для оценки устойчивости геологической среды и предупреждения природно-техногенных катастроф

Шифр темы: FMWG-2025-0005
Регистрационный №:125062507522-9
Руководитель: чл.-корр. РАН, зав. лаб. д.т.н. В. Н. Татаринов
Ответственные исполнители: проф., д.т.н. В. Н. Морозов,
д.т.н. В. И. Кафтан, к.т.н. Д. Ж. Акматов, к.т.н. Р. В. Шевчук, н.с. А. И. Маневич

2.1 Сбор, анализ, систематизация и обобщение результатов ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры в регионах высокой сейсмической и вулканической активности и в районах размещения техногенных объектов

Регион Эгейского моря проявляет высокую сейсмическую активность. За последние 15 лет там произошло 12 сильных землетрясений M 6–7. Наиболее разрушительным было землетрясение Самос (землетрясение Эгейского моря) с магнитудой M_w = 7,0, произошедшее на глубине 16,1 км 30 октября 2020 г. Для изучения пространственно-временной эволюции движений земной коры в данном регионе были созданы кинематические визуализации, синоптический анализ которых позволил изучить особенности сейсмодеформационных процессов. Материалом для исследования послужили временные ряды координат пунктов ГНСС-наблюдений из сервиса Геодезической лаборатории Невады, Рено, США (http://geodesy.unr.edu/index.php). Интервал наблюдений составил 12 лет (2011–2023 гг.). Конфигурация сформированной сети из 25 ГНСС станций представлена на рис. 2.1.

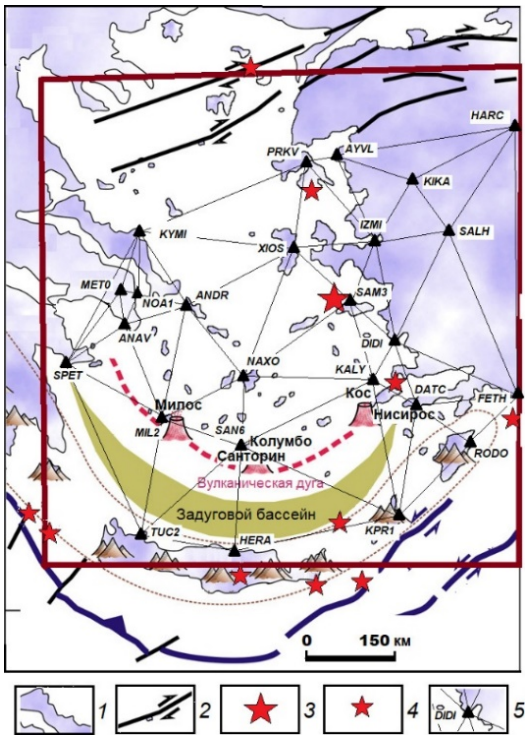


Рисунок 2.1 – Схема сети ГНСС с главными элементами тектоники, вулканизма и сейсмической активности. 1 – суша; 2 – главные разломы; 3 – землетрясение M=7; 4 – землетрясения 6<M<7; 5 – ГНСС- пункты

Исследование позволило обнаружить следующие закономерности движений:

– с начала интервала исследований движения возникли в районе о. Санторин в виде горизонтальных и вертикальных смещений ГНСС-пунктов, распространяясь затем на внутреннюю акваторию Эгейского моря;

– сильнейшие землетрясения произошли в областях минимума параметра, называемого «дефицит внутренних смещений». Это подтверждает гипотезу, изложенную в предыдущих работах, о том, что дефицит внутренних движений связан с местами будущих сильных землетрясений;

– азимуты векторов горизонтальных внутренних смещений станций ГНСС показали наличие границы между Анатолийской и Эгейской плитами. Средняя скорость взаимных левосторонних перемещений двух плит получена в пределах 15 мм/год;

– пространственно-временное распространение деформации полного сдвига взяло начало от района о. Санторин и распространялось в направлениях мест будущих землетрясений;

– синоптический анализ деформации дилатации (рис. 2.2) показал, что аномальные области растяжения образовались на севере и западе исследуемого региона. По мере их развития в 2017 г. в этих областях произо-

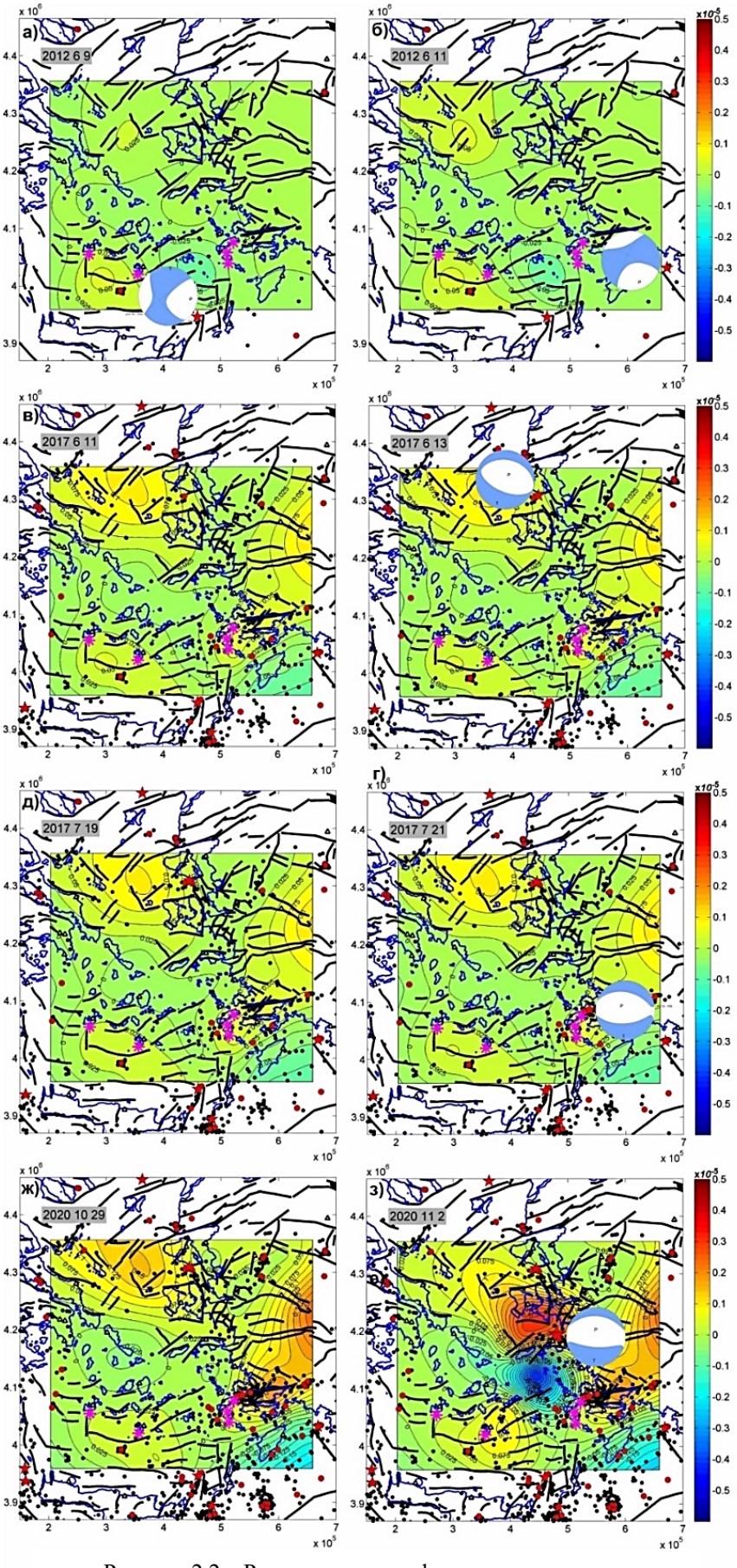


Рисунок 2.2 – Распределение деформации дилатации

шли два сильных землетрясения. С меньшей интенсивностью растяжение начало развиваться в области о. Санторин, где на десятилетие позже произошел плотный рой землетрясений.

Перед роем землетрясений в начале 2025 г. между островами Санторин и Аморгос за 12 лет до события начала развиваться сдвиговая деформация, предположительно вызванная сильным землетрясение с $M = 6$ и глубиной 60 км (рис. 2.3).

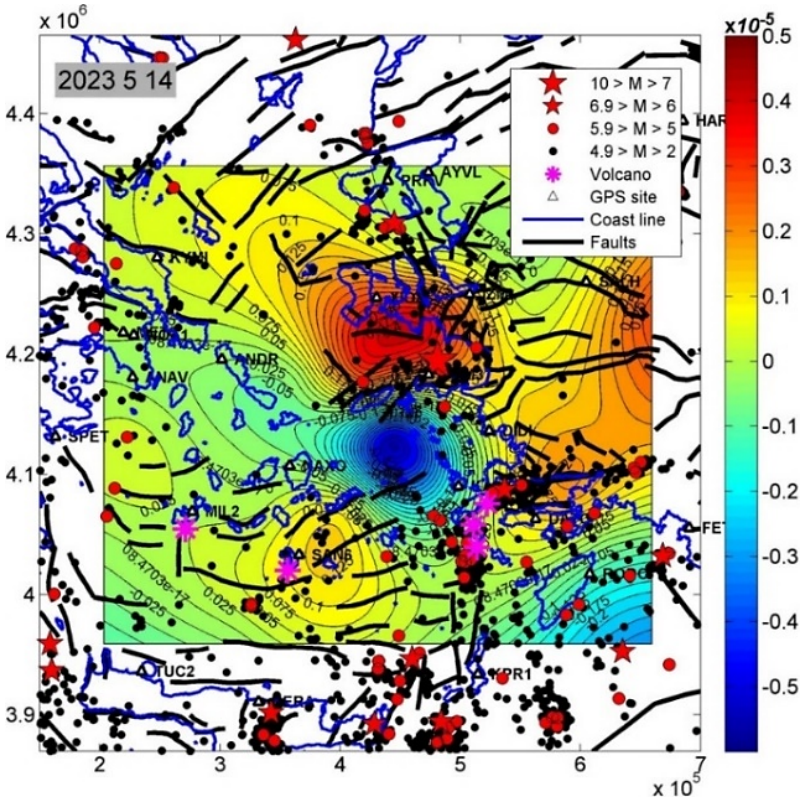


Рисунок 2.3 – Накопление деформации дилатации и эпицентры землетрясений за период 13 октября 2011 и 14 мая 2023 года

Землетрясение приурочено к Эллинской зоне субдукции. Одновременно из этого места начала развиваться аномалия подъема земной коры. За 2 года до роя сейсмических событий в данном месте образовалась круговая аномалия растяжения, характерная для внедрения магматического подкорового материала в верхние слои земной коры, что сопровождалось, со временем затухающим, роем землетрясений. Такая динамика свидетельствует в пользу предположения, что не совершившийся выход магмы на земную поверхность был спровоцирован оживлением разломов за счет сильного землетрясения.

В 2025 г. также были проведены исследования в связи с уникальным Камчатским мега-землетрясением. Синоптическая анимация (рис. 2.4) демонстрирует поведение региональной сейсмичности и дефицита внутренних движений земной коры, оценка которого осуществлена по непрерывным ГНСС-наблюдениям на протяжении более 5 лет с суточным временным разрешением. Характеристика дефицита внутренних движений представляет собой модуль вектора горизонтальных смещений ГНСС-станций во внутренней системе отсчета, не связанной с условно неподвижными пунктами на территориях той или иной тектонической плиты. При получении анимации использованы временные ряды координат ГНСС-станций полученные по результатам обработки Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, а также окружающих станций северо-запада Тихоокеанско-Азиатского региона, представленные в архиве данных Геодезической лаборатории Невады (США, Рено).

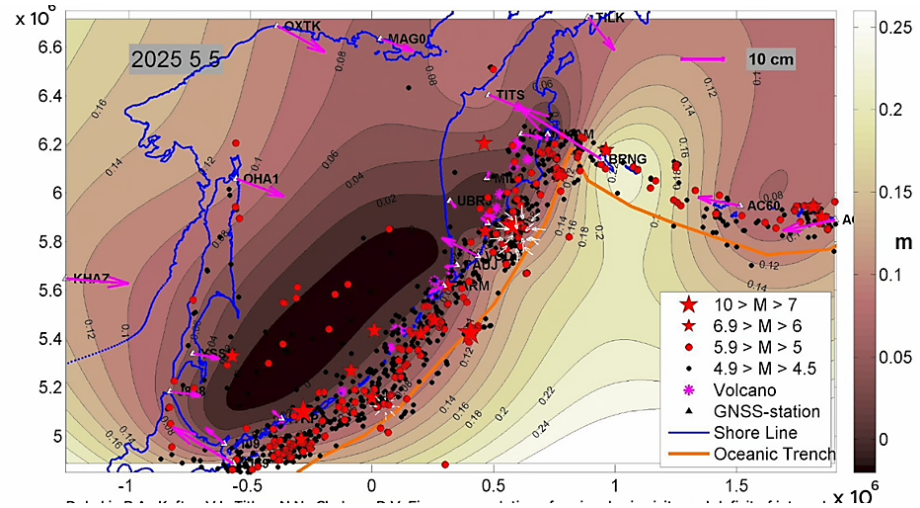


Рисунок 2.4 – Кадр синоптической анимации эволюция региональной сейсмичности и дефицита внутренних смещений земной коры по данным ГНСС в связи с Камчатским мега-землетрясением 2025 г.

Наблюдая за поведением сейсмичности и дефицита смещений (тёмно-коричневые области) можно отметить следующие закономерности (рис. 2.4). За 9 дней и за полтора месяца перед землетрясением вблизи его эпицентра произошло как минимум два сильных события с M≥7. Перед землетрясением Тохоку вблизи эпицентральной зоны примерно за двое суток произошло также событие с M_w 7,3 и серия толчков M_w 6. Вдоль своей оси зона дефицита движений маркируется умеренными землетрясениями. Камчатское мега-землетрясение 2025 г. и его сильные форшоки последовательно разрушают общую зону дефицита движений по направлению на юго-запад вплоть до островов Японского архипелага. При этом вызывает беспокойство территория п-ова Камчатки, северо-западнее эпицентральной зоны мега-землетрясения, получившая наименьшие разрушения. Минимальная величина модуля смещений ~ 0,2 м, тогда как сильнейшие события произошли в области накопленных смещений ~ 0,08 м.

2.2 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений для развития методологии оценки сейсмической опасности территорий и районов расположения техногенных объектов

Для моделирования НДС эпицентральных сильных континентальных землетрясений с M>6 (табл. 2.1) была использована геолого-геофизическая информация о тектонике, сейсмологические данные, данные космической геодезии, позволяющие построить модель сейсмогенерирующего слоя эпицентральной зоны и задать граничные условия ориентации главных тектонических напряжений [*Морозов и др.,* 2025].

Таблица 2.1 – Сопоставление длины разрыва с протяженностью зоны критической интенсивности напряжений σ_i

№	Землетрясение	Дата	Магнитуда	Глубина гипоцентра, км	Длина разрыва, км*		
					Lf1	Lf2	Lf3
1	Землетрясение Декси (Китай)	25 августа 1933 г.	Mw 7,3	15	83	84 / 66 / 74	80
2	Тангшаньское землетрясение (Китай)	27 июля 1976 г.	Ms 7,8	23	138	139 / 145 / 121	>100
3	Эрзиканское землетрясение (Турция)	13 марта 1992 г.	Mw 6,7	10	46	45 / 25 / 41	47

№	Землетрясение	Дата	Магнитуда	Глубина гипоцентра, км	Длина разрыва, км*		
					Lf1	Lf2	Lf3
4	Гуджаратское землетрясение (Индия)	26 января 2001 г.	Mw 6,9	16	49	56 / 35 / 50	45
5	Чангурское землетрясение (Иран)	22 июня 2002 г.	Mw 6,4	10	34	34 / 16 / 30	40
6	Бамское землетрясение (Иран)	26 декабря 2003 г.	Mw 6,6	10	41	41 / 22 / 37	42,5
7	Землетрясение Напа (США)	24 августа 2014 г.	Mw 6,0	11	22	22 / 8 / 20	16

* L_{f1} – по инструментальным данным;

L_{f2} – по эмпирической зависимости, через слеш: [*Ризниченко, 1976*; *Wells and Coppersmith,* 1994; *Завьялов и Зотов,* 2021];

L_{f3} – по данным моделирования НДС эпицентральной зоны землетрясения (протяженность зоны интенсивности напряжений σ_i = 30 МПа, при æ= σ_H/σ_h>3)

На рис. 2.5 показана схема локализации эпицентров афтершоков. Зона высокой интенсивности напряжений, достигающая 60–70 МПа в центральной части, вытянута в субмеридиональном направлении в пределах изобары >30 МПа, протяженность ~ 47 км (линия АВ на рис. 2.5(1)). Видно соответствие плотности эпицентров афтершоков и зоны высокой интенсивности напряжений, предшествующей землетрясению. Сопоставление разрывов этих землетрясений с областью локализации афтершоков дает основание полагать, что разрывы находятся внутри аномально высокой интенсивности напряжений.

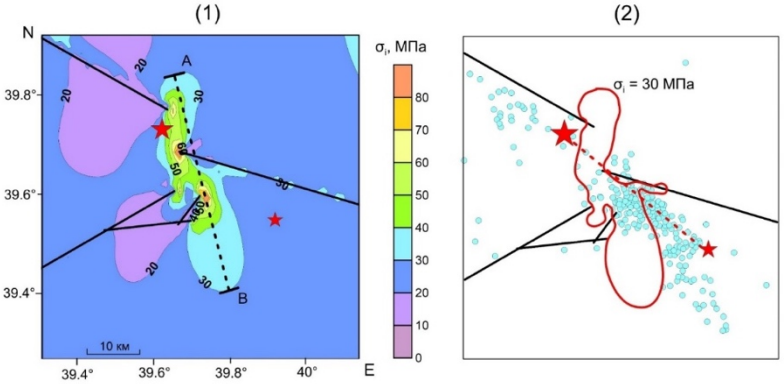


Рисунок 2.5 – Карта интенсивности напряжений и афтершоков в эпицентральной зоне Эрзиканского землетрясения 13.03.1992 г. в Турции Mw 6,7. 1 – интенсивность напряжений σi; 2 – афтершоки

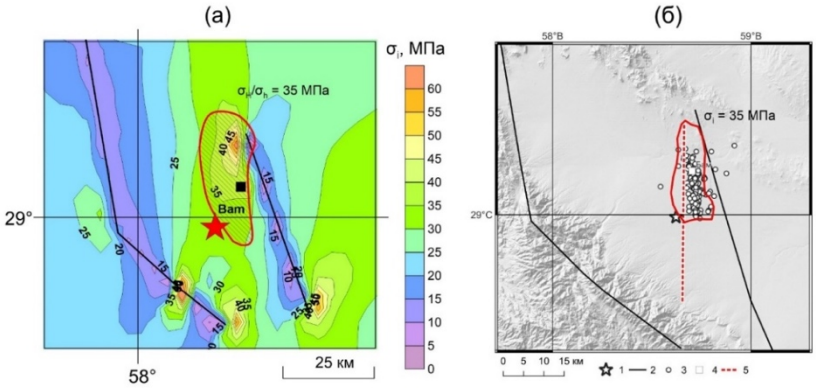


Рисунок 2.6 – Карта интенсивности напряжений и афтершоков землетрясения в районе г. Бам 26.12.2003 г. в Иране с Mw 6,6. а – интенсивность напряжений σi (заштрихована область æ= σH/σh>3); б – структурно-тектоническая схема и эпицентры. 1 – эпицентр землетрясения; 2 – разломы; 3 – афтершоки

Эмпирические закономерности между протяженностью разрыва и магнитудой землетрясения имеют вид:

- $\log_{10}$ L=0,44M – 1,29 [*Ризниченко,* 1976];
- $\log_{10}$ L=0,69M – 3,22 [*Wells and Coppersmith,* 1994];
- $\log_{10}$ L=0,43M – 1,27 [*Завьялов и Зотов,* 2021].

Для ряда сильных континентальных землетрясений с M>6 в табл. 2.1 приведены значения больших осей зон интенсивности напряжений в пределах площади изобары ~30 МПа в сопоставлении с протяженностью разрывов, вычисленных по формулам эмпирических зависимостей.

Статический сейсмический момент можно представить в виде совокупности сейсмических моментов ячеек:

$$M_o \approx 0{,}41 \sum_{i=1}^{n} \Delta\bar{\tau}_{\text{р}} \times S^{3/2}, \quad (1)$$

где $\Delta\bar{\tau}_{\text{р}}$ – среднее сброшенное напряжение сдвига в ячейке, Па; S_i – площадь ячейки, совокупность которых равна общей площади образовавшегося разрыва, м^2.

Детальные сейсмологические исследования после землетрясения в районе г. Бам установлено неравномерное распределение плотности афтершоков по глубине (рис. 2.7). Если предположить, что максимальной плотности афтершоков соответствуют области максимальных сброшенных напряжений, то их можно представить в виде

$$\Delta\tau_{\text{р}}(h) = \Delta\tau_{\text{р}} \times e^{-\frac{(h-h_0)^2}{2b^2}} = \Delta\tau_{\text{р}} \times e^{-\frac{(h-10)^2}{18}}, \quad (2)$$

где h – глубина гипоцентров афтершоков, км; h_0=10 км; b =3 км.

На рисунке 2.7б представлен разрез сброшенных напряжений сдвига в плоскости разрыва. При средней величине $\Delta\bar{\tau}_{\text{р}}$ = 2,17 МПа и параметрах сейсмогенерирующего слоя 42,5×15 км, расчетная величина сейсмического момента составляет 1,43×10^{19} Н×м. Это соответствует предположению что σ_H постоянно по глубине сейсмогенерирующего слоя. Временная функция сейсмического момента имеет 2 экстремума на графике, соответствующие интервалам максимальной энергии сейсмических волн, времени пересечению разрывом зон высоких напряжений сдвига. Вычислить сейсмический момент на основе модели можно путем интегрирования функции.

Тогда появляется возможность на стадии ретроспективного прогноза построить прогнозную карту изосейст и получить синтетические сейсмограммы и акселелограммы землетрясения. На рис. 2.8 приведена карта зарегистрированных и вычисленных изосейст исходя из результатов моделирования НДС в единицах шкалы балльности MSK-64. Изосейсты были получены из уравнения макросейсмического поля Блейка-Шебалина

$$I_i = a \times M - b \times \log_{10}\sqrt{r^2 + H^2} + c, \quad (3)$$

где I_i – интенсивность сейсмического воздействия в точке, находящейся на расстоянии r от эпицентра землетрясения; M – магнитуда землетрясения; r – расстояние от эпицентра, км; H – глубина очага, км; a, b, c – коэффициенты затухания, подбираемые эмпирически (общемировые значения: $a = 1{,}5, b = 3{,}5, c = 3$).

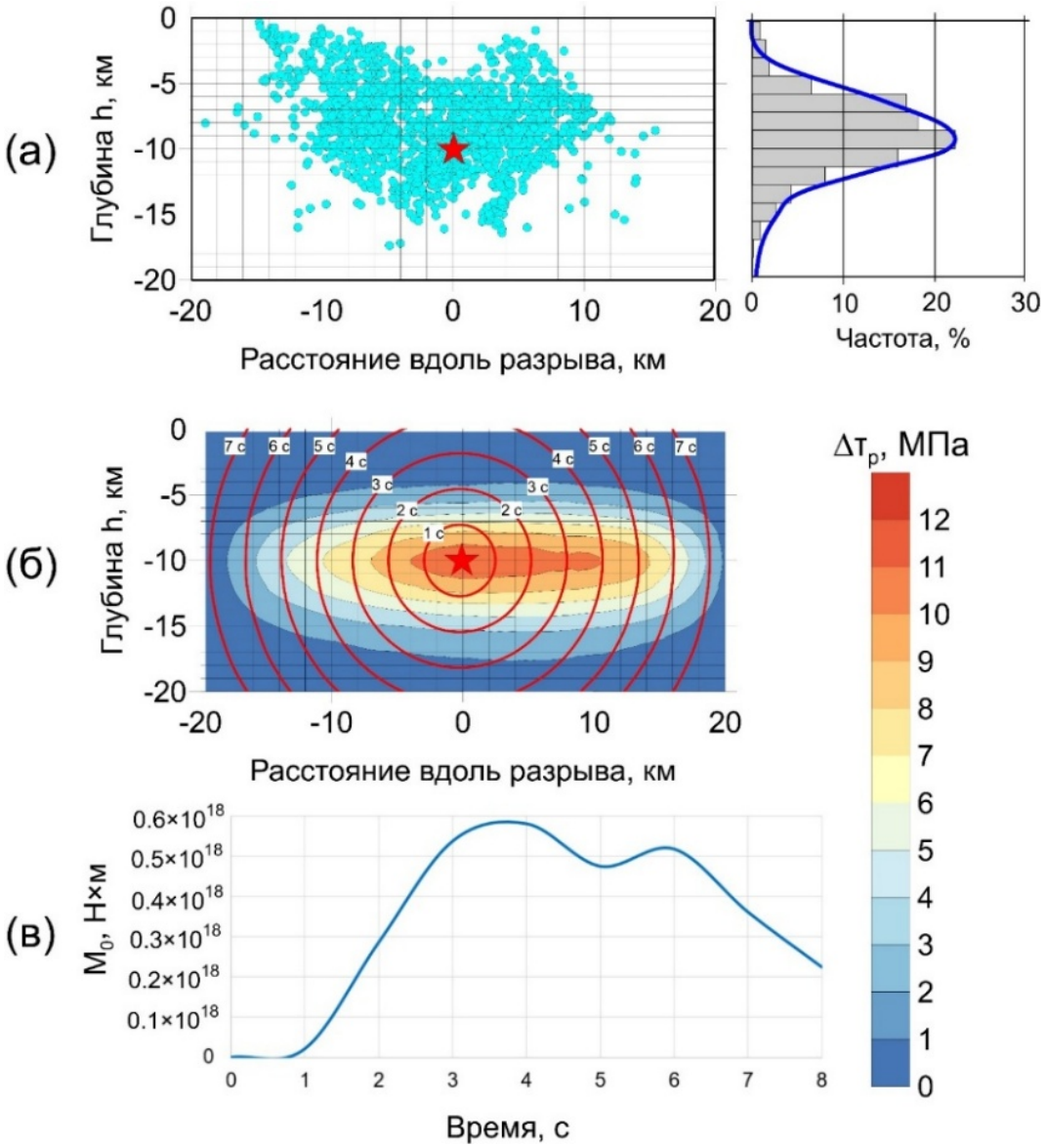


Рисунок 2.7 – Результаты моделирования сейсмического момента. а – распределение афтершоков по глубине вдоль разрыва; б – сброшенные напряжения $\Delta\bar{\tau}_p$, модель ячеек 2×2 км и распространение разрыва со скоростью 2,8 км/с; в – функция временного сейсмического момента Mo(t) по результатам моделирования

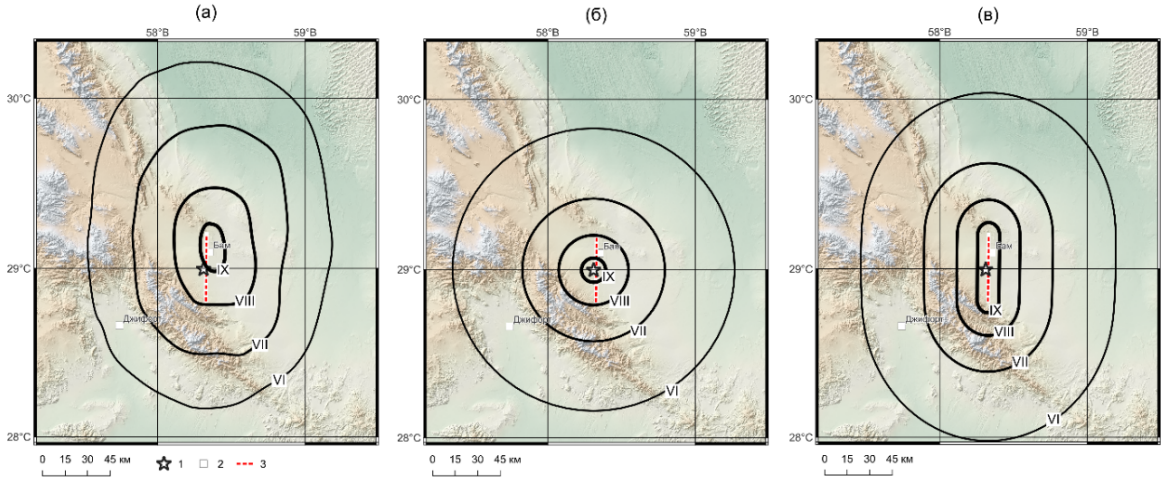


Рисунок 2.8 – Карты изосейст землетрясения Бам. а) – изосейсты; б) – изосейсты точечного источника на основе моделирования; в) – изосейсты протяженного источника на основе моделирования

2.3 Разработка методики геомеханических исследований для предупреждения природно-техногенных катастроф объектов использования атомной энергии (на примере ПИЛ в Красноярском крае)

В 2025 г. проводились исследования по разработке методики геомеханических исследований, позволяющей выявлять зоны потенциальной неустойчивости на площадке строительства ПИЛ в Красноярском крае. Достоверная оценка устойчивости породного массива имеет решающее значение, при выборе технологии проведения выработок и систем крепления. На практике для этих целей широко применяются эмпирические классификационные подходы, в частности Q-система Н. Бартона и система RMR, позволяющие оценивать качество массива. Они были доработаны в приложении к Нижнеканскому массиву.

В разработанной методике процедура классификации включает два этапа:

1. Выявление и исключение разломов, оказывающих негативное воздействие на потенциальную площадку, а также минимизация влияния прочих зон разрывных нарушений;
2. Определение комплексного индекса пригодности вмещающих пород для длительной изоляции РАО с учётом теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемости массива.

Были также выполнены исследования трещиноватости на обнажениях и в скважинах. В итоге на основе статистического анализа были выделены три основных типа систем трещин, классифицированных по углу отношения к оси скважины: крутопадающие трещины с углом от 0° до 30°, трещины среднего падения с углом от 30° до 60°, и доминирующий тип – пологозалегающие трещины с углом от 60° до 90°.

Рейтинговая классификация массива при строительстве ПИЛ выполнялась на основе расчёта трёхмерного распределения индекса Q^R по формуле (4). В её состав включены восемь параметров: тепловой эффект (C_T^R), химический состав подземных вод (C_{chm}^R), гидравлическая проводимость ($J_{w,}^R$), соотношение прочностных характеристик пород и напряжений (SRF^R), индекс качества горных пород (RQD), показатель количества систем трещин (J_n), показатель шероховатости поверхностей трещин (J_r) и показатель степени выветрелости трещин (J_r). Указанные параметры определяют долговременное сохранение естественных изоляционных свойств массива, в котором планируется захоронение РАО

$$Q^R = C_{chm}^R \times C_T^R \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w^R}{SRF^R}. \quad (4)$$

В пределах этих зон упругие и прочностные свойства уменьшались по отношению к средним значениям. Из-за отсутствия данных о показателе RQD в скважинах (кернах), показатель RQD был определен расчетом количества трещин на единицу объема по формуле, позволяющей преобразовать Jv в RQD

$$RQD = 115 - 3{,}3Jv, \quad (5)$$

где Jv – количество трещин на 1 метр кубический.

Показатель Jv определяется следующим образом

$$Jv = \sum_{i=1}^{J} \left(\frac{1}{Si}\right), \quad (6)$$

где Si – среднее расстояние между трещинами в метрах для каждой системы трещин; J – количество систем трещин.

На рис. 2.9 представлены графики распределения *RQD* на глубине до 600 м.

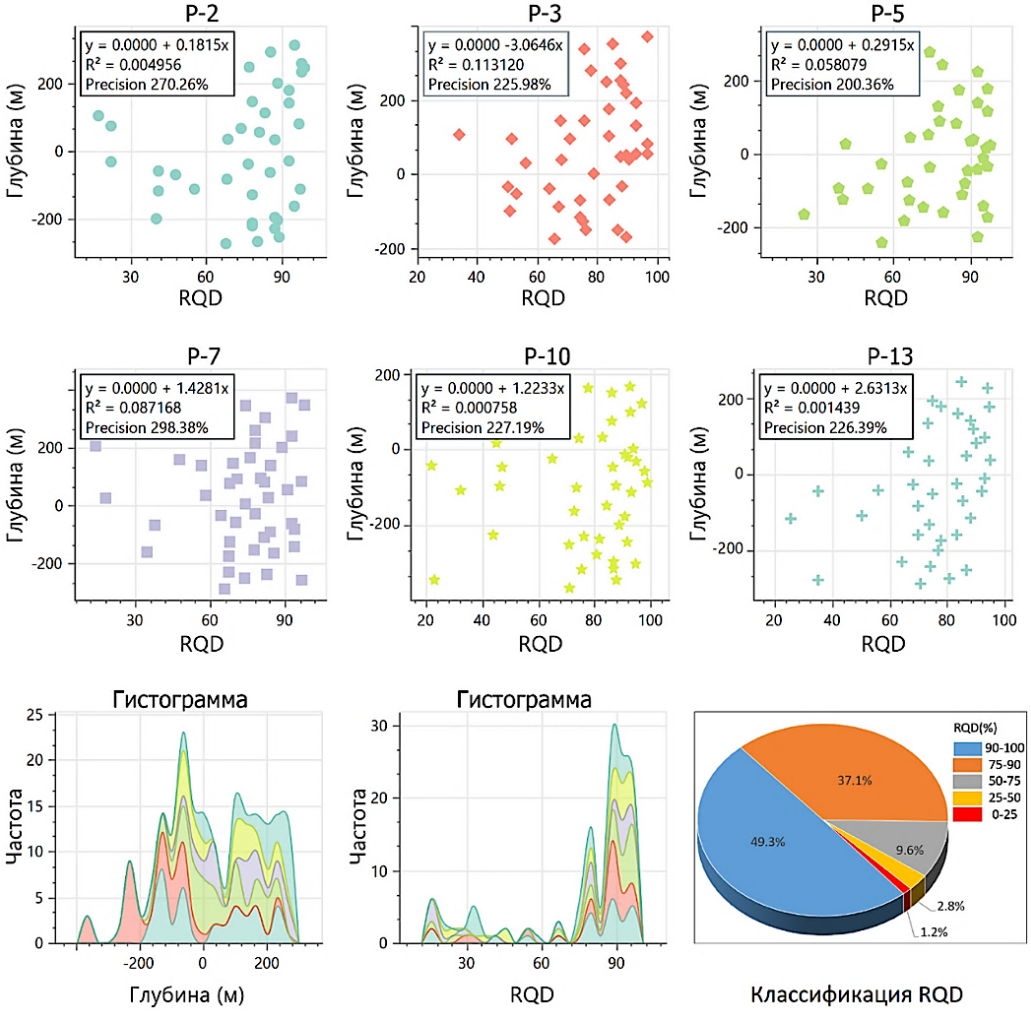


Рисунок 2.9 – Распределение RQD на участке Енисейский в зависимости от глубины

В ходе анализа физико-механических свойств горных пород определены показатели прочности для разломных и блоковых зон Нижнеканского массива (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Показатели прочности горных пород

Параметры	В зоне влияния разлома	Внутри блоков
GSI (геологический индекс прочности)	35	80
Предел прочности на одноосное сжатие	15 МПа	46 МПа
Модуль деформации (Юнга)	4,217 ГПа	56 ГПа
Сцепление	4,6 МПа	11 МПа
Угол внутреннего трения	26 град	39 град

Заключительной частью методики является построение трёхмерной блочной геомеханической модели НДС в программном комплексе *Micromine* с последующим многопараметрическим анализом НДС разломно-блочной геосреды на основе энергетического подхода. На рис. 2.10 приведены иллюстрации этого анализа.

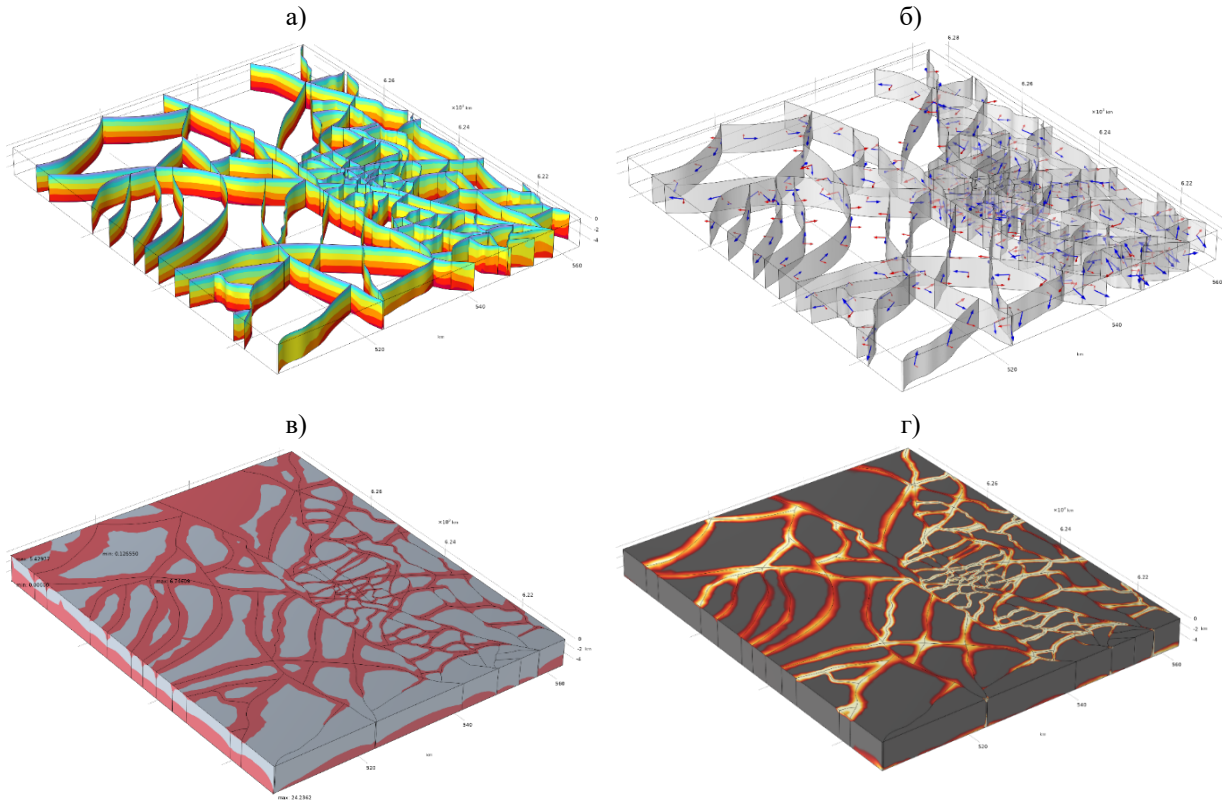


Рисунок 2.10 – Многопараметрический анализ НДС на основе энергетического подхода: а) функция разрушения Кулона; б) кулоновские напряжения; в) энергонасыщенность среды; г) градиент потенциальной энергии

Пространственный анализ модели позволяет количественно оценить степень влияния разломно-блочной структуры на прочностные и деформационные свойства массива и создать основу для оптимизации проектных решений при размещении выработок, планировании инженерных защитных мероприятий и прогнозировании долгосрочного поведения горных пород в условиях эксплуатации объектов глубинного захоронения РАО.

2.4 Разработка геоинформационных методов системного анализа геопространственных данных для оценки устойчивости геологической среды (на примере отработки месторождений калийно-магниевых солей)

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМС) входит в число самых крупных месторождений солей мира. Разведанная толща калийно-магниевых солей имеет размеры 135 на 40 км. Основная проблема при подземной разработке месторождений соли – сохранение целостности пачки пород, находящейся между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и подошвой водоносного горизонта, которая называется водозащитная толща (ВЗТ). Цель начатых в 2025 г. исследований – разработка методики анализа данных ВКМС на основе нейросетевого подхода и дискретного математического анализа, разработанного в ГЦ РАН для прогноза состояния ВЗТ. В качестве исходных данных для моделирования, из 257 полей атрибутов были отобраны 22 атрибута, отвечающие наибольшему заполнению таблицы данных, и которые являются наиболее обобщающими признаками. Используемые признаки включают в себя группы природных аномалий, горно-технологические параметры и данные инструментальных наблюдений. В результате была сформирована таблица из 1615 строк данных. В качестве признака опасности в настоящих тестовых расчетах принимались значения оседаний земной поверхности. Для набора данных

были определены интервалы силы корреляционной связи: слабая связь в интервале 0,049–0,366; средняя связь в интервале 0,366–0,683; сильная связь в интервале 0,683–1.

На рис. 2.11 приведена рассчитанная корреляционная матрица для 22 динамических показателей, а на рис. 2.12 приведена мера геодинамической безопасности. Классические критерии оценки устойчивости геологической среды, основанные на значениях абсолютных оседаний земной поверхности, их наклонов и кривизны, являются нормативными и широко известными в инженерной практике. Однако они не учитывают накопительные и нелинейные геодинамические эффекты, связанные с продолжительностью воздействия, геомеханической эволюцией массива и изменением физических свойств пород во времени. Для повышения информативности предложено ввести интегральный показатель риска (ИПР), рассчитываемый по формуле:

$$\text{ИПР} = \alpha_1 \frac{S}{S_{\text{кр}}} + \alpha_2 \frac{T}{T_{\text{кр}}} + \alpha_3 \frac{K}{K_{\text{кр}}} + \alpha_4 D(t), \qquad (7)$$

где: S – величина оседания; $S_{кр}$ – критическая величина оседания; T – наклон земной поверхности; $T_{кр}$ – критическая величина наклона; K – кривизна земной поверхности; $K_{кр}$ – критическая величина кривизны; $D(t)$ – индекс накопленной повреждённости; α_1 – α_4 – весовые коэффициенты.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1.00	0.01	0.02	-0.04	0.01	0.00	-0.10	-0.20	-0.06	-0.21	0.26	0.02	0.00	0.05	0.04	-0.03	-0.06	-0.03	-0.05	-0.08	-0.05	-0.09
2	0.01	1.00	0.98	0.71	0.40	-0.15	0.00	0.09	-0.09	-0.08	0.27	-0.12	-0.10	-0.06	-0.02	0.08	0.05	-0.11	0.01	0.00	0.02	-0.01
3	0.02	0.98	1.00	0.71	0.40	-0.18	-0.01	0.05	-0.11	-0.11	0.29	-0.10	-0.09	-0.06	-0.03	0.08	0.03	-0.11	0.00	-0.04	-0.03	-0.06
4	-0.04	0.71	0.71	1.00	0.56	-0.22	-0.01	0.14	-0.14	-0.11	0.31	-0.13	-0.10	-0.09	-0.05	0.12	0.09	-0.10	0.01	0.07	0.08	0.06
5	0.01	0.40	0.40	0.56	1.00	-0.32	-0.26	0.18	-0.37	-0.24	0.45	-0.22	-0.19	-0.18	-0.09	0.17	0.15	-0.16	0.05	0.10	0.10	0.10
6	0.00	-0.15	-0.18	-0.22	-0.32	1.00	0.26	0.18	0.78	0.43	-0.60	0.17	0.15	0.11	0.07	-0.10	-0.07	0.10	0.04	0.27	0.25	0.30
7	-0.10	0.00	-0.01	-0.01	-0.26	0.26	1.00	-0.06	0.80	0.27	-0.40	0.05	0.03	-0.07	-0.08	-0.18	-0.07	0.10	0.06	0.26	0.24	0.30
8	-0.20	0.09	0.05	0.14	0.18	0.18	-0.06	1.00	0.07	0.32	-0.23	-0.15	-0.11	-0.13	-0.13	-0.07	0.02	-0.11	0.02	0.54	0.53	0.51
9	-0.06	-0.09	-0.11	-0.14	-0.37	0.78	0.80	0.07	1.00	0.43	-0.62	0.14	0.11	0.03	-0.01	-0.17	-0.09	0.13	0.06	0.34	0.30	0.37
10	-0.21	-0.08	-0.11	-0.11	-0.24	0.43	0.27	0.32	0.43	1.00	-0.47	0.06	0.05	-0.04	-0.04	-0.05	-0.03	0.02	-0.02	0.33	0.32	0.33
11	0.26	0.27	0.29	0.31	0.45	-0.60	-0.40	-0.23	-0.62	-0.47	1.00	-0.19	-0.16	-0.07	-0.02	0.14	0.08	-0.11	0.00	-0.25	-0.23	-0.27
12	0.02	-0.12	-0.10	-0.13	-0.22	0.17	0.05	-0.15	0.14	0.06	-0.19	1.00	0.86	0.65	0.45	0.07	-0.01	0.28	0.03	-0.21	-0.21	-0.20
13	0.00	-0.10	-0.09	-0.10	-0.19	0.15	0.03	-0.11	0.11	0.05	-0.16	0.86	1.00	0.57	0.49	0.22	0.14	0.34	0.15	-0.21	-0.23	-0.19
14	0.05	-0.06	-0.06	-0.09	-0.18	0.11	-0.07	-0.13	0.03	-0.04	-0.07	0.65	0.57	1.00	0.79	0.12	0.07	0.19	0.09	-0.29	-0.29	-0.29
15	0.04	-0.02	-0.03	-0.05	-0.09	0.07	-0.08	-0.13	-0.01	-0.04	-0.02	0.45	0.49	0.79	1.00	0.23	0.24	0.21	0.24	-0.31	-0.32	-0.29
16	-0.03	0.08	0.08	0.12	0.17	-0.10	-0.18	-0.07	-0.17	-0.05	0.14	0.07	0.22	0.12	0.23	1.00	0.39	0.33	0.19	-0.18	-0.17	-0.18
17	-0.06	0.05	0.03	0.09	0.15	-0.07	-0.07	0.02	-0.09	-0.03	0.08	-0.01	0.14	0.07	0.24	0.39	1.00	0.05	0.54	-0.08	-0.11	-0.05
18	-0.03	-0.11	-0.11	-0.10	-0.16	0.10	0.10	-0.11	0.13	0.02	-0.11	0.28	0.34	0.19	0.21	0.33	0.05	1.00	0.38	-0.13	-0.11	-0.11
19	-0.05	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04	0.06	0.02	0.06	-0.02	0.00	0.03	0.15	0.09	0.24	0.19	0.54	0.38	1.00	0.02	0.01	0.04
20	-0.08	0.00	-0.04	0.07	0.10	0.27	0.26	0.54	0.34	0.33	-0.25	-0.21	-0.21	-0.29	-0.31	-0.18	-0.08	-0.13	0.02	1.00	0.97	0.98
21	-0.05	0.02	-0.03	0.08	0.10	0.25	0.24	0.53	0.30	0.32	-0.23	-0.21	-0.23	-0.29	-0.32	-0.17	-0.11	-0.11	0.01	0.97	1.00	0.93
22	-0.09	-0.01	-0.06	0.06	0.10	0.30	0.30	0.51	0.37	0.33	-0.27	-0.20	-0.19	-0.29	-0.29	-0.18	-0.05	-0.11	0.04	0.98	0.93	1.00

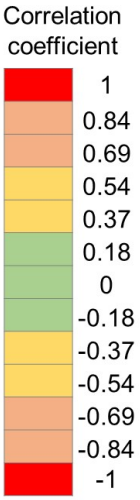


Рисунок 2.11 – Матрица корреляций таблицы данных

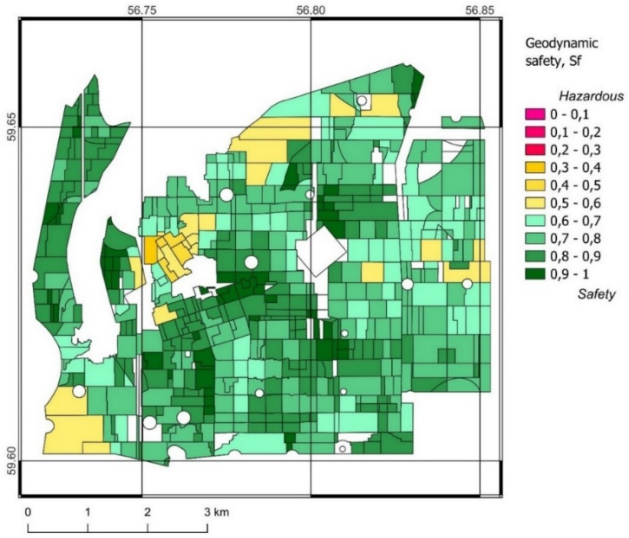


Рисунок 2.12 – Интегральная мера геодинамической безопасности

Индекс поврежденности D(t) учитывает величину оседаний в виде накопленного временного воздействия на массив, выраженную через скорость оседаний:

$$D(t) = 1 - e^{-\lambda \int_0^t v(t)dt}, \quad (8)$$

где: *v(t)* – скорость оседания; λ – эмпирический коэффициент устойчивости массива.

Для систематизации результатов прогноза предлагается использовать матрицу геодинамического риска (табл. 2.3). На рис. 2.13 представлен пример расчетов (параметры и эмпирические коэффициенты взяты условно).

Таблица 2.3 – Пример матрицы оценки риска

Вероятность превышения	Низкие последствия	Средние последствия	Высокие последствия	Критические последствия
≤ 5%	Низкий риск	Низкий риск	Средний риск	Средний риск
5–20%	Низкий риск	Средний риск	Средний риск	Высокий риск
20–50%	Средний риск	Средний риск	Высокий риск	Критический риск
>50%	Высокий риск	Высокий риск	Критический риск	Критический риск

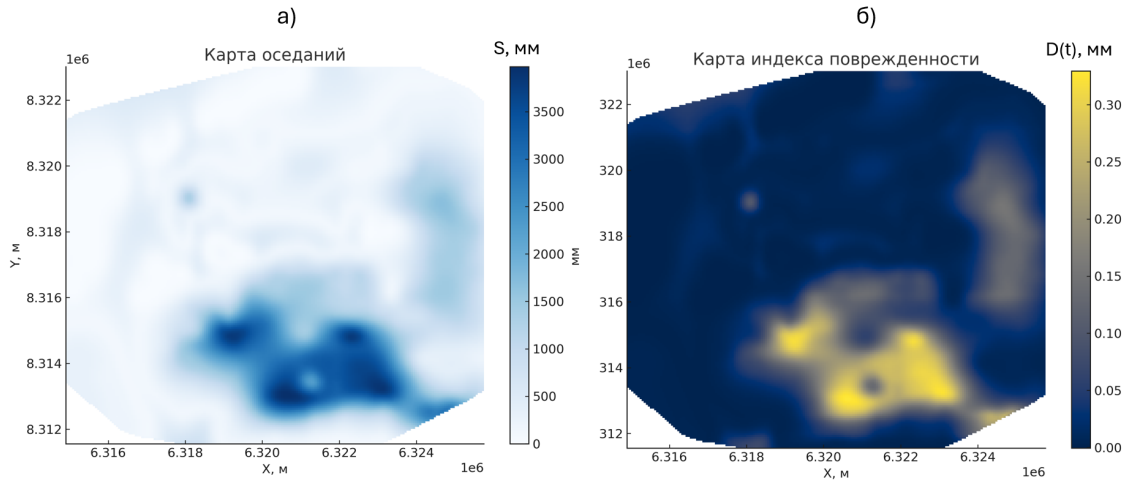


Рисунок 2.13 – Карты оседаний земной поверхности, полученной алгоритмом ANFIS3 (а) и индекса поврежденности D(t) (б)

Предложенные критерии позволяют перейти от простого картографирования оседаний к комплексной системе оценки риска. Это обеспечивает возможность ранжирования участков шахтных полей по степени потенциальной угрозы и формирования научно обоснованных рекомендаций по управлению горнотехническими рисками при разработке калийно-магниевых месторождений.

Список использованных источников

Завьялов А. Д., Зотов О. Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. с. 22–29. DOI: 10.31857/S0203030621010065.

Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука. 1976. с. 9–27.

Morozov V. N., Manevich A. I. Prediction of the location and intensity of strong continental earthquakes (based on mathematical modeling results) // Russian Journal of Earth Sciences. Vol. 25. DOI: 10.2205/2025ES001086.

Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. V. 84. No. 4. P. 975–1002.

3 Развитие методов системного анализа данных геофизических наблюдений для задач изучения характеристик электромагнитного поля земли и околоземного пространства

Шифр темы: FMWG-2025-0006
Регистрационный №: 125062507525-0
Руководитель: в.н.с., канд. физ.-мат. наук Р. В. Сидоров
Ответственный исполнитель: директор, чл.-корр. РАН. А. А. Соловьёв

3.1 Изучение динамики быстрых вариаций главного магнитного поля Земли

В рамках предыдущего исследования были построены огибающие векового ускорения (ВУ) главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) методом усреднения для магнитных обсерваторий, при этом средние значения ВУ для каждого месяца и каждой компоненты рассчитывались отдельно для положительных и отрицательных значений ВУ. Эта процедура даёт представление о глобальной динамике ВУ ГМПЗ за рассматриваемый период. Для справки приводим ниже на рис 3.1 результат предшествующей НИР для компоненты *X* ГМПЗ.



Рисунок 3.1 – Положительные (красные) и отрицательные (синие) огибающие выпрямленной записи ВУ для компоненты X (вверху) и их спектральная плотность мощности (внизу). 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

Для положительной и отрицательной огибающих ВУ для компоненты *X* (рис. 3.1, сверху) на спектрах их мощности (рис. 3.1, снизу) наиболее сильные пики приходятся на периоды 8,3 и 5,3 лет и для положительных, и для отрицательных огибающих. Для *Y* и *Z* наиболее выраженные периодические составляющие – 7,6 и 6,4 и 6,9 и 5,2 года, соответственно. Для подтверждения, что процедура усреднения не маскирует всплески ВУ, мы построили характеристические функции, как ранее в [*Soloviev et al.,* 2017]. Результат (рис. 3.2) очень близок к средним значениям на верхнем графике на рис. 3.1.

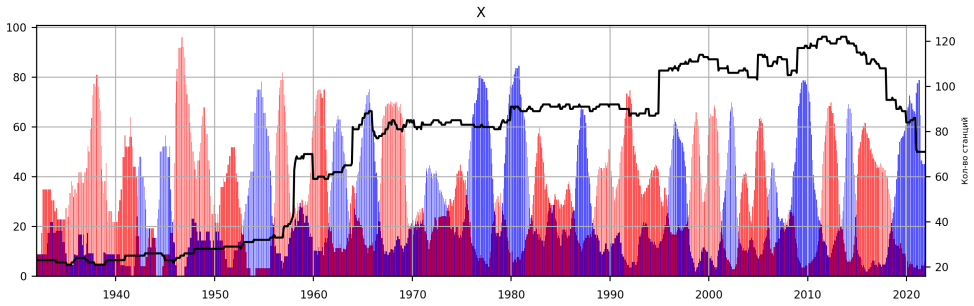


Рисунок 3.2 – Характеристическая функция ВУ для компоненты X ГМПЗ с пороговым значением 2 нТл/год². Синие и красные столбцы показывают ежемесячный процент обсерваторий, где ВУ < –2 нТл/год² и ВУ > 2 нТл/год², соответственно. Чёрная ломаная линия показывает общее количество доступных обсерваторий в месяц (правая вертикальная ось). Подробнее см. [*Soloviev et al.*, 2017]

На рис. 3.3 приведены спектры, рассчитанные на основе вышеописанных характеристических функций. Спектры вновь демонстрируют пики на временных отметках около 6 и 8 лет, подтверждая ранее полученный результат, в том числе существование не только 6-летней, но и 8-летней периодичности в динамике ВУ ГМПЗ.

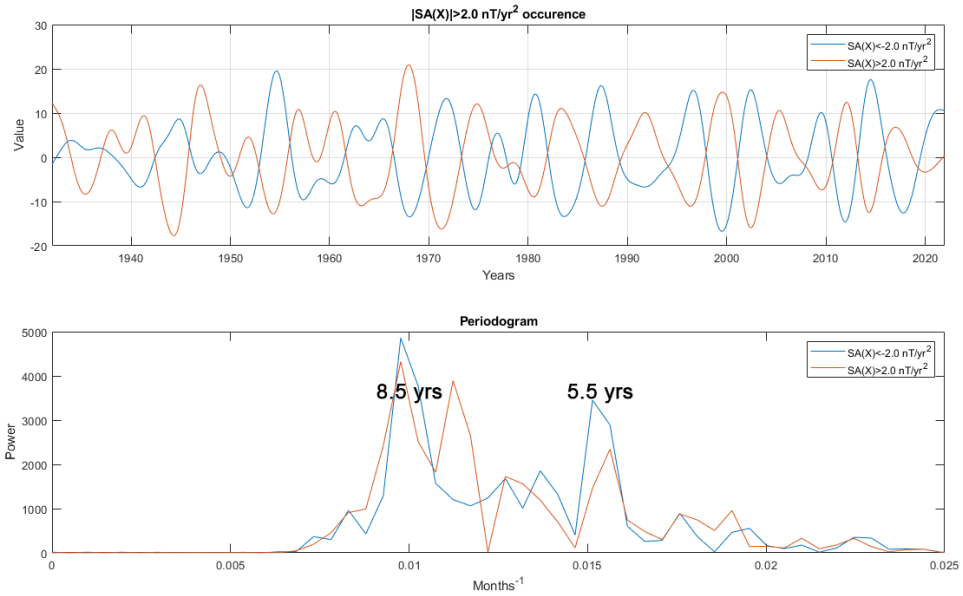


Рисунок 3.3 – Положительные (красные) и отрицательные (синие) огибающие ВУ на основе подхода характеристической функции для компоненты X ГМПЗ (вверху) и спектры их мощности (внизу)

Сравнение полученных огибающих ВУ с известными пиками глобальной энергии ВУ, предсказанными при помощи моделей CHAOS-6-x7 [*Kloss et al.,* 2019] (за 1999–2020 гг., т.е. за период существования модели CHAOS) и KALMAG [*Baerenzung et al.,* 2022] на границе ядро-мантия за 1932–2020 гг. показало, что пики огибающей ВУ компоненты *X* (рис. 3.5) коррелируют как с большими (1971, 1980, 1987–1989, 2012–2013 и 2016–2017), так и с менее значительными пиками энергии ВУ (1940, 1952 и 1967). Более слабые пики мощности ВУ (2002–2003 и 2012–2013) обнаруживаются нашим методом, но не обнаруживаются моделью CHAOS.

Причины 5–6-летней квазипериодичности широко обсуждаются. В [*Holme and de Viron,* 2013] указана связь между внутридекадными вариациями вращения Земли и геомагнитными джерками, обнаруженная при совпадении экстремумов 5,9-летних колебаний

длины суток и проявлений джерков, что подтверждает возможную причину джерков – экваториальные альвеновские волны на поверхности ядра. Также подтверждена связь обнаруженных импульсов с джерками и наличие 7–8-летней периодичности, кроме 5–6-летней. Осесимметричные экваториальные альвеновские волны на поверхности ядра обсуждаются как причина [*Duan and Huang,* 2020] изменчивости длины суток. Волновая природа процесса, обусловливающего быстрые вариации ГМПЗ, также обсуждается в работах [*Lesur et al.,* 2022; *Gillet et al.,* 2022]: в [*Gillet et al.,* 2022] сообщается о примерно 7-летнем периоде неосесимметричных магнито-кориолисовых волн. Наши результаты экспериментально подтверждают эти выводы. Предметом оживлённых дискуссий становится 6-летняя цикличность и в других природных процессах [*Pfeffer et al.,* 2023].

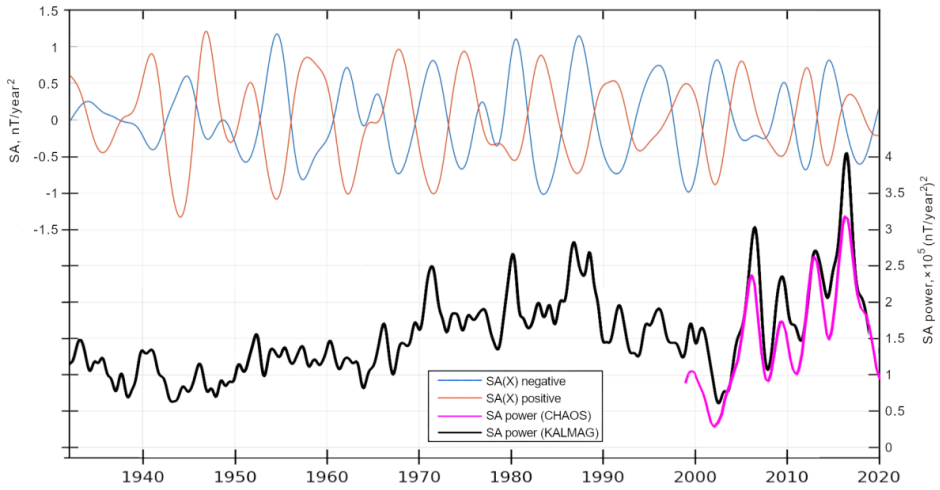


Рисунок 3.4 – Сравнение огибающих ВУ для компоненты X ГМПЗ и периодов усиления энергии ВУ, предсказанных моделями CHAOS-7.18 и KALMAG на границе ядро-мантия за 1999–2020 гг. для CHAOS (лиловая кривая) и за 1932–2020 гг. для KALMAG (черная кривая)

3.2 Исследование петрофизических свойств горных пород по итогам геофизических исследований в Юго-Восточной Фенноскандии (Северное Приладожье)

В 2025 г. в рамках совместных работ ГЦ РАН и ИФЗ РАН по изучению докембрийских отложений в Северном Приладожье были выполнены исследования петрофизических свойств горных пород этой территории.

Цель исследований обусловлена фундаментальной проблемой изучения эволюции докембрийских комплексов (это одна из основных проблем современной геологии). Юго-Восточная Фенноскандия – крупнейшая в России территория выхода пород фундамента на поверхность. Она представляет особый интерес для геолого-геофизических исследований с 1940-х годов и по настоящее время [*Baltybaev and Vidvich*, 2021; *Morozov et al.,* 2024; *Соколова и др.,* 2016]. На сегодняшний день, несмотря на длительную историю изучения востока Фенноскандинавского щита, петрофизические данные о горных породах Приладожья [*Голод и др.,* 1979; Гришин и д.р, 1990; *Петрофизические*, 1980]. достаточно ограничены.

Н. Б. Дортман [*Петрофизические*, 1980] выделяет по комплексу петрофизических параметров пять мегаблоков: Мурманский, Кольский, Беломорский, Карельский и Ладожский. Граница между юго-западной частью Карельского и Ладожского блоков проходит по территории Северного Приладожья. Другая, более детальная схема блокового строения

Южной Карелии по петрофизическим параметрам и характеру геофизических полей [*Колесник,* 1985] предполагает наличие сводовых поднятий поверхности Мохоровичича до 30–35 км в пределах Ладожского и Онежского мегаблоков, что предполагает дальнейшее разделение последнего на более мелкие, погруженные или опущенные блоки. (Салминский, Выборгский, Ладожский, Суоярвинский)

Кластерный корреляционный анализ аномальных компонент потенциальных полей по картам масштаба 1:1 000 000 в системе ГИС Интегро, результаты которого приведены на карте на рис. 3.5, позволил выделить 4 характерных кластера: 1) области слабых отрицательных гравитационных аномалий и сильных магнитных, созданных породами архейских тоналитовых комплексов, интенсивно переработанных в протерозое; Биотитовые гнейсы, калевийские кристаллические сланцы; 2) положительные гравитационные аномалии и слабоотрицательные магнитные: источником являются габбро-диориты и среднепротерозойские (калевийские) калиево-гранитные комплексы серии, а также людиковийские вулканогенно-осадочные породы; 3) сильные магнитные аномалии на фоне нулевого гравитационного эффекта на калевийских гранитах и гранулитах и метаморфизованных кварцитах более раннего возраста; 4) слабые отрицательные магнитные и гравитационные эффекты в архейских гранитах и плагиогранитах, а также в различных породах калевийского возраста: гранодиоритах, монцодиоритах, габбро и др.

Анализ литературных данных о физических свойствах горных пород Приладожья позволил составить сводные рабочие таблицы физических свойств горных пород Юго-восточной Фенноскандии. Имеющиеся данные позволили составить достаточно полную таблицу характерных значений петрофизических свойств для всех стратиграфических подразделений. Эти данные помогут не только более точно решать обратные задачи и строить стартовые модели. Благодаря имеющимся петромагнитным и петроплотностным картам, а также моделям блокового строения, становится возможным более точное разделение структур при геологической интерпретации полученных геофизических моделей. По итогам комплекса геофизических работ будет построена геолого-геофизическая модель данной территории.

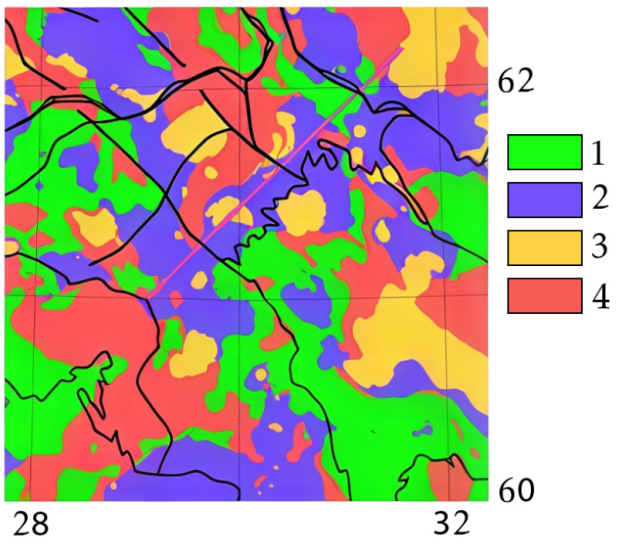


Рисунок 3.5 – Кластерный анализ аномальных магнитных и гравитационных полей в масштабе 1:1 000 000. Границы Ладожского озера, тектонических и геологических комплексов построены по данным [*Mints et al.*, 2020]

3.3 Новые алгоритмы для изучения аномалий в геофизических данных на основе дискретного математического анализа

Работа в направлении развития и практического применения ДМА [*Agayan et al.*, 2021; 2022; 2023; 2024] в 2025 была посвящена двум алгоритмам, способствующим улучшению логики исследователя (ЛИ) как на вертикальном (алгоритм «Кристалл»), так и на горизонтальном (алгоритм FLC) уровнях.

Сначала введём несколько обозначений и соглашений. Периодом наблюдения T записи (временного ряда) f будем считать конечное регулярное множество узлов на действительной прямой $\mathbb{R}$ с параметром дискретизации h:

$$T = \{t\} = \{t_1 < \cdots < t_N\};\ \ t_{i+1} - t_i = h;\ \ i = 1, \dots, N-1,$$

а саму запись f функцией на T. Изучение исследователем 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. Всё это неформально решается ЛИ, которая содержит несколько этапов [*Gvishiani et al.,* 2008; *Наймарк,* 1966] и, в частности, включает в себя построение нечёткой структуры (меры) $\mu P_f(t)$, выражающей в узле t степень проявления свойства P на записи f. Меру μP_f надо понимать как нечёткую формализацию свойства P на записи f. Первый этап построения меры называется ***выпрямлением*** свойства P, состоит в построении количественного выражения P на записи f и обозначается через P_f: ($P_f: T \to \mathbb{R}^+$). $P_f(t)$ = «количество свойства P на записи f в узле t>>. Выпрямление P_f служит основанием для качественного выражения свойства P на записи f в виде нечеткой структуры μP_f на T, ***меры свойства*** P на f: $\mu P_f(t)$ = «качество (степень проявления) свойства P на записи f в узле t». Мера μP_f, функция принадлежности на T к нечёткому понятию «проявление P на f», имеет название меры активности (аномальности) свойства P на записи f. В настоящей работе мы предлагаем следующую связь между P_f и μP_f

$$\mu P_f(t) = \frac{1}{|T|}\sum_{\bar{t}\in T} \frac{P_f(t)}{P_f(t)+P_f(\bar{t})} \qquad (3.1)$$

На сегодняшний день (3.1) является основой разбиения точек на записи f (рис. 3.6) на регулярные $R(f)$, переходные $I(f)$ и аномальные $A(f)$ относительно проявления в них свойства P (разложение $RIA(f)$:

$$\begin{aligned} RIA(f) \leftrightarrow\ & T = R(f) + I(f) + A(f) \\ R(f) =\ & \{t \in T: \mu P_f(t) \le 0{,}5\} \\ I(f) =\ & \{t \in T: \mu P_f(t) \in (0{,}5, 0{,}75)\} \\ A(f) =\ & \{t \in T: \mu P_f(t) \ge 0{,}75\} \end{aligned} \qquad (3.2)$$

Проявления свойства P на записи f, которая в общем случае представляет собой реальный временной ряд геофизических наблюдений, сильно влияют на окончательное восприятие аномальности и регулярности: аномальный узел из $A(f)$, окружённый регулярными узлами из $R(f)$, теряет свою аномальность и, наоборот, регулярный узел из $R(f)$, окружённый аномальными узлами из $A(f)$, никак не может считаться окончательно регулярным. Поэтому вертикальный уровень $RIA(f)$ нельзя считать окончательным в ЛИ. Для устойчивости нужен её горизонтальный уровень.

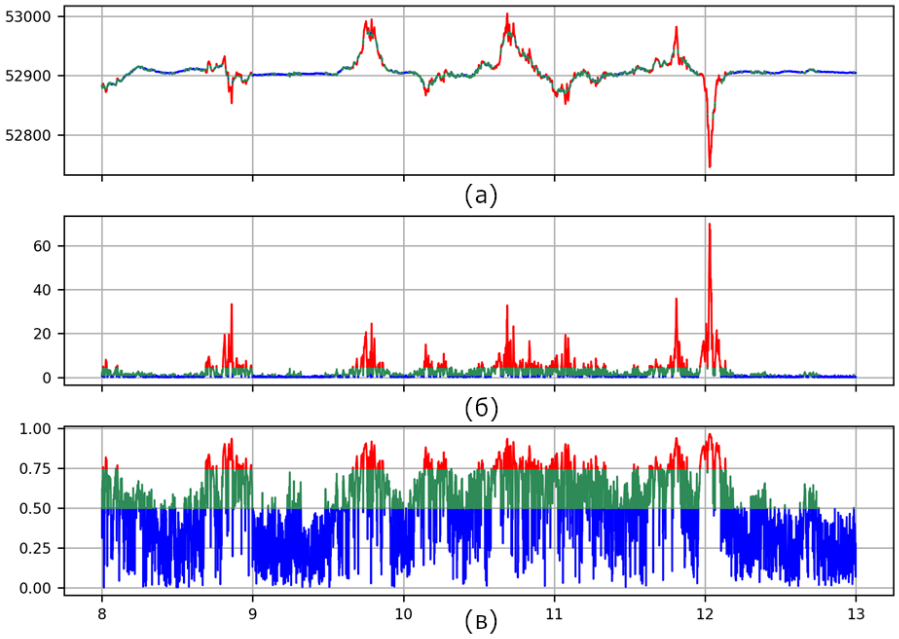


Рисунок 3.6 – Мониторинг ***RIA*** (Регулярное, Промежуточное, Аномальное) магнитограммы $\boldsymbol{f}$ на основе выпрямления $\boldsymbol{ER_f}$: синее – регулярное, зеленое – промежуточное, красное – аномальное. Уровень записи $\boldsymbol{f}$ (а); уровень выпрямления $\boldsymbol{ER_f}$ (б); уровень меры $\boldsymbol{\mu ER_f}$ (в)

Проявления свойства P на записи f, которая в общем случае представляет собой реальный временной ряд геофизических наблюдений, сильно влияют на окончательное восприятие аномальности и регулярности: аномальный узел из $A(f)$, окружённый регулярными узлами из $R(f)$, теряет свою аномальность и, наоборот, регулярный узел из $R(f)$, окружённый аномальными узлами из $A(f)$, никак не может считаться окончательно регулярным. Поэтому вертикальный уровень $RIA(f)$ нельзя считать окончательным в ЛИ. Для устойчивости нужен её горизонтальный уровень.

На рис. 3.7 показана реализация ЛИ на сегодняшний день, а на рис. 3.8 – после алгоритмов «Кристалл» и FLC.

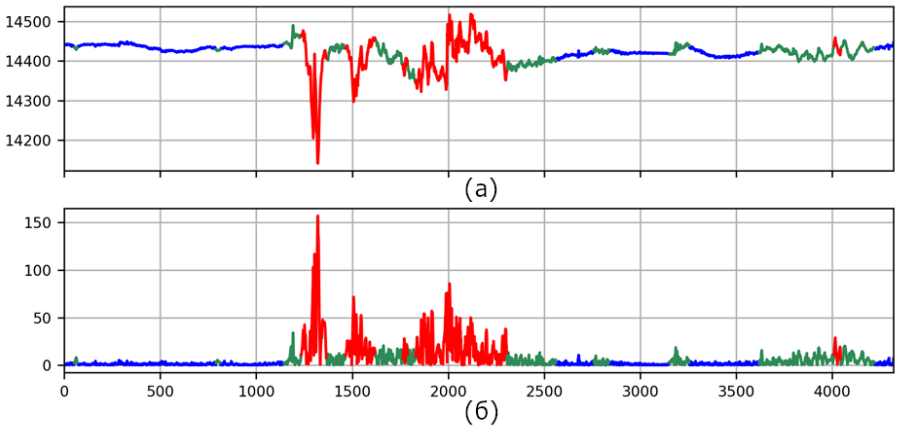


Рисунок 3.7 – Реализация ЛИ на сегодняшний день: ***R*** – синее, ***I*** – зеленое, ***A*** – красное. (**а**) – уровень записи $\boldsymbol{f}$; (б) – уровень выпрямления $\boldsymbol{P_f}$.

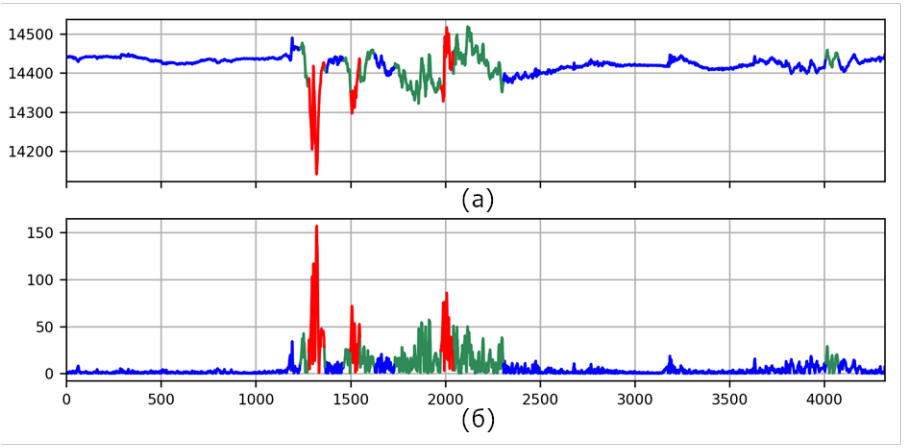


Рисунок 3.8 – Реализация ЛИ после алгоритмов «Кристалл» и FLC: $\boldsymbol{R}$ – синее, $\boldsymbol{I}$ – зеленое, $\boldsymbol{A}$ – красное. (**а**) – уровень записи $\boldsymbol{f}$; (б) – уровень выпрямления $\boldsymbol{P_f}$

Недостаток обычного разбиения в том, что оно формируется на основании сравнения всех со всеми и излишней жёсткости, часто решая ***«проблему леса»*** (разделение рельефа леса на траву, кустарники и деревья) как на рис. 3.9б. Уровень аномальности – переход от кустарников (зеленого) к деревьям (красному) – завышен, и потому крайний справа кустарник определенно хочется сделать красным. На рис. 3.9в, наоборот, уровень аномальности занижен, поэтому среди деревьев (красного) есть слабые элементы.

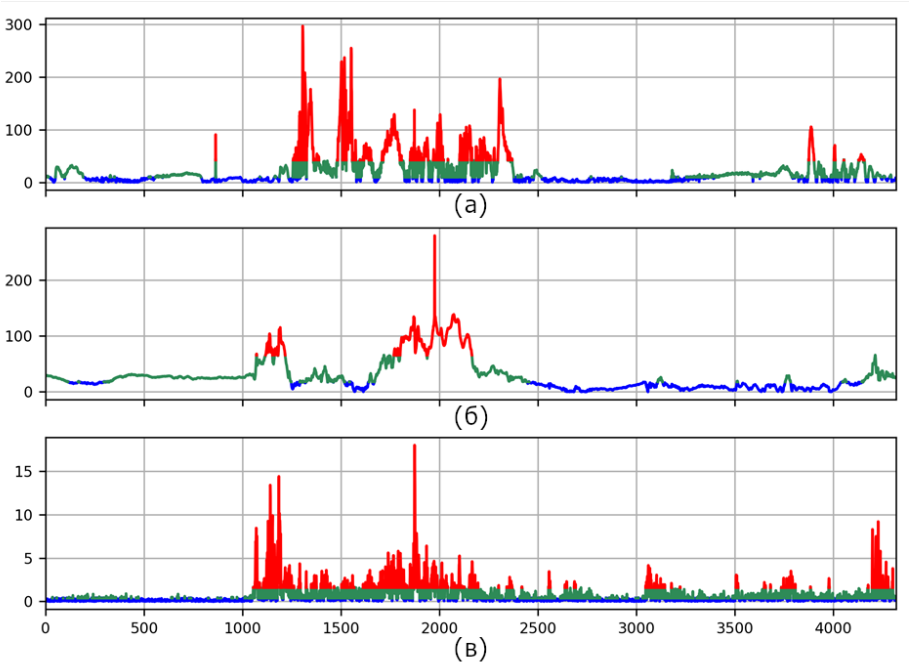


Рисунок 3.9 – Решение «проблемы леса» на основе «простого» разбиения: (а) – качественное разбиение; (б) – аномальность (граница зеленого и красного) слишком высока; (в) – аномальность слишком низка

Разбиение при помощи «Кристалла» решает «проблему леса» на рельефе g более качественно, чем «классическое» разбиение (рис. 3.10)

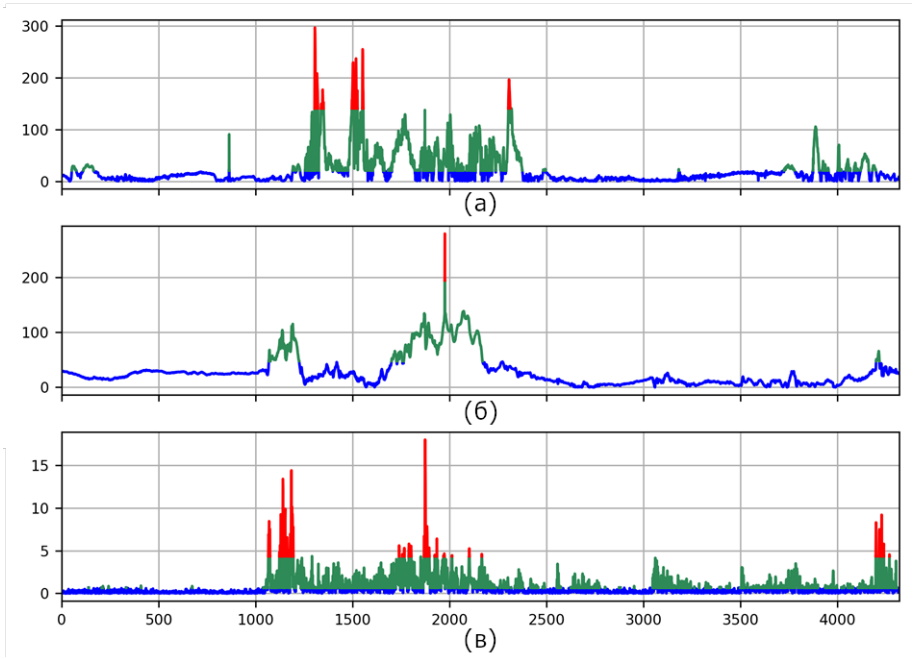


Рисунок 3.10 – Решение «проблемы леса» на основе разбиения алгоритмом «Кристалл» на рельефах рис. 3.9

Рисунки 3.11–3.12 иллюстрируют два решения «проблемы леса»: стандартное, принятое в ДМА на сегодня, разбиение и новое («Кристаллом»). Видна хаотичность проявления свойства P на записи f, сильно влияющая на окончательное восприятие аномальности и регулярности.

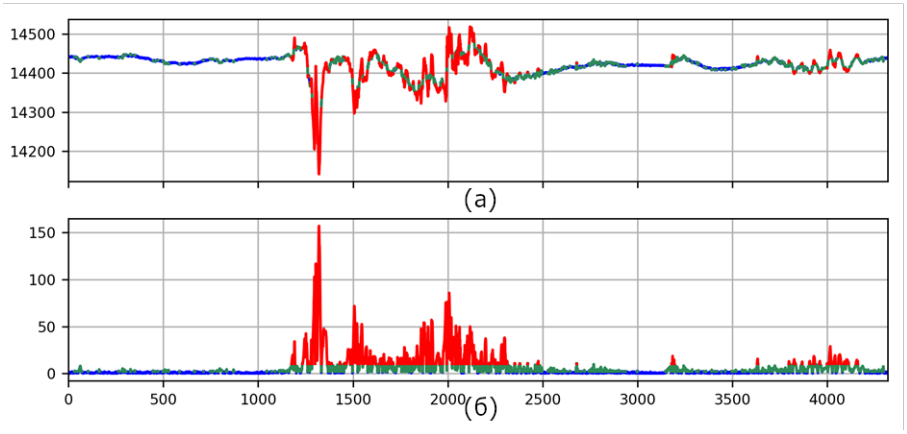


Рисунок 3.11 – Разбиение ***RIA*** исходной записи $\boldsymbol{f}$ на основе решения «проблемы леса» рельефа ее выпрямления $\boldsymbol{P_f}$: (**а**) – исходная запись $\boldsymbol{f}$ (синее – регулярное, зеленое – переходное, красное – аномальное); (б) – рельеф выпрямления $\boldsymbol{P_f}$ (синее – трава, зеленое – кустарник, красное – деревья)

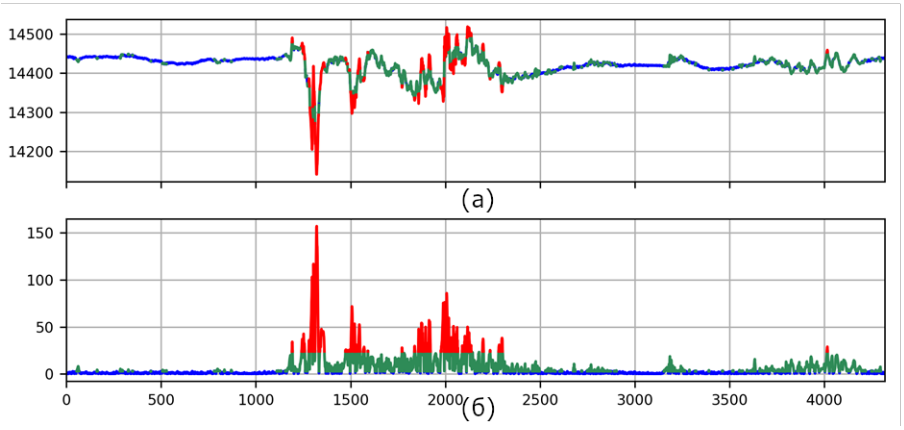


Рисунок 3.12 – Разбиение ***RIA*** исходной записи $\boldsymbol{f}$ на основе решения «проблемы леса» рельефа ее выпрямления «Кристаллом» $\boldsymbol{P_f}$: ***a*** – исходная запись $\boldsymbol{f}$ (синее – регулярное, зеленое – переходное, красное – аномальное); ***b*** – рельеф выпрямления $\boldsymbol{P_f}$ (синее – трава, зеленое – кустарник, красное – деревья)

Выпрямление P_f в общем случае, исходя из свойств записи f, представляет собой неотрицательный стохастический рельеф на T. Согласно ЛИ, возвышенности на P_f соответствуют -аномалиям на f. Поэтому поиск возвышенностей на неотрицательном рельефе является важной задачей в ДМА: чем качественнее она будет решена, тем качественнее будет реализована ЛИ. В настоящей работе горизонтальный уровень ЛИ реализован новым алгоритмом FLC. Он на основе двусторонних мер на перекрестных нечётких конъюнкциях в три этапа реализует разбиение отрезка T. На вход горизонтального уровня ЛИ поступает итог вертикального уровня $RIA^v(P_f)$ в виде решения «проблемы леса» на P_f. Алгоритм FLC переводит его в устойчивое разбиение $RIA^h(P_f)$:

$$\text{FLC: } RIA^v(P_f) \rightarrow RIA^h(P_f). \qquad (3.3)$$

Связанное с $RIA^h(P_f)$ разбиение $RIA^h(f)$ исходной записи f устойчиво делит ее на регулярное, переходное и аномальное проявление свойства P, решает проблему на горизонтальном уровне и считается окончательным результатом ЛИ. Итоги $RIA^h(f)$, $RIA^h(P_f)$ логики исследователя, полученные алгоритмом FLC на основе вертикальных уровней $RIA^v(f)$, $RIA^v(P_f)$, представленных на рис. 3.11–3.12, были показаны на рис. 3.7–3.8.

3.4 Исследование электромагнитного косейсмического сигнала при сейсмических событиях 2015–2024 гг.

По обсерваторским магнитным измерениям и сейсмическим данным исследован электромагнитный отклик от 25 землетрясений с магнитудой Mw ≥ 7 на расстоянии до пункта наблюдений <25° за период 2015–2024 гг. Показано, что наблюдаемый сигнал частично имеет ***косейсмическую*** природу с электродинамической составляющей. Амплитуда электромагнитных возмущений пропорциональна амплитудам генерирующих сейсмических фаз, и коэффициент пропорциональности можно рассматривать как характеристику геологической среды в пункте расположения магнитной обсерватории.

Механизм генерации электромагнитного отклика на сильные сейсмические события обосновывается по-разному [*Surkov et al.,* 2018; *Рябова и Шалимов,* 2022; *Masci and*

Thomas, 2026]. В ходе эксперимента установлено, что по крайней мере, частично косейсмический сигнал имеет «электродинамическую составляющую», теоретически описанную в работе [*Surkov et al.,* 2018].

При отборе исходных данных мы руководствовались критериями, сформулированными в [*Соловьев,* 2023; *Соловьев и др.,* 2024]: магнитуда землетрясения Mw ≥ 7; эпицентральное расстояние до пункта измерений <25° (~3000 км); наличие высокоточных 1-секундных геомагнитных наблюдений с порогом амплитуды шума 0,1–0,2 нТл; наличие сейсмической станции в окрестности геомагнитной обсерватории на расстоянии < 200 км. В соответствии с указанными критериями были отобраны 25 событий: 3 в Европе и 22 в азиатском регионе. Карта отобранных событий и пунктов наблюдений представлена на рис. 3.13. В каждом случае анализировалась запись $d\mathbf{B}/dt$ (соответствующая направлению возбуждаемого теллурического поля **E** и токов в поверхностных слоях Земли) как наиболее индикативная мера геомагнитного отклика на сейсмическое событие. В [*Соловьев и др.,* 2024] были рассмотрены спектральные свойства косейсмического электромагнитного возмущения и видимые на магнитограммах вступления всех основных сейсмических фаз, а также ***поверхностные волны*** Рэлея и Лява. Время возникновения электромагнитных возмущений совпадает с временем прихода сейсмических волн. Обсуждаемые ниже пункты регистрации CYG (геомагнитная обсерватория) и TJN (сейсмическая станция) удалены приблизительно на 50 км, разность времён пробега объёмных волн составляет несколько секунд.

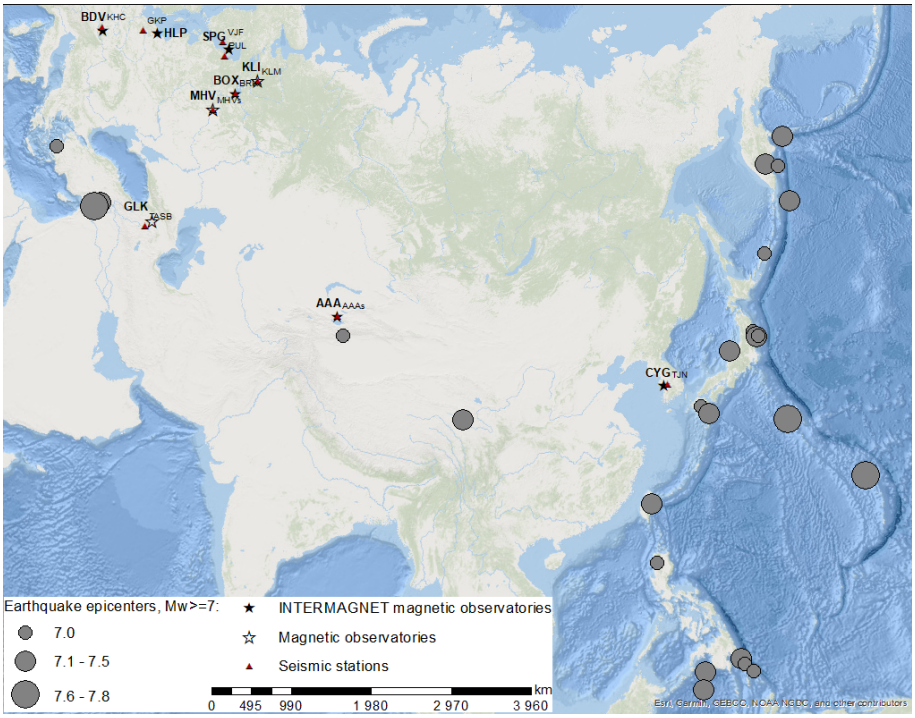


Рисунок 3.13 – Карта эпицентров землетрясений с магнитудой Mw ≥ 7 за 2015–2024 гг. из каталога Геологической службы США (серые круги), геомагнитные обсерватории с 1-секундной регистрацией данных (звезды) и сейсмические станции (треугольники)

Сейсмо-магнитный эффект (СМЭ) описывается уравнением [*Ландау и Лифшиц,* 1982]:

$$\frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta \vec{b} + \vec{\nabla} \times \left(\vec{v} \times \vec{B}_0 \right) \qquad (3.4)$$

В Фурье-образах из (3.4) имеем:

$$\vec{b} = -\frac{1}{1+ik^2/\mu_0\sigma}\,\frac{\vec{k}}{\omega} \times \left(\vec{v} \times \vec{B}_0\right), \qquad (3.5)$$

где $\vec{b}$ – возмущение магнитного поля, ω и $\vec{k}$ – частота и волновой вектор соответственно, $\vec{v}$ – скорость, $\vec{B}_0$ – главное геомагнитное поле, σ – проводимость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Величина и направление волнового вектора в формуле (3.5) различны для разных сейсмических фаз. P-волна была нами исключена из анализа как относительно слабый источник косейсмического сигнала. Пример анализа магнитограмм и сейсмограмм приведен на рис. 3.14. Размах колебаний поверхностных волн Рэлея и Лява максимален, они поляризованы ортогонально. Обе волны образуются одновременно, и волна Лява распространяется с большей скоростью, но на таких, относительно небольших, эпицентральных расстояниях они не успевают разделиться. Это существенно затрудняет анализ СМЭ.

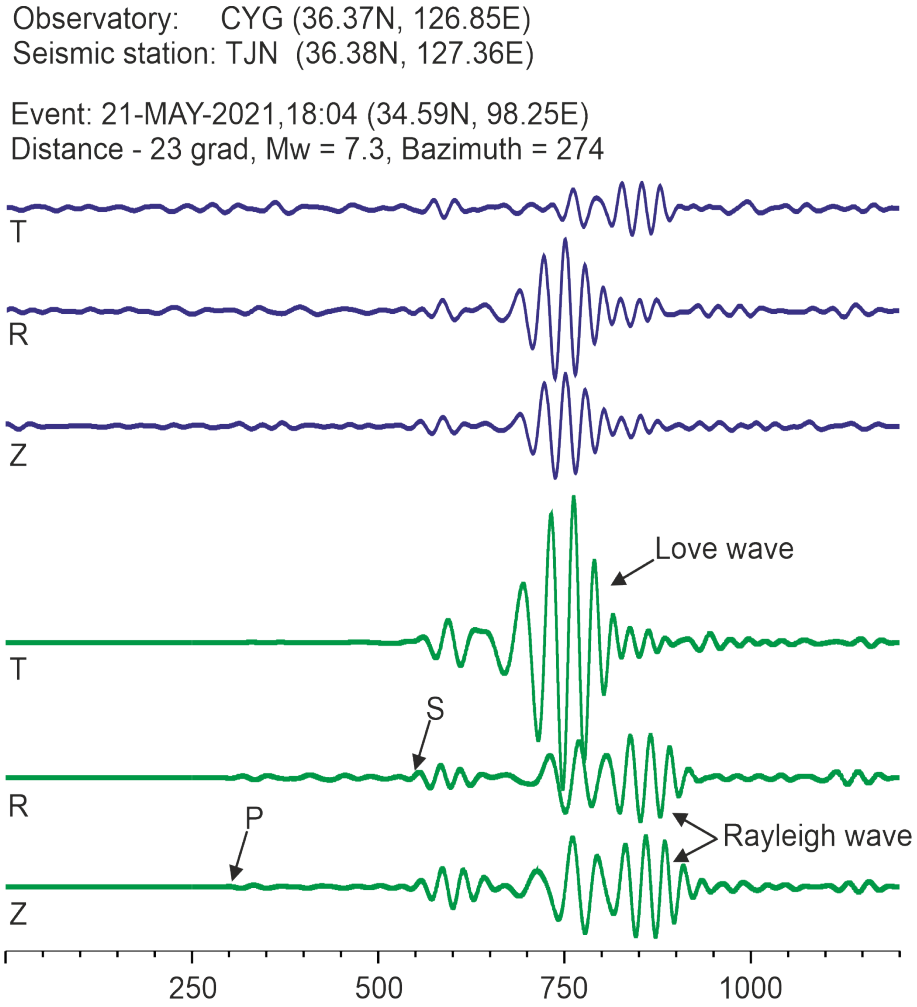


Рисунок 3.14 – Пример анализа магнитограмм (синие кривые) и сейсмограмм (зеленые кривые), зарегистрированных на магнитной обсерватории CYG и сейсмостанции TJN соответственно после землетрясения 21 мая 2021 г., начало отсчета – время землетрясения в очаге, временная шкала в секундах

Косейсмический эффект, порождаемый S-волной, которая является объёмной, на удалении от источника она проникает на значительную глубину. В точке наблюдения кажущийся угол выхода волны составляет 30–50 градусов, конкретное значение этого па-

раметра зависит от расстояния до источника и упругих параметров среды под сейсмостанцией. В отсутствии упругой анизотропии волны обеих поляризаций SV и SH распространяются с одинаковой скоростью. Кажущаяся скорость для S-волн равна приблизительно 10 км/с. Рис. 3.15 демонстрирует хорошее совпадение для события, изображённого на рис. 3.14.

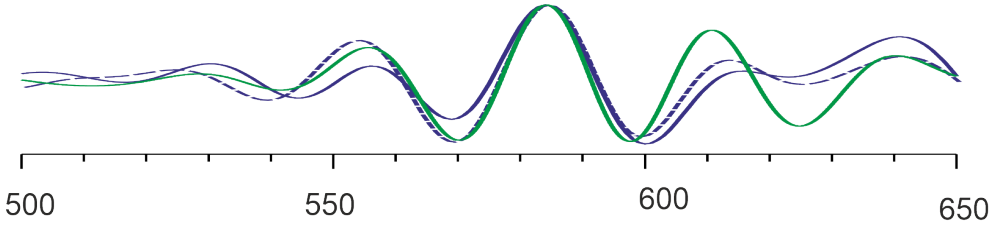


Рисунок 3.15 – Магнитная компонента по данным сейсмостанции TJN (зелёная кривая), измеренные магнитограммы по составляющим сигнала (сплошная синяя и пунктирная синяя) на магнитной обсерватории CYG для события 21 мая 2021 г.

Для близкого события совпадение оказывается хуже (рис. 3.16). Это может быть связано с тем, что на малых расстояниях вклад других механизмов может быть большим, чем на большом удалении от очага. Кроме того, в данном случае эффект может быть связан с тем, что не произошло полного разделения S-волны и поверхностной волны Лява. Зарегистрированные квазипериодические сигналы с частотой ~0,1 Гц в геомагнитных записях свидетельствуют о распространении УНЧ электромагнитных полей от сейсмических источников с Mw≥7,0 на расстояния до 3000 км. Амплитуда электромагнитных возмущений пропорциональна амплитудам генерирующих сейсмических фаз; коэффициент пропорциональности можно рассматривать как характеристику разреза под обсерваторией. Важно также отметить, что зачастую обсуждаемые в литературе геомагнитные возмущения, которые авторы приурочивают к землетрясениям, в действительности вызваны активизацией авроральной магнитосферно-ионосферной токовой системы [*Kozyreva et al.*, 2025].

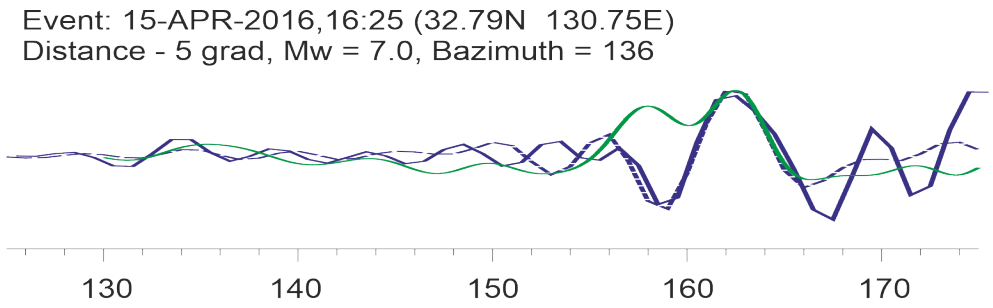


Рисунок 3.16 – Аналогично рис. 3.15 для события 15 апреля 2016 г.

3.5 Подход к изучению характеристик электромагнитного поля Земли и околоземного пространства на основе консолидации разнородных данных

В рамках развития методов системного анализа данных геофизических наблюдений разработан подход к изучению характеристик электромагнитного поля Земли и околоземного пространства на основе консолидации разнородных источников информации для применения технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. Методологической основой исследования является адаптация концепции пространственного анализа геолого-геофизических данных, успешно апробированной специалистами Геофизического центра РАН для восточного сектора Российской Арктики с применением технологий машинного обучения [*Лисенков и др.,* 2025]. На текущем этапе реализован программно-аппаратный комплекс с применением реляционной СУБД (PostgreSQL с расширением

PostGIS) для хранения геопространственных данных и библиотек анализа данных ГЦ РАН для формирования консолидированных датасетов. Разрабатываемые методы направлены на исследование тонкой структуры быстрых вариаций главного магнитного поля, изучение спектральных характеристик и динамических параметров векового хода, что обеспечит получение новых знаний о динамических процессах на границе ядро-мантия. На следующих этапах (2026–2027 гг.) планируется продолжение систематического сбора данных, применение разработанных методов системного анализа для изучения характеристик электромагнитного поля Земли и околоземного пространства и прогноза экстремальных событий космической погоды.

Список использованных источников

Brown W. J., Mound J. E., Livermore P. W. Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2013. – Vol. 223. – P. 62–76. DOI: 10.1016/j.pepi.2013.06.001

Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov Sh. Detection of secular acceleration pulses from magnetic observatory data // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2017. – Vol. 270. – P. 128–142. DOI: 10.1016/j.pepi.2017.07.005

Kloss C., Finlay C. C. Time-dependent low-latitude core flow and geomagnetic field acceleration pulses // Geophysical Journal International. – 2019. – Vol. 217. – Issue 1. – P. 140–168. DOI: 10.1093/gji/ggy545

Baerenzung J., Holschneider M., Saynisch-Wagner J., Thomas M. KALMAG: a high spatio-temporal model of the geomagnetic field // Earth, Planets and Space. – 2022. – Vol. 7. – 139. DOI: 10.1186/s40623-022-01692-5

Holme R., de Viron O. Characterization and implications of intradecadal variations in length of day // Nature. – 2013. – Vol. 499. – P. 202–204. DOI: 10.1038/nature12282

Duan P., Huang C. Intradecadal variations in length of day and their correspondence with geomagnetic jerks // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. –. 2273. DOI: 10.1038/s41467-020-16109-8

Lesur V., Gillet N., Hammer M. D., Mandea M. Rapid variations of Earth's core magnetic field // Surveys in Geophysics. – 2022. – Vol. 43. – P. 41–69. DOI: 10.1007/s10712-021-09662-4

Gillet N., Gerick F., Jault D., Schwaiger T., Aubert J., Istas M. Satellite magnetic data reveal interannual waves in Earth’s core // PNAS. – 2022. – Vol. 119. – No. 13. – e2115258119. DOI: 10.1073/pnas.2115258119

Pfeffer J., Cazenave A., Rosat S., Moreira L., Mandea M., Dehant V., Coupry B. A 6-year cycle in the Earth system // Global and Planetary Change. – 2023. – Vol. 229. – 104245. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104245

Baltybaev Sh. K., Vivdich E. S. Evolution of the Meyeri Thrust Zone of the Northern Ladoga Region (Republic of Karelia, Northwest Russia): PT Conditions for the Formation of Mineral Parageneses and Geodynamic Reconstructions // Geotectonics. – 2021. – Vol. 55, no. 4. – P. 502–515. DOI: 10.1134/S0016852121040038.

Morozov Yu. A., Terekhov E. N., Matveev M. A., Romanyuk T., Bayanova T. B., Kunakkuzin E. L., Okina O. I., Smulskaya A. I. Sheeted Intrusions in the Svecokarelides of the Ladoga Region: Structural Control, Petrogenesis, Geochemical Analysis of Rocks, and Geodynamic Setting // Geotectonics. – 2024. – Vol. 58. – No. 6. – P. 575–610. DOI: 10.1134/S0016852124700419.

Соколова Е. Ю., Голубцова Н. С., Ковтун А. А., Куликов В. А., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Рокитянский И. И., Таран Я. В., Яковлев А. Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. – 2016. – № 1. – С. 48–61. EDN: VOITNT

Голод М. И., Клабуков Б. Н., Гришин А. С. Электропроводность горных пород Карелии // Петрофизические исследования Карело-Кольского региона / отв. ред. М.И. Голод. – Петрозаводск: Институт геологии КФАН СССР, 1979. – С. 124–134.

Гришин А. С. Геоблоки Балтийского щита. Петрозаводск: Институт геологии КФАН СССР, 1990. – 112 с.

Петрофизические карты геологических формаций восточной части Балтийского щита (петроплотностные и петромагнитные). Пояснительная записка к картам масштама 1:1 000 000 / ред. Н.Б. Дортман и М.Ш. Магид. – Л.: Аэрогеология, 1980.

Колесник Н. Н. Типизация блоковых структур Южной Карелии на основе анализа геофизических и петрофизических данных // Петрофизические исследования на щитах и платформах. – Апатиты: АН СССР, 1985. – С. 97–100.

Mints M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M., Sokolova E. Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // Geoscience Frontiers. –2020. – Vol. 11. – No. 3. – P. 999–1023. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.10.003

Agayan S., Bogoutdinov S., Kamaev D., Kaftan V., Osipov M., Tatarinov V. Theoretical framework for determination of linear structures in multidimensional geodynamic data arrays // Applied Sciences. – 2021a. – Vol. 11. – Issue 24. – 11606. DOI: 10.3390/app112411606

Agayan S. M., Kamaev D. A., Bogoutdinov Sh. R., Aleksanyan A. O., Dzeranov B. V. Time series analysis by fuzzy logic methods // Algorithms. – 2023. – Vol. 16. – Issue 5. – 238. DOI: 10.3390/a16050238

Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Kamaev D. A., Dzeboev B. A., Dobrovolsky M. N. Trends and extremes in time series based on fuzzy logic // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. – Issue 2. – 284. DOI: 10.3390/math12020284

Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Krasnoperov R. I., Efremova O. V., Kamaev D. A. Fuzzy logic methods in the analysis of tsunami wave dynamics based on sea level data // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 179. – P. 4053–4062. DOI: /10.1007/s00024-022-03104-x

Gvishiani A. D., Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Zlotnicki J., Bonnin J. Mathematical methods of geoinformatics. III. Fuzzy comparisons and recognition of anomalies in time series // Cybernetics and Systems Analysis. – 2008. – Vol. 44. – No. 3. – P. 309–323. DOI: 10.1007/s10559-008-9009-9

Наймарк Б. М. Алгоритм для обнаружения сейсмического сигнала на фоне микросейсм // Вычислительная сейсмология. Выпуск 1: Анализ сейсмических наблюдений на электронных машинах. – М.: Наука, 1966. – С. 5–9.

Surkov V. V., Pilipenko V. A., Sinha A. K. Possible mechanisms of co-seismic electromagnetic effect // Acta Geodaetica et Geophysica. – 2018. – Vol. 53. – P. 157–170. DOI: 10.1007/s40328-018-0211-6

Рябова С. А., Шалимов С. Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли и приуроченных к сильным землетрясениям // Физика Земли. – 2022. – № 4. – С. 30–45. DOI: 10.31857/S0002333722040081

Masci F., Thomas J. N. Evidence of underground electric current generation during the 2009 L'Aquila earthquake: Real or instrumental? // Geophysical Research Letters. –2016. – Vol., 43. – P. 6153–6161. DOI: 10.1002/2016GL069759

Соловьев А. А. Геомагнитный эффект землетрясений Mw = 7.5–7.8 в Турции 6 февраля 2023 г. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511. – № 1. – С. 78–85. DOI: 10.31857/S2686739723600613

Соловьев А. А., Алёшин И. М., Анисимов С. В., Гоев А. Г., Морозов А. Н., Сапронов Д. С., Соловьева Е. Н. Тонкая структура косейсмического электромагнитного отклика по данным геомагнитных и сейсмологических наблюдений // Физика Земли. – 2024. – № 5. – С. 195–209. DOI: 10.31857/S0002333724050141

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с.

Лисенков И. А., Соловьев А. А., Кузнецов В. А., Николова Ю. И. Обобщенный массив геолого-геофизической информации восточного сектора Российской Арктики для проведения анализа методами машинного обучения // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66. – № 2. – С. 232–246. DOI: 10.15372/GiG2024148.

4 Аккумулирование, структурирование, депонирование, визуализация, диссеминация, системный анализ и комплексирование геолого-геофизических данных

Шифр темы: FMWG-2025-0007
Регистрационный №: 125062507528-1
Руководитель: зам. директора по науке, зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев

4.1 Увеличение объемов и видов данных в фондах Мировых центров данных и в свободном доступе в сети. Создание новых тематических баз данных. Расширение Центрального репозитория «Базы данных по наукам о Земле»

Накопление и сохранение геофизических данных и обеспечение свободного и удобного доступа к ним является основной миссией российских Мировых центров данных (МЦД) по солнечно-земной физике (СЗФ) и физике твердой Земли (ФТЗ). МЦД располагают обширными фондами данных в электронном виде, бóльшая часть которых опубликована в сети Интернет на сайте Центров http://www.wdcb.ru/index.ru.html.

4.1.1. Увеличение объемов и видов данных в фондах Мировых центров данных и в свободном доступе в сети

В МЦД по солнечно-земной физике в разделе ***«Геомагнитные вариации»*** в 2025 году проведена систематизация хранящихся в фондах цифровых изображений магнитограмм (в графических форматах TIFF и JPEG) восьми обсерваторий (таблица 4.1). Массив данных опубликован на сайте вместе с подготовленной информацией об обсерваториях, приборах и базисных значениях. Сопровождавшие магнитограммы таблицы среднечасовых значений элементов магнитного поля Земли в виде фотографий переведены из формата TIFF в PDF формат, что значительно сократило их объем, и также размещены на сайте Центра.

Дополнены ряды значений геомагнитного *K*-индекса данными за 2023–2025 годы обсерваторий «Магадан», «Хабаровск», «Мыс Шмидта», «Паратунка» (ИКИР ДВО РАН), «Ленинград (Воейково)» (МИО СПбФ ИЗМИРАН) и за 2018–2024 гг. «Москва» (ИЗМИРАН). Все данные проверены, приведены к стандартному формату и опубликованы на сайте в разделе http://www.wdcb.ru/stp/data/Catalog_K/. Продлены ряды всех других геомагнитных индексов на основе имеющихся в настоящее время определений в Международной службе геомагнитных индексов (ISGI), МЦД по геомагнетизму в Киото и в Немецком исследовательском центре наук о Земле (GFZ).

Таблица 4.1 – Цифровые изображения магнитограмм, опубликованные в 2025 году на сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/geomag/magnetogr_list.html

Название обсерватории	Код	Период, год	Количество магнитограмм	Объем, Мб
Владивосток	VLA	1971–1972, 1974–1975	1 486	16 175
Магадан	MGD	1966–1970	1 590	17 237
Минск	MNK	1961–1965	1 473	12 448
Тикси	TIK	1971–1975	3 685	39 358
Иркутск	IRT	1966–1973	2 956	30 974
Тбилиси	TFS	1963 – 1970	3 062	905

Название обсерватории	Код	Период, год	Количество магнитограмм	Объем, Мб
Мыс Челюскин	CCS	1990–1993	982	613
Мыс Уэлен	CWE	1990–1994	1 557	541
		1990_Storms	373	21 873
Всего:			16 791	118 251

Массивы среднечасовых и минутных значений элементов геомагнитного поля обсерваторий «Красная Пахра» (MOS) и «Новосибирск» (NVS) дополнены данными за 2024 год, обсерватории «Львов» (LVV) – за 2020–2021 гг., обсерватории «Климовская» (KLI) – за 2015 год. Проверены, отредактированы и опубликованы на сайте таблицы среднечасовых значений элементов геомагнитного поля *D, H, Z, F* после сканирования (PDF файлы) десяти обсерваторий (таблица 4.2). Верифицированы по оригинальным данным размещенные на сайте цифровые файлы шести обсерваторий. В ряде случаев были внесены исправления и дополнения.

В разделе ***«Ионосферные явления»*** после проверки и анализа опубликованы на сайте данные ионосферной станции «Москва» (ИЗМИРАН), содержащие значения 18-ти ионосферных параметров за 2025 г. В настоящее время в свободном доступе на сайте Центра находятся ионосферные данные станции «Москва» за период с 2007 по 2025 год.

В таблице 4.3 перечислены проверенные и опубликованные в сети после перевода с бумажного носителя в электронную форму (PDF формат) ионосферные данные шести станций, включающие таблицы среднечасовых значений параметров ионосферы и *F*-графики.

В разделе «Солнечная активность и межпланетная среда» в 2025 году опубликована 8-я версия «Накопительного каталога солнечных вспышечных событий рентгеновского класса M1 – X>17,5 25-го цикла солнечной активности, I.2020–VI.2030», автор канд. физ.-мат. наук В. Н. Ишков. Каталог содержит данные о 1 854 событиях, произошедших на Солнце с января 2020 года. Теперь ряд сведений о солнечной вспышечной активности включает данные за 23, 24 и значительную часть 25-го цикла солнечной активности, то есть почти за 30 лет.

Таблица 4.2 – Таблицы среднечасовых значений *D, H, Z, F* в PDF формате, размещенные в 2025 году на сайте http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_hourly.ru.html

Название обсерватории	Код	Проверенные годы	Количество таблиц	Объем данных, Мб
Иркутск	IRT	1996–1998	174	21
Минск	MNK	1961–1972, 1974–1986, 1988–1989	1 004	146
Тбилиси	TFS	1957–1990, 1992	1 409	187
Ташкент	TKT	1957–1991	1 882	205
Мыс. Челюскин	CCS	1976–1985	352	61
Мыс Уэлен	CWE	1970–1984	546	90
Диксон	DIK	1977–1986	360	62
Казань	KZN	1974, 1978–1985	394	40
Мурманск	MMK	1974, 1975, 1979, 1980	138	14
Магадан	MGD	1971–1972, 1976–1979, 1981–1993, 1996–2001	2 162	239
Всего:			8 421	1 065

Таблица 4.3 – Ионосферные данные в формате PDF, размещенные в 2025 году на сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/

Название станции	Код	Проверенные годы	Количество таблиц и графиков	Объем данных, Мб
Горький	GK156	1957–1992	10 620	6 741
Москва	MO155	1957–1959, 1963–1964	4 660	535
Алма-Ата	AA343	1965–1967, 1972–1977, 1980–1981, 1987–1989	3 998	387
Ашхабад	AS237	1960	657	815
Караганда	KR250	1968–1970, 1980–1983 1985–1987	1 277	175
Тбилиси	TB142	1960	834	38
		Всего:	22 046	8 691

По соглашению с Отделом физики Солнца и Солнечной системы Крымской астрофизической обсерватории РАН на сайте МЦД по СЗФ создана веб-страница http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_telescope.ru.html, реализующая доступ к БД [*База данных*…], содержащей результаты наблюдений Солнца в линии He I 1083 нм на башенном солнечном телескопе БСТ-2 КрАО, в том числе свыше 4 500 карт полного диска Солнца в линии He I. Это уникальный наблюдательный материал, позволяющий анализировать эволюцию корональных дыр, волокон и активных областей более чем за два солнечных цикла (1999–2025 гг.).

В МЦД по физике твердой Земли в разделе ***«Сейсмология»*** на протяжении всего года публиковались в сети в свободном доступе данные из «Сейсмологического бюллетеня» и «Сейсмологического каталога», поступающие ежедекадно из Единой геофизической службы Российской академии наук (ФИЦ ЕГС РАН).

Обновлена интернет-страница http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_USSR.ru.html (рисунок 4.1), обеспечивающая доступ к каталогам землетрясений в 14-ти сейсмических регионах за период с 1962 по 1991 гг. из [*Землетрясения в СССР*…]. Представлена общая информация для всех каталогов и описание особенностей и формата для каждого регионального каталога. Массив данных включает параметры 145 398 сейсмических событий, объем данных 14 Мб.

В МЦД по ФТЗ поддерживается версия каталогов землетрясений сейсмических регионов Северной Евразии (с 1992 года) в текстовом формате TXT из [*Землетрясения Северной Евразии*…]. В 2025 году дополнены данными по 2020 г. каталоги регионов «Восточно-Европейская платформа», «Курило-Охотский», «Приамурье и Приморье», «Сахалин» и «Урал и Западная Сибирь».

Выпуски [*Бюллетень*…] за период с 1957 по 1969 гг. в формате PDF в 2025 году проверены, отредактированы и опубликованы на сайте в разделе «Сейсмологические бюллетени».

В разделе ***«Гравиметрия»*** осуществлен перевод в цифровой вид каталога гравиметрических пунктов, определенных в Антарктическом рейсе НИС «Профессор Зубов» в 1968 и 1969 годах [*Корякин и Фролов,* 1973] и каталога гравиметрических определений в

Антарктиде [*Каталог*…, 1962], выполненных во время советских антарктических экспедиций 1955–1960 гг. Оба каталога были отсканированы и отредактированы в формате PDF. Затем вручную данные переведены в сформированные таблицы Excel и проверены.

Регион	Номер	Код	Годы	Число событий	Объем, Мб	Описание
Карпаты	I	CRP	1962-1991	765	0,07	CRP_Format
Крым	II	CRM	1962-1991	812	0,07	CRM_Format
Кавказ	III	CAU	1962-1991	12 006	1,15	CAU_Format
Копетдаг	IV	TRM	1962-1991	9 676	0,92	TRM_Format
Средняя Азия и Казахстан	V	MAK	1962-1991	37 123	3,08	MAK_Format
Северный Тянь-Шань	V	NTS	1962-1991	7 528	0,61	NTS_Format
Алтай и Саяны	VI	ALT	1962-1991	5 129	0,49	ALT_Format
Прибайкалье и Забайкалье	VII	BKL	1962-1991	12 224	1,17	BKL_Format
Приамурье и Приморье	VIII	PRM	1962-1991	5 783	0,52	PRM_Format
Сахалин	IX	SKH	1962-1991	3 171	0,29	SKH_Format
Курило-Охотский регион	X	KRL	1962-1991	20 991	2,03	KRL_Format
Камчатка и Командорские	XI	KMC	1961-1991	18 732	1,61	KMC_Format
Северо-Восток	XII	N-E	1968-1991	4 226	0,34	N-E_Format
Якутия	XIII	YAK	1962, 1968-1991	6 763	0,55	YAK_Format
Арктический бассейн	XIV	ARC	1962-1991	469	0,04	ARC_Format

Рисунок 4.1 – Таблица на интернет-странице МЦД по ФТЗ, обеспечивающая доступ к каталогам землетрясений 14-ти регионов и их описаниям

4.1.2 Сохранение старых данных

В МЦД по СЗФ и ФТЗ ведется постоянная работа по проекту «Сохранение старых данных» – преобразование в электронную форму данных, хранящихся в фондах в виде бумажных документов. Процесс преобразования включает сканирование данных на бумажном носителе, превращение в электронные документы (формат PDF) и последующую компьютерную обработку электронных документов и подготовку к размещению на сайтах МЦД.

В 2025 году переведено в электронную форму ~39 000 документов (~1 Гб) с данными по нескольким разделам.

***Солнечно-земная физика*:** Данные среднечасовых значений 14-ти ионосферных параметров на станциях Караганда (1968–1989), Ташкент (1982–1983, 1986–1987), Томск (1957–1959) и Новосибирск (1981–1983).

Результаты ионосферных и геомагнитных наблюдений на станциях Северный Полюс 6, 7 и 8 за период 1957–1958 гг.

Физика твердой Земли: Оперативный сейсмологический бюллетень (ежедекадный), с данными о землетрясениях и их регистрации на сейсмических станциях за период с 1978 по 1995 гг.

4.1.3 Формирование тематических баз данных

Сформирована база данных «Землетрясения в Дальневосточной сейсмоактивной зоне в 1957–1961 гг.» (свидетельство о государственной регистрации № 2025623438 от 21.08.2025 г.

База данных включает: PDF-копии опубликованных в [*Бюллетень…*] основных и подробных данных о землетрясениях в Дальневосточной зоне и сведений о сейсмических станциях; каталог землетрясений в двух цифровых форматах XLSX и TXT; описание формата и построенную карту пространственного распределения эпицентров землетрясений (рисунок 4.2). БД содержит основные данные о 1 020 землетрясениях и подробные данные о 251 событии на территории 43−90° N, 125−175° E.

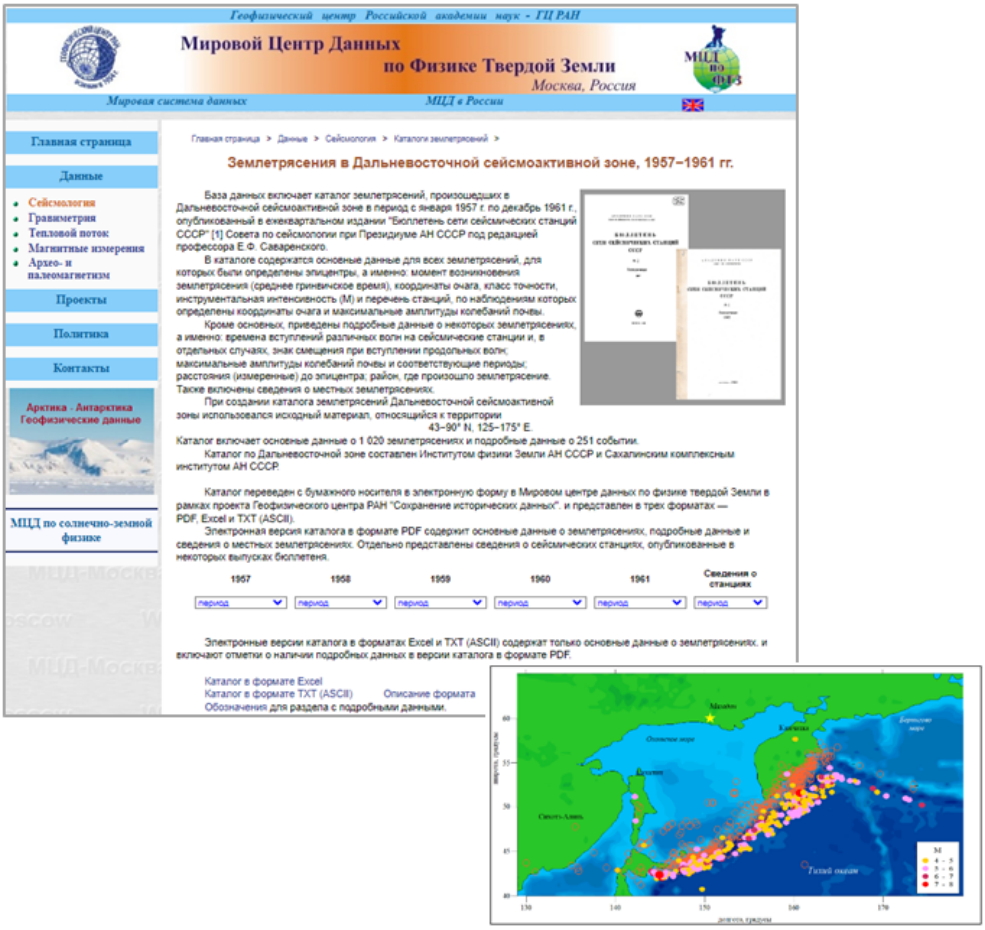


Рисунок 4.2 – Страница сайта для БД «Землетрясения в Дальневосточной сейсмоактивной зоне в 1957–1961 гг.»

В 2025 году продолжалось развитие тематического сайта «Арктика – Антарктика. Геофизические данные» http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/index.ru.html.

Создана новая страница в разделе «Свойства литосферы» – «Термальная и плотностная модель литосферы в северо-восточной Евразии». Новая трёхмерная модель, основанная на данных сейсмической томографии и гравиметрии, описывает структуру литосферы с точки зрения вариаций температуры и состава и демонстрирует сильную корреляцию между толщиной литосферы и этапами тектонического развития региона.

Набор данных включает значения температуры и плотности для шести глубинных срезов: 50, 100, 150, 200, 250 и 300 км от поверхности Земли (рисунок 4.3). Материал предоставили д-р физ.-мат. наук М. К. Кабан и канд. физ.-мат. наук Р. В. Сидоров.

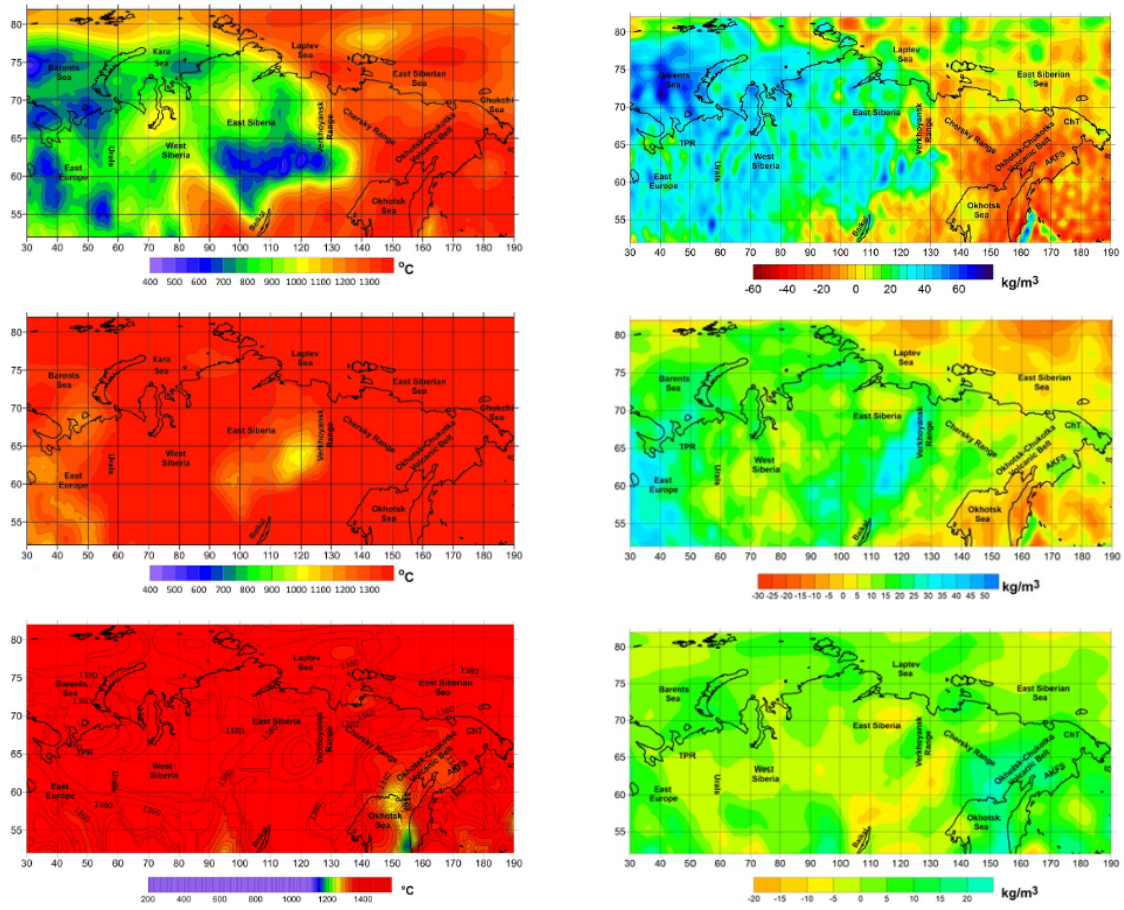


Рисунок 4.3 – Распределения температуры (слева) и вариации плотности литосферы (справа) на глубинах 100, 200 и 300 км

В разделе «Геофизические поля» страница «Модели сейсмической томографии Арктического региона» дополнена результатами исследования литосферы с использованием сейсмотомографической модели REVEAL [*Thrastarson et al.*, 2024], полученными в 2025 году. Значения данных представляют собой аномалии скорости. Представлены глубинные срезы модели сейсмотомографии REVEAL (0–700 км с шагом 10 км) по продольным и поперечным волнам.

В разделе «Гравиметрические данные» дополнена полученными в 2025 году данными часть «Результаты исследования структуры осадочных бассейнов в Арктической зоне Евразии на основе декомпенсационных аномалий силы тяжести». С использованием моделей, основанных на расчёте декомпенсационных гравитационных аномалий, осадочный чехол был проанализирован в регионе Северной Евразии, включающем в себя северную часть Западно-Сибирской плиты, Сибирский кратон, север Урала и Таймырский орогенный, а также прилегающий континентальный шельф (рисунок 4.4). Авторы докт. физ.-мат. наук М. К. Кабан и канд. физ.-мат. наук Р. В. Сидоров.

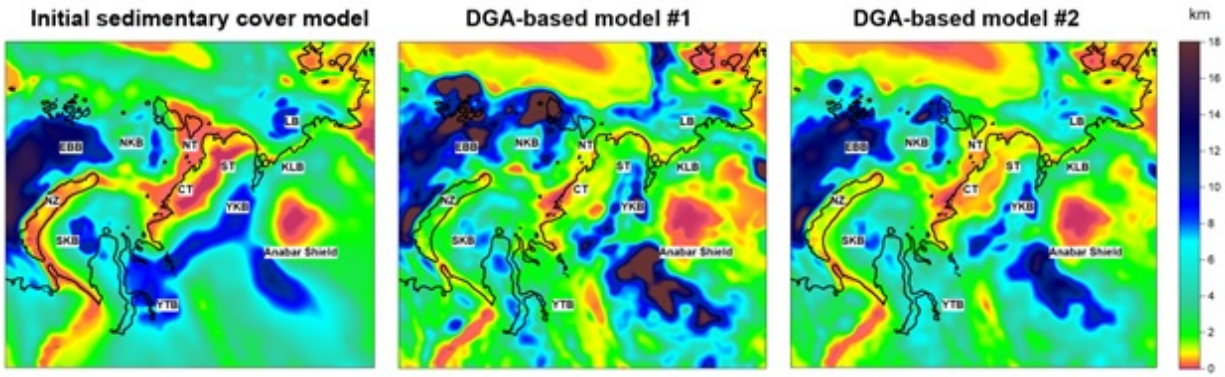


Рисунок 4.4 – Мощность осадочных отложений в районе исследования Северной Евразии: исходная модель осадочного чехла (слева) и новые модели осадочного чехла (в центре и справа) для структур района исследования

Кроме того, для тематического сайта «Арктика – Антарктика. Геофизические данные» созданы новые интернет-страницы:

- Мощность литосферы в Северной Евразии;
- Начальная термальная и плотностная модель литосферы и верхней мантии Северной Евразии;
- Новая модель тектонического районирования литосферы Западно-Сибирского бассейна на основе набора различных геофизических данных;
- Данные критической протайки вечной мерзлоты Сибири и Арктической зоны РФ до 2060 года.

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

В 2025 году в ходе реализации проекта «База данных по наукам о Земле» / «Earth Science DataBase» (ESDB) по созданию современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных в Центральный репозиторий ESDB (https://esdb.wdcb.ru/) были добавлены с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier) через агентство Crossref четыре базы данных.

Авторы первых трех БД: Докукин П. А., Кафтан В. И., Титков Н. Н. и Чебров Д. В. Базы данных содержат результаты изучения пятилетней эволюции региональной сейсмичности, дефицита внутренних смещений земной коры, горизонтальной дилатации и суммарной деформации сдвига по данным ГНСС в связи с сильнейшим Камчатским землетрясением 2025 г. DOI: 10.2205/esdb-kamchatka-2025; esdb-kamchatka-hd-2025; esdb-kamchatka-tss-2025.

Четвертая БД авторов Андреевой О. А., Плотникова А. А. и Малащук В. М. включает результаты наблюдений Солнца в линии He I 1083 нм, полученных на телескопе БСТ-2 в Крымской астрофизической обсерватории. DOI: 10.2205/ESDB-SAD-CrAO.

4.2. Интерактивная сферическая визуализация данных

4.2.1 Классификация и каталогизация аппаратно-программных решений систем-гиперглобусов

В фокусе исследования системы-гиперглобусы, которые представляют собой интерактивные картографические системы, визуализирующие планету (геосферы) в неискажённой трёхмерной целостности посредством *разнотиповых* аппаратно-программных конфигураций (АПК). *Виртуальные* гиперглобусы отображают модель на планарных экранах, объёмность визуализации достигается в результате оптической иллюзии за счёт построения перспективы, светотеней и иных методов и средств компьютерной графики. *Тактильные* гиперглобусы отображают модель на шаровом макете или его сегменте, называемом сферическим экраном (СЭ) в случае видеопроекции или сферическим дисплеем (СД) в случае композитного видеоэлектронного устройства; объёмность визуализации достигается за счёт пространственной формы СЭ / СД.

В рамках выше предложенной классификации создан каталог научно-исследовательских и коммерческих серийных проектов систем-гиперглобусов.

Виртуальный гиперглобус: Digital Behaim Globe (Австрия, 1992), TerraVision (Германия, 1993), EarthBrowser (США, 1996), Encarta Virtual Globe (США, 1997), 3D World Atlas (США, 1999), Google Earth (США, 2001), NASA World Wind (США, 2004), ArcGlobe (США, 2004), Marble (Международный, 2006), osgEarth (США, 2008), Cesium (Международный, 2012), d3-geo (Международный, 2013), MapBox (США, 2015), ORBUS Web (Россия, 2019), OpenGlobus (Международный, 2020) и др.

Тактильный гиперглобус: GeoSphere (Бразилия, 1992), Ag4-Globe (Германия, 2000), Science On a Sphere (США, 2000), Geo-Cosmos (Япония, 2002), OmniGlobe (Германия, 2002), Magic Planet (США, 2002), Globe4D (Нидерланды, 2006), PufferSphere (Великобритания, 2006), SnowGlobe (США, 2011) и его модификация (Франция, 2017), ORBUS (Россия, 2011), Космическая сфера (Россия, 2018) и др.

4.2.2 Развитие семейства ПО платформы «ORBUS-PRO»

Для интеграции работы разнотиповых систем проектируется унифицированное решение – платформа «ORBUS-PRO» (рисунок 4.5), обобщающее и концентрирующее результаты многолетней работы над АПК ORBUS и образованной экосистемой.

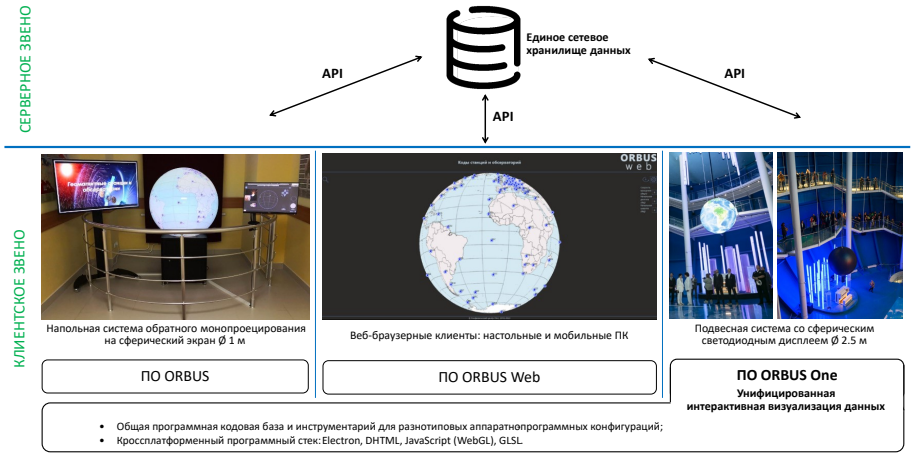


Рисунок 4.5 – Состав платформы интерактивной сферической визуализации «ORBUS-PRO». Унифицированные решения выделены шрифтом жирного начертания

Первым шагом унификации стало вынесение и объединение локальных БД приложений на FTP-сервере во избежание тиражирования и версионности данных, а также добавления возможности централизованного (удалённого) администрирования. Будущая работа заключается в добавлении API для унифицированного доступа к данным и обработки запросов к ним.

Следующим шагом унификации стала разработка программного фреймворка «ORBUS One», представляющего собой контейнер программно-алгоритмических решений, совместимых для конфигураций виртуального и тактильного типа. Его создание вызвано необходимостью минимизировать временные и производственные затраты на разработку и поддержку новых практических реализаций. Основу спроектированного ПО «ORBUS One» составило авторское интернет-приложение «ORBUS Web», обёрнутое программной средой Electron.js с целью предоставления полного доступа к файловым и другим ресурсам ОС. Ввиду применяемой программной инженерии V8 интерпретируемый веб-браузерный ЯП JavaScript становится языком общего назначения.

На сегодняшний день ПО «ORBUS One» поддерживает следующие АПК:

1. Веб-браузерные клиенты – настольные и планшетные (мобильные) ПК.
2. Напольная система обратного монопроецирования (один проектор – один объектив) на СЭ Ø 1 м (патент на полезную модель № 192582 от 23.09.2019 г.).
3. Подвесная система со светодиодным СД Ø 2,5 м.

Для них единообразно реализованы и исполняются следующие программные функции: аппаратно-ускоренные (шейдерные) картографические преобразования (ортографическая, эквидистантная цилиндрическая и Ламбертова азимутальная проекции), управление видеоанимацией, навигация по слайдам и их группам, а также отображение сопроводительных графических материалов. В следующем отчётном периоде планируется расширение функциональности и регистрация программы ЭВМ в Роспатенте.

4.2.3 Агрегация и адаптация данных

Созданная «База сферических визуализаций: Антропосфера. Техносфера» (рисунок 4.6) предназначена для использования в качестве контента интерактивной сферической визуализации на аппаратно-программных комплексах со сферическим проекционным экраном или светодиодным дисплеем, а также посредством систем виртуальных глобусов. Файловая база данных включает в себя коллекцию планетарных статических и динамических карт по следующим тематическим группам: Экспансия водного пространства человеком, Транспортные сети, Энергетика и сельское хозяйство, Освоение космоса. Карты сопровождаются научно-художественными материалами на русском и английском языках в формате PDF: легенда (или схема-описание) и пиктограмма карты, иллюстрированная справочная презентация. Исходными материалами стали хранилище данных Science On a Sphere (ftp://public.sos.noaa.gov), World Population Prospects (https://population.un.org/wpp), а также хранилище медиафайлов Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org). Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625683 от 3.12.2025 г.



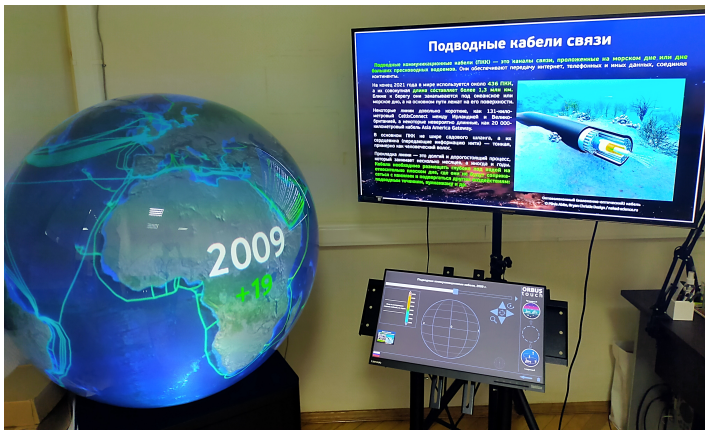


Рисунок 4.6 – Выбор тематической группы БД (слева в верхнем ряду) и результаты визуализация слайдов «Автомобильные дороги» в ПО «ORBUS Web» (справа в верхнем ряду) и «Подводные кабели связи» в ПО «ORBUS» (в нижнем ряду)

4.2.4 Научное сотрудничество

При использовании Платформы в рамках соглашения о научном сотрудничестве с геологическим факультетом МГУ им М.В. Ломоносова проведена лекция для студентов кафедры динамической геологии (https://gcras.ru/news.php?n=1211) (рисунок 4.7). Также в рамках соглашения о научном сотрудничестве с Российским университетом транспорта Платформа вошла в состав стенда Министерства транспорта Российской Федерации на выставке при V Конгрессе молодых ученых (https://gcras.ru/news.php?n=1222) (рисунок 4.8).

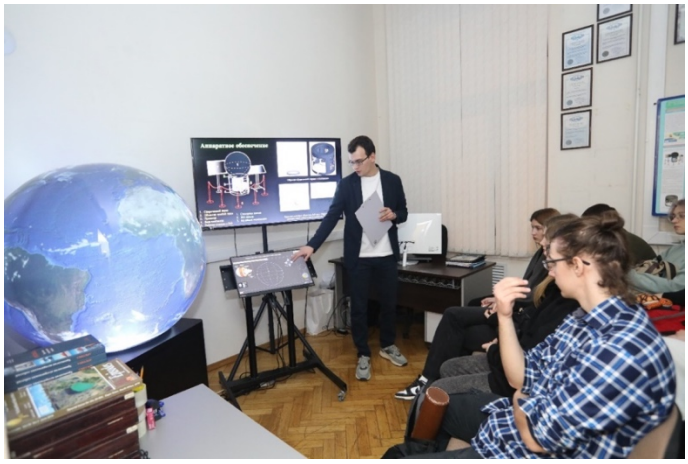


Рисунок 4.7 – При использовании Платформы проведена лекция для студентов кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ



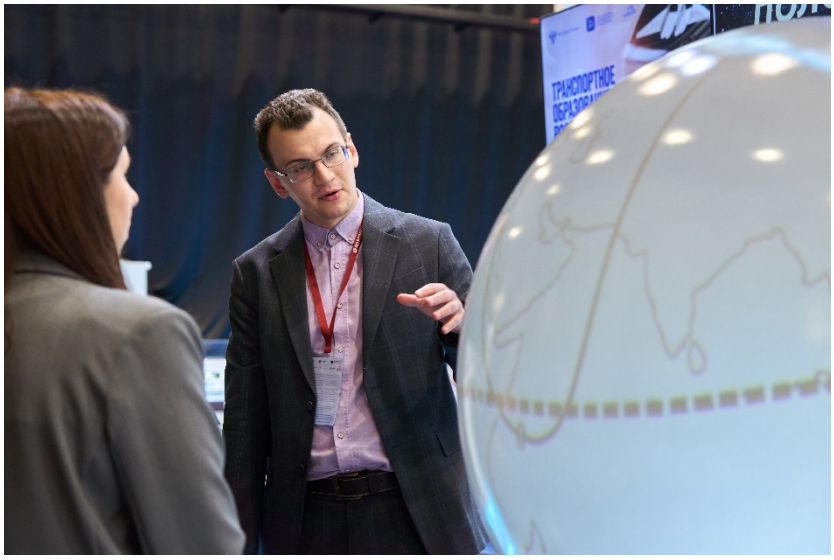


Рисунок 4.8 – Экспонирование Платформы на выставке при V Конгрессе молодых ученых

4.3 Геологические исследования

В 2025 году геологические исследования по циклостратиграфии включали обработку фактического материала по конкским отложениям Восточной Грузии для получения первичных данных о магнитостратиграфии этих толщ, а также выявление условий накопления отложений верхнего миоцена по геохимическим данным на примере разреза Железный Рог (Таманский полуостров).

4.3.1 Результаты магнитостратиграфических исследований

В 2025 году проведены исследования конкских отложений Восточной Грузии (разрез Уджарма) для получения данных о первичной палеомагнитной записи горных пород.

Исследования проводились гл. науч. сотр. Ю.В. Ростовцевой и ст. науч. сотр. А. С. Кудашиным ГЦ РАН совместно со ст. науч. сотр. Н. В. Сальной ГИН РАН, ст. науч. сотр. О. В. Пилипенко ИФЗ РАН и ст. науч. сотр. К. Коиава Института геологии имени А. Джанелидзе (Грузия).

В ходе работ на образцах коллекции проведен комплекс петро- и палеомагнитных исследований – изучена магнитная восприимчивость и ее анизотропия по разрезу, выпол-

нены петромагнитные исследования, проведено полное терморазмагничивание естественной остаточной намагниченности [*Сальная и др.*, 2025а; *Сальная и др.*, 2025б] (рисунок 4.9).

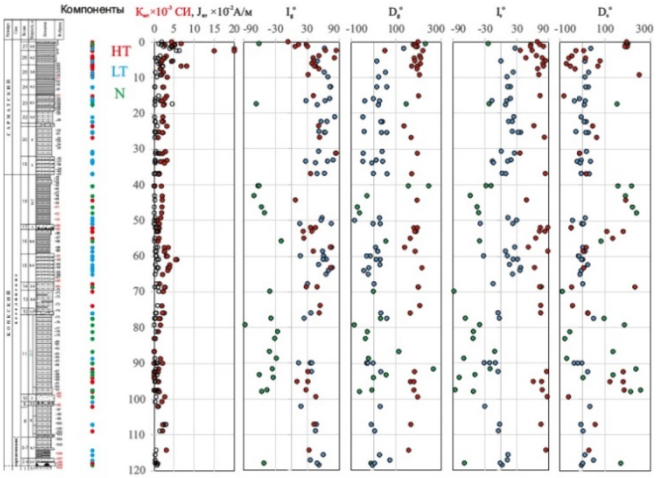


Рисунок 4.9 – Литология, схема отбора и графики Jn, Км, Ig, Dg, Is, Ds по разрезу конкских отложений разреза Уджарма (Восточная Грузия). Jn – естественная остаточная намагниченность (ед. А/м), Км – магнитная восприимчивость (ед. Си), Ig – наклонение магнитного поля в географической системе координат, Dg – склонение магнитного поля в географической системе координат, Is – наклонение магнитного поля в стратиграфической системе координат, Ds – склонение магнитного поля в стратиграфической системе координат

Полученные результаты показывают наличие компоненты перемагничивания, возникшей после складкообразования и возможного разворота той структуры, где расположен разрез. Однако в разрезе Уджарма есть возможность разделения доскладчатой (HT) и послескладчатой (LT) компонент благодаря их большому угловому несогласию. При этом полярность компонент HT и N может быть сохранна и использована для предварительной корреляции с другими одновозрастными отложениями, что позволит сопоставить также данные по циклостратиграфии.

4.3.2 Результаты палеореконструкций осадконакопления

Расшифровка циклостратиграфических данных проводится на основе детального изучения литологического строения отложений и палеореконструкций обстановок осадконакопления, позволяющих выявлять полноту геологической летописи, а именно отсутствие или наличие перерывов в седиментации.

С целью выявления изменчивости фациальных условий формирования верхнемиоценовых отложений Восточного Паратетиса (разрез Железный Рог) были реконструированы обстановки осадконакопления этих толщ по геохимическим данным [*Ростовцева и Попов*, 2025]. Выявлено, что седиментация рассматриваемых отложений происходила при разной степени насыщения кислородом придонных вод, на фоне общего обмеления бассейна и изменчивой солености (рисунок 4.10). Изучаемые толщи являются показательным объектом для выверки результатов геохимических исследований, так как по ним имеются детальные палеонтологические данные.

Для реконструкции окислительно-восстановительных характеристик придонных вод был рассчитан коэффициент стагнации ((Mo/Mn)x100). Обстановки с признаками снижения или отсутствия придонных концентраций кислорода выделяются в начале раннего

мэотиса и в раннем понте, где отмечаются более высокие значения рассматриваемого индекса. Значительная часть изучаемых отложений накапливалась в окислительных условиях.

По более высоким значениям индекса Cr/Ni установлены более мелководные условия седиментации в конце сармата и раннего мэотиса, позднем мэотисе и понте, в отличие от отложений раннего мэотиса, накопившихся в более глубоководной обстановке.

По содержанию B и отношению B/Ga в конце сармата соленость вод была ниже, чем в начале мэотиса. В начале мэотиса наблюдается резкое повышение солености. В начале позднего мэотиса были частые кратковременные поступления морских вод. При пониженной солености в основном происходило накопление отложений в конце мэотиса и понте.

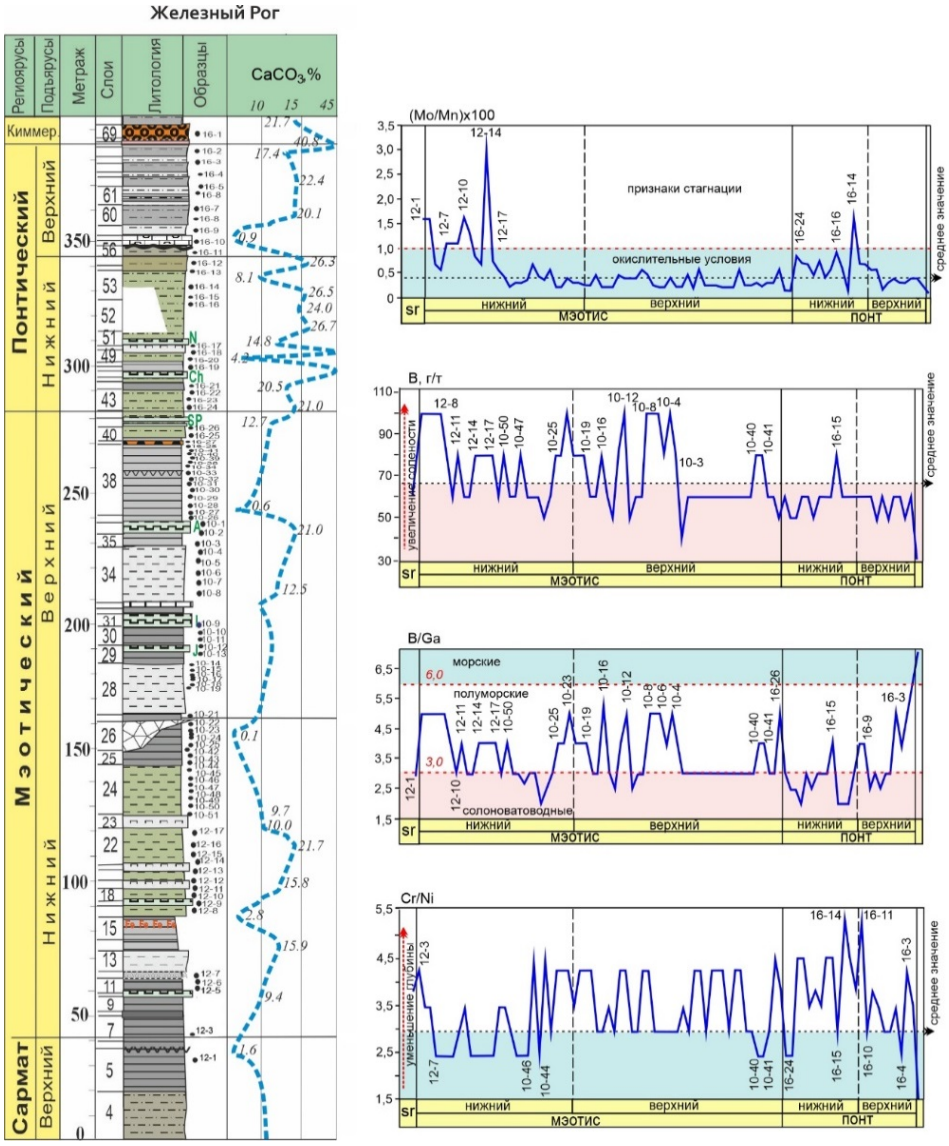


Рисунок 4.10 – Геохимическая характеристика по валовым пробам сармат-понтических глинистых отложений разреза Железный Рог. Sr – сарматский регионарус

4.3.3 Заключение

В 2025 году геологические исследования по циклостратиграфии осуществлялись в двух основных направлениях. Первое направление было связано с выявлением магнитостратиграфической записи в конкских отложениях среднего миоцена Восточной Грузии (разрез Уджарма), второе – с выявлением фациальных условий формирования толщ неогена Восточного Паратетиса по геохимическим данным (разрез Железный Рог и другие объекты).

Полученные результаты показывают наличие компоненты перемагничивания, возникшей после складкообразования и возможного разворота той структуры, где расположен разрез. Однако в разрезе Уджарма есть возможность разделения доскладчатой (HT) и послескладчатой (LT) компонент благодаря их большому угловому несогласию. При этом полярность компонент HT и N может быть сохранна и использована для предварительной корреляции с другими одновозрастными отложениями, что позволит сопоставить также данные по циклостратиграфии.

Восстановление фациальных условий формирования отложений показало, что применение при этом геохимических индексов требует анализа литологического строения толщ, так как по особенностям наличия различных примесей распределение части химических элементов характеризуется многофакторным контролем, отражающимся в погрешностях.

4.4 Построение детальной модели литосферы и верхней мантии южной части РФ и сопредельных территорий

Главной задачей 2025 года по построению детальной модели литосферы и верхней мантии южной части РФ и сопредельных территорий был сбор имеющихся геолого-геофизических данных о строении коры и верхней мантии, а также о физических полях и представление этих данных на унифицированных сетках для последующего построения комплексных моделей литосферы. Эта задача была успешно выполнена. Создана база данных основных параметров литосферы (Мохо, мощность осадков, предварительное распределение плотности и температуры в верхней мантии), а также основных редукций гравитационного поля.

Южная часть РФ характеризуется сложной геодинамической обстановкой, которая обусловлена взаимодействием активных тектонических процессов. Поэтому информация о детальном строении литосферы критически важна для понимания этих процессов. На первом этапе была построена исходная модель, основанная на имеющихся геолого-геофизических данных, которая будет использована в качестве основы для построения окончательных моделей на следующих этапах.

Для построения исходной модели коры и верхней мантии южной части РФ и сопредельных областей была выбрана зона в пределах 20°–60° в. д., 35°–57° с. ш. Такая большая область необходима, так как находящиеся в её пределах зоны столкновения литосферных плит играют важную роль в динамике литосферы южной части РФ.

4.4.1 Построение исходной модели коры

Для построения исходной модели коры использовались в основном данные из работы [*Tesauro et al*., 2008], дополненные новыми данными. Определялись положение кристаллического фундамента (мощность осадков) и границы Мохоровичича (М), а также распределения сейсмических скоростей и плотности в осадочном чехле и консолидированной коре. Горизонтальное разрешение карты осадков составляет 5’ x 5’, а границы М – 1° x 1°. Мощность осадков и глубины до границы Мохо показаны на рисунке 4.11.

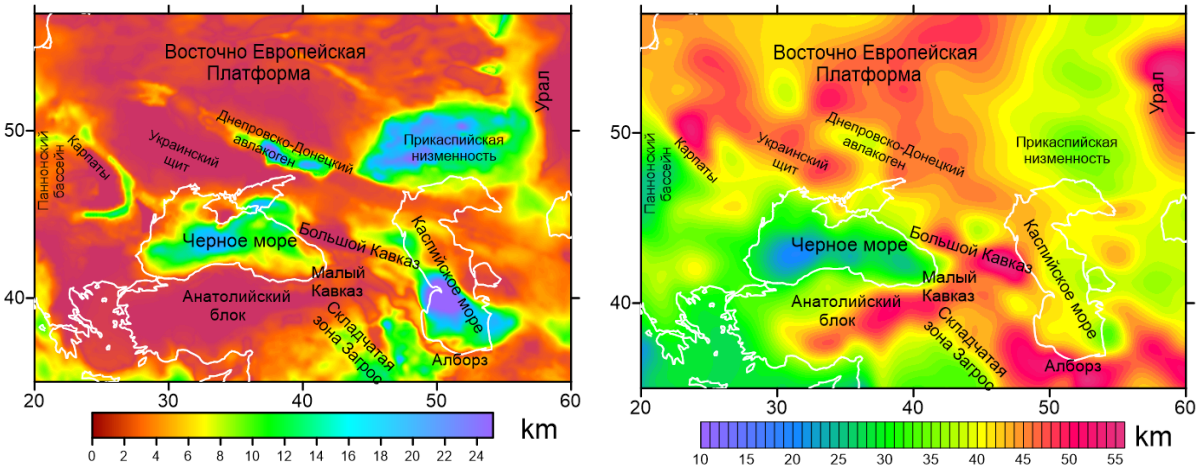


Рисунок 4.11 – Мощность осадков (слева) и глубина до границы Мохо от уровня моря (справа)

4.4.2 Предварительная модель верхней мантии

Для построения предварительной модели верхней мантии использовалась новейшая томографическая модель REVEAL [*Thrastarson et al*., 2024], обладающая наилучшим разрешением (0,5° по горизонтали и 10 км по вертикали). По вариациям скорости сейсмических волн были рассчитаны предварительные модели распределения температуры и плотности в мантии до глубины 700 км. Это сделано с использованием соотношения физики минералов с учетом неупругих и ангармонических эффектов по методике [*Tesauro et al*., 2014]. На последующих этапах работы предполагается скорректировать эту модель путем решения обратной задачи с использованием нескольких геофизических полей. Распределение плотности для глубин 100 и 200 км показано на рисунке 4.12. Распределение температуры обратно коррелировано с распределением плотностей.

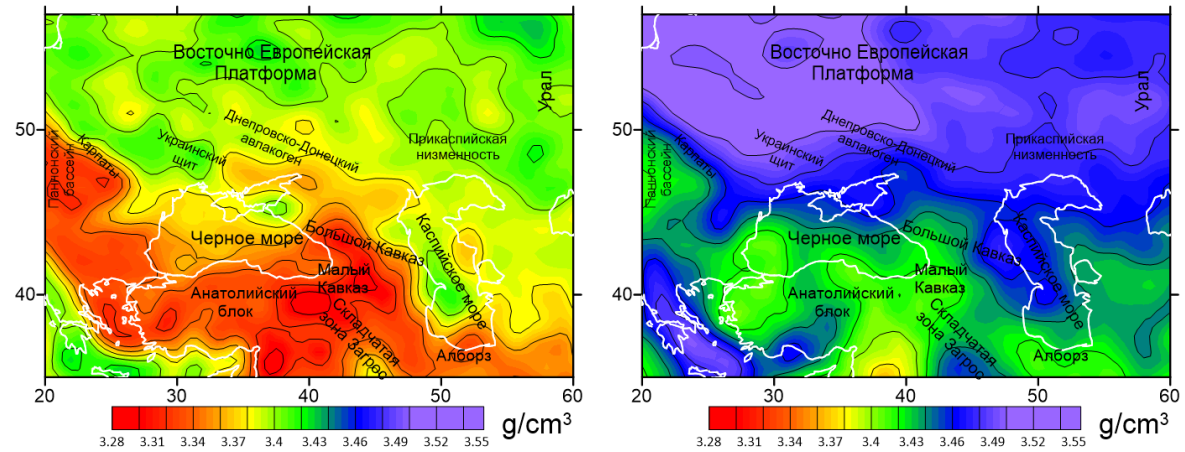


Рисунок 4.12– Распределение плотности на глубинах 100 км (слева) и 200 км (справа)

4.3.3 Расчет различных трансформаций гравитационного поля

В результате анализа гравитационных моделей высокого разрешения было показано, что EIGEN-6c4 [*Förste et al.*, 2014] является наилучшей, она и была выбрана в качестве рабочей. На основании аномалий (возмущений) в свободном воздухе было рассчитано несколько трансформаций (рисунок 4.13), в первую очередь аномалии Буге, изостатические и декомпенсационные аномалии, которые будут использоваться на следующих этапах работы.

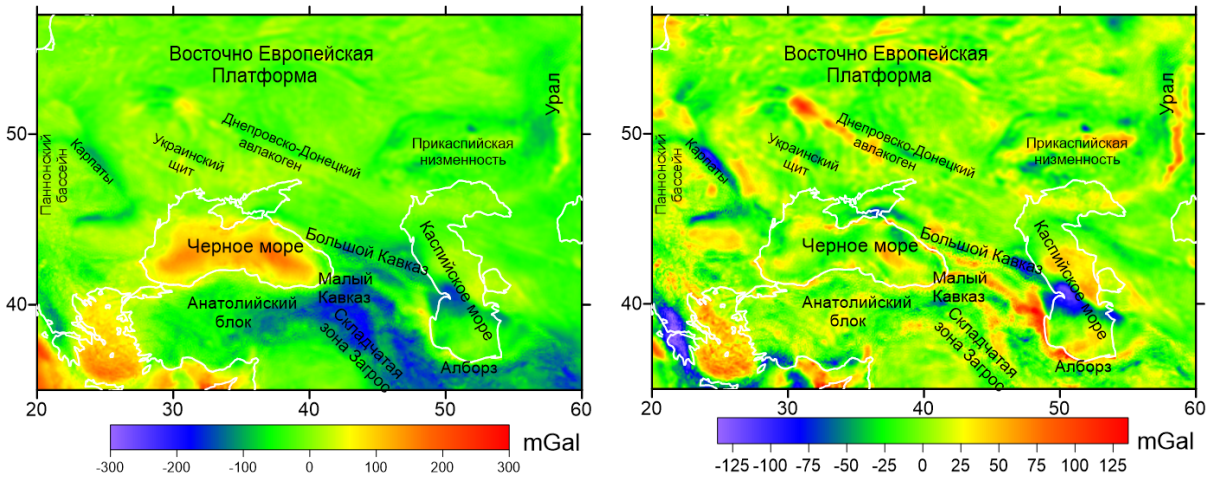


Рисунок 4.13 – Аномалии Буге (слева) и изостатические аномалии (справа) гравитационного поля

4.4.4 Заключение

В результате работ на первом этапе исследования была подготовлена многопараметрическая трёхмерная модель коры и верхней мантии для южной части РФ и сопредельных районов. Впервые на единых сетках были систематизированы имеющиеся данные, полученные различными методами. Кроме того, были систематизированы данные о различных геофизических полях для данного региона. Таким образом, план первого года исследований по данной теме полностью выполнен. На последующих этапах работы предварительная модель будет скорректирована путём решения обратной задачи с использованием различных полей, в первую очередь, гравитационного поля, его вертикальных градиентов и динамической топографии. Кроме того, собранная база данных может быть использована в широком спектре исследований в данном районе.

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

В рамках промежуточного этапа выполнения НИР получены предварительные результаты, направленные на повышение достоверности уточнения параметров раннеинструментальных землетрясений Кавказа, что способствует улучшению точности каталогов и оценке сейсмической опасности региона.

Продолжено составление исторического обзора развития инструментальных наблюдений на Кавказе, в частности, за период 1948–1965 гг. Показано, что катастрофическое Ашхабадское землетрясение 1948 г. стало ключевым фактором, определившим необходимость коренной реорганизации сейсмологической службы СССР. В результате в 1950–1960-е гг. произошло интенсивное развитие сети наблюдений: на Кавказе было открыто 12

новых сейсмических станций и проведена модернизация аппаратуры на большинстве ранее действовавших пунктов. Унификация приборной базы и внедрение стандартных методик наблюдений и обработки обеспечили сопоставимость данных и существенно повысили их качество.

К 1965 г. на Кавказе функционировало около 26 сейсмических станций, что позволило снизить порог представительной регистрации землетрясений до $M = 4{,}0$ и значительно повысить точность определения их параметров. Создание Единой системы сейсмических наблюдений в СССР стало логическим итогом данного этапа развития и обеспечило переход к централизованной, стандартизированной системе сбора и обработки сейсмологических данных.

Предусматривалось создание пяти зональных сетей: Западной (для Карпатской и Крымской сейсмоактивных зон), Кавказской, Копетдагской, Сибирской (для Алтайской и Байкальской сейсмоактивных зон) и Дальневосточной. Кавказская зональная сеть сейсмических станций состояла из зонального центра и подчиненных ему опорных и региональных сейсмических станций, расположенных на территории Грузинской, Азербайджанской и Армянской ССР, и Северного Кавказа в пределах координат 38°–46° с. ш.; 38°–54° в. д.

Административно-хозяйственное подчинение сейсмических станций Кавказской сети определялось их ведомственной принадлежностью. Научно-методическое руководство в части производства сейсмических наблюдений должен был осуществлять Кавказский зональный центр ЕССН – Институт геофизики АН Грузинской ССР.

Построена усреднённая одномерная скоростная модель V_p/V_s для региона (таблица 4.4), оптимизированная на основе 133 времен прихода *P*- и *S*-волн от эталонных событий класса GT5 середины XX века [*Bondár and McLaughlin,* 2009] с использованием нелинейной инверсии методом Левенберга–Марквардта [*Gavin*, 2019]. Модель интегрирует данные [*Zabelina et al*., 2016] для глубин 65–120 км и глобальную модель ak135 [*Kennett et al*., 1995] ниже 120 км, компенсируя отсутствие глубокофокусных событий в выборке. Проверка на эталонном событии 7 декабря 1988 г. в программе NAS [*Fedorov et al*., 2019] подтвердила эффективность модели для локации. Эллипсы ошибок вычисленного и эталонного эпицентров пересекаются. Это подтверждает корректность модели для локации эпицентров землетрясений первой половины XX века по данным исторических станций.

Таблица 4.4 – Усреднённая одномерная скоростная модель для определения координат эпицентров землетрясений Кавказа первой половины XX века

Глубина, *км*	V_p, *км/с*	V_s, *км/с*	V_p/V_s	Примечание
0–6	5,698	3,349	1,70	
6–21	6,198	3,499	1,77	
21–65	6,898	3,999	1,73	
65–120	7,800	4,700	1,66	как в [3]
>120				как в *ak135* [4]

Полученные результаты создают методическую базу для дальнейшей переоценки гипоцентров и магнитуд раннеинструментальных землетрясений Кавказа с использованием программ NAS и ProLom, региональных моделей и полного набора инструментальных данных. Это позволит повысить надёжность сводных каталогов и внесёт вклад в уточнение сейсмического районирования Кавказа.

4.6 Актуализация базы данных спутниковой альтиметрии. Анализ сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского, Черного, Белого и Баренцева морей. Расчёт систематической ошибки в альтиметрических измерениях спутников для этих морей. Волновой и ледовый режим Ладожского и Онежского озёр

4.6.1 Актуализация базы данных спутниковой альтиметрии ИБДСА

В 2025 году с сайта AVISO (ftp-access.aviso.altimetry.fr:21) пополнена база исходных данных альтиметрических измерений спутников Jason-3, SARAL/AltiKa и SWOT для формирования Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии (ИБДСА). Также обновлены данные спутника TOPEX/Poseidon до версии F. Кроме того ИБДСА была пополнена данными спутников Jason-3/6, SARAL/AltiKa, CryoSat-2, SWOT и Sentinel-3a/3b из базы Radar Altimeter Database System (RADS) (http://rads.tudelft.nl/rads/status.shtml). Общий объем данных в архивированном виде составил более 42 Тбайт.

Климатические изменения основных параметров состояния морской среды приводят к возникновению различных неблагоприятных ситуаций для жизнедеятельности и здоровья человека. Этим объясняется актуальность исследования сезонной и межгодовой изменчивости основных гидрометеорологических параметров состояния морей и внутренних водоёмов России. Для проведения этих исследований оптимальными являются данные спутниковой альтиметрии, которые активно используются для исследования сезонной и межгодовой изменчивости уровня, значимых высот волн и скоростей приводного ветра как Мирового океана, так морей и внутренних водоёмов России. Для этого в ГЦ РАН создана Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА), которая регулярно пополняется новыми данными дистанционного зондирования.

4.6.2 Анализ сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского, Черного, Белого и Баренцева морей. Расчёт систематической ошибки в альтиметрических измерениях спутников для этих морей

Для анализа сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского и Черного морей были выбраны данные альтиметрических спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2/3 (J1/2/3). Для Белого и Баренцева морей были выбраны данные спутников GEOSAT, ERS-1/2, GFO-1, Envisat, Cryosat-2, SARAL, Sentinel-3a/3b. Данные альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3 использовались только для южной части Белого моря (южнее 66° с. ш.).

Результаты расчётов систематической ошибки в альтиметрических измерениях спутников, работающих в тандеме для акваторий европейских морей России представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Средняя по акватории систематическая ошибка (см) в альтиметрических измерениях спутников, работающих в тандеме для акваторий европейских морей России

Спутники, работающие в режиме тандема	Балтийское море	Черное море	Белое море	Баренцево море
T/P – J1	+6,75±2,86	+7,45±2,57	+2,61±0,27	–
J1 – J2	–4,75±2,86	–5,59±1,58	–1,83±0,34	–
J2 – J3	+5,37±1,67	+6,94±2,02	+4,45±1,78	–
ERS–1 – ERS–2	+3,41±0,67	+2,14±0,87	+1,37±0,94	+1,37±0,94
ERS–2 – Envisat	–2,08±0,35	–1,78±0,65	–3,07±0,92	–5,03±1,07

По данным спутниковой альтиметрии уровень Балтийского, Черного, Белого и Баренцева морей начиная с 1992 по 2021 годы изменялся неодинаково (рисунок 4.14). Также и тренд изменчивости уровня морей был разным. Максимальный тренд +3,64±0,27 мм/год наблюдался в Балтийском море, а минимальный +2,31±0,49 мм/год в Баренцевом море. В Чёрном и Белом морях скорости подъёма уровня примерно равны: +2,27±0,45 мм/год и +2,87±0,71 мм/год соответственно.

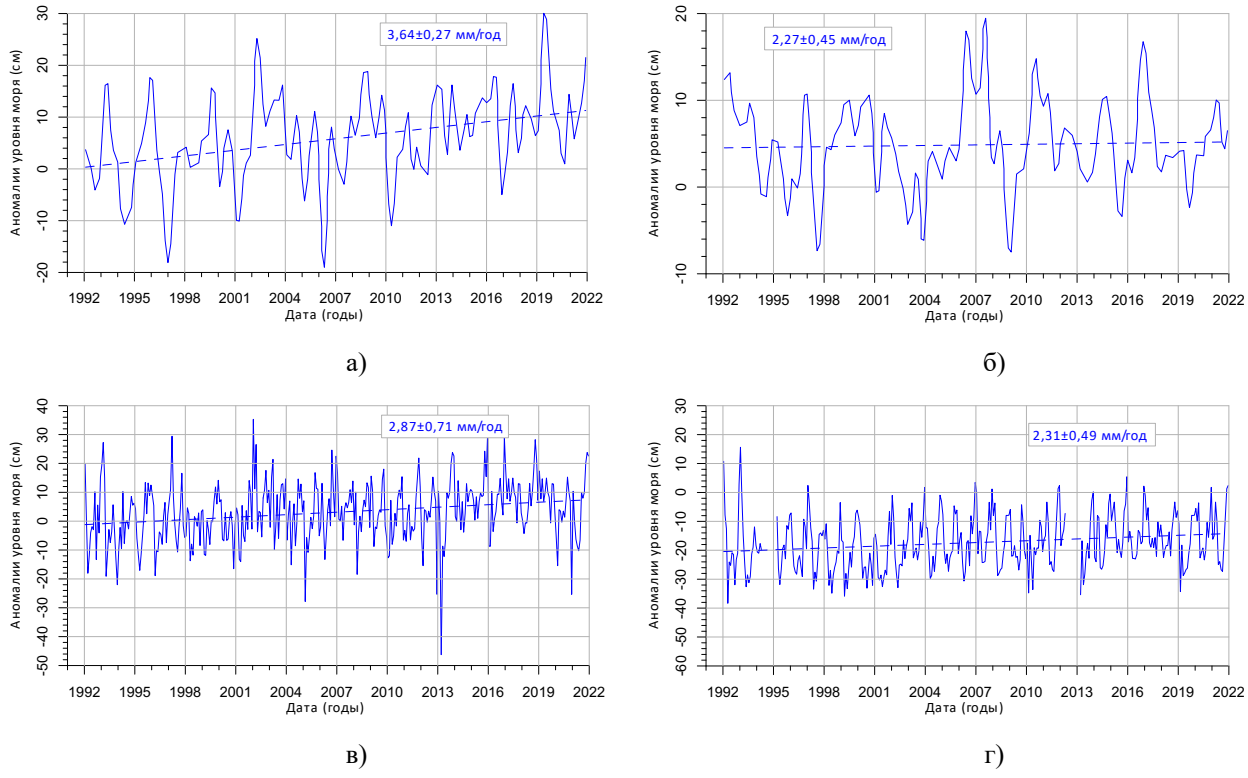
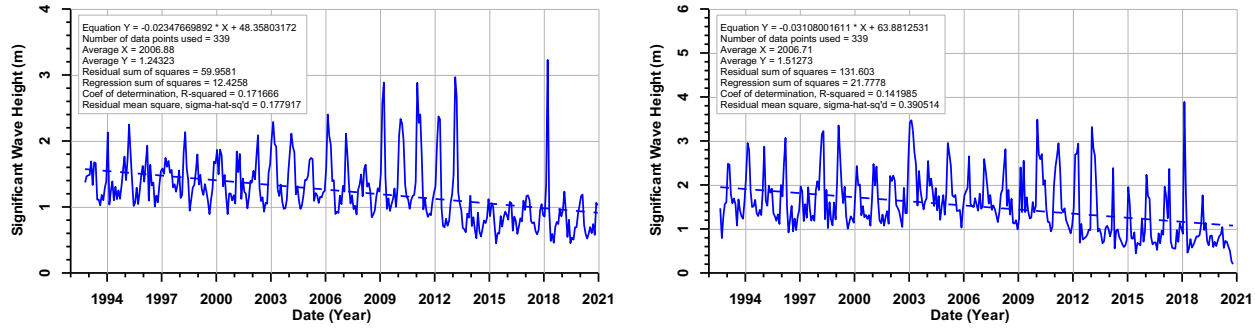


Рисунок 4.14 – Межгодовая изменчивость аномалий уровня Балтийского (а), Черного (б), Белого (в) и Баренцева морей (г) по данным спутниковой альтиметрии за период 1991–2021 гг.

4.6.3 Волновой и ледовый режим Ладожского и Онежского озёр

Межгодовая изменчивость значимых высот волн (ЗВВ) после калибровки данных альтиметрических измерений спутников Jason-1/2/3/6 относительно данных спутника TOPEX/Poseidon приводит к статистически незначимым уточнениям для Ладожского

и Онежского озёр за 28 лет (1993–2021 гг.) составила –0,0231±0,0134 м/год и –0,0312±0,0183 м/год соответственно (рисунок 4.15)

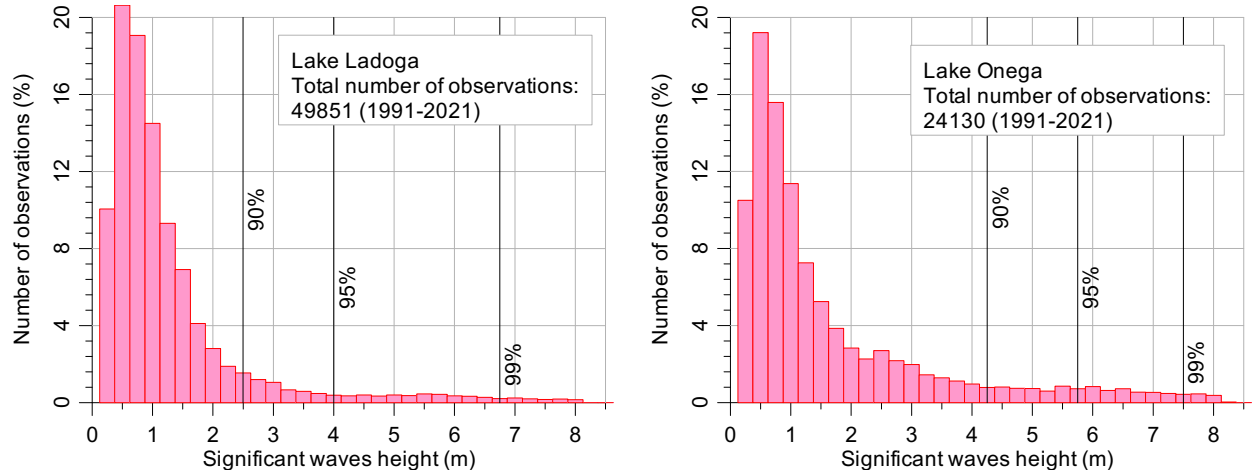


а) б)

Рисунок 4.15 – Межгодовая изменчивость ЗВВ на акватории Ладожского (а) и Онежского (б) озер по данным спутниковой альтиметрии за 1993–2021 гг.

Анализ распределения значимых высот волн по данным спутниковой альтиметрии для Ладожского и Онежского озёр показал, что для процентиля 90% экстремальными являются волны > 2,5 м и > 4,25 м соответственно, для процентиля 95% – > 3,75 м и > 5,75 м и для процентиля 99% – > 6,75 м и > 7,5 м (рисунок 4.16). Различие в критерии экстремальности показывает, как отличается волновой режим этих морей.

Амплитуды экстремальных значимых высот волн также уменьшаются со скоростью –0,014±0,011 м/год и –0,006±0,001 м/год соответственно.



а) б)

Рисунок 4.16 – Распределение значимых высот волн (м) по данным спутниковой альтиметрии на акватории Ладожского (а) и Онежского (б) озёр за период 1992–2021 гг.

Наличие льда на акватории озёр оценивалось на основе классификации форм отражённого импульса, разработанного в ГЦ РАН в 2024 году (см. отчёт за 2024 год). Анализ климатической изменчивости ледового режима Ладожского и Онежского озёр по данным альтиметрических измерений за 1993–2021 гг. показал, что время становления ледяного покрова на акватории этих озёр имеет небольшой, но заметный тренд 1–6 дней в более поздние сроки, а время вскрытия озёр ото льда – 14 дней в более ранние сроки. Продолжительность безлёдного периода возросла в среднем с 215 дней до 227 дней.

4.7 Расширение функционала геопортала «Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности»

В рамках этапа НИР в 2025 г. выполнено расширение функционала созданного ранее геопортала «Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности» (https://seismgis.gcras.ru/) путём добавления вспомогательных слоёв геолого-геофизических данных, используемых при расчёте характеристик объектов для выполнения распознавания методом EPA (Earthquake-Prone Areas), а также самого инструмента расчёта таких характеристик. ГИС включает следующий набор цифровых тематических слоёв и геопространственных данных: географическая основа регионов; калиброванные каталоги землетрясений; результаты морфоструктурного районирования (МСР); результаты EPA-распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений; результаты распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений алгоритмом «Барьер»; результаты определения высокосейсмичных зон с помощью системы FCAZ; значения коэффициентов Общего закона подобия землетрясений в узлах регулярной сетки и в пересечениях морфоструктурных линеаментов; результаты моделирования динамики блоковой структуры и сейсмичности, состоящие из схемы блоковой структуры и каталога искусственных землетрясений. Все пересечения линеаментов, опубликованные в веб-ГИС, описаны единым набором характеристик и измерены в круговых окрестностях пересечений радиуса 25 км [*Соловьев и др.*, 2016, 2017; *Горшков и др.*, 2018]. Большая часть измерений осуществлялась с цифровых карт формата ГИС.

Привлекаемые геолого-геофизические данные представляют собой цифровые модели, полученные с использованием спутниковых данных. Необходимые характеристики рассчитываются по следующим цифровым картам:

1. Цифровая карта магнитных аномалий WDMAM версии 2 с разрешением 3 минуты, территория покрытия – весь мир [*Lesur et al.*, 2016].
2. Карта гравитационных аномалий Буге модели EIGEN-6c2, вычисленная по данным спутника GOCE [*Förste et al.*, 2012; *Shako et al*., 2013]. Разрешение – 5 минут, территория покрытия – Российская Федерация, страны Восточной Европы, страны Западной, Средней и Восточной Азии.
3. Карта цифровой модели рельефа GEBCO, построенная по данным спутников SRTM, SEASAT, GEOSAT и ERS-1, разрешение составляет 30 секунд, территория покрытия – весь мир.

В качестве хранилища растровых данных используется серверная ГИС NextGIS Web. Для вспомогательных слоёв геолого-геофизических параметров доступен просмотр легенды слоя в соответствующей панели. Блок геолого-геофизических данных также допускает расширение при необходимости включения дополнительной информации.

В рамках модернизации ГИС реализовано программное решение – инструмент геообработки на языке Python, позволяющий в интерактивном режиме автоматически определять значения необходимых характеристик для точек, выбранных и заданных пользователем, из базы геопространственных данных. Это усиливает объективность и воспроизводимость результатов метода EPA. Основные этапы работы инструмента:

1. Чтение входных параметров.
2. Построение круга для каждой точки из заданного набора. На данном этапе вычисляются расстояния между точкой из заданного списка и точками карты. Далее отбираются расстояния, которые меньше или равны заданному радиусу.
3. Расчёт значений пикселей в радиусе от заданной точки.

4. Вычисление необходимых параметров.
5. Копирование исходной таблицы значений для заданных точечных данных.
6. Добавление к копии точечных данных столбцов со значениями рассчитанных параметров для каждой точки.

Разработанный инструмент позволяет рассчитать в окрестностях задаваемых пересечений такие характеристики, как максимальное и минимальное значение, разницу между максимальным и минимальным значением, расстояние между точками с максимальным и минимальным значениями, а также отношение разности максимального и минимального значений к расстоянию между ними. Инструмент поддерживает расчёт указанных выше параметров для трёх геолого-геофизических характеристик: магнитных аномалий; аномалий Буге и батиметрии.

В качестве входных данных для работы инструмента задается слой с точечными данными, в окрестностях которых будут рассчитаны параметры, и слой геолого-геофизических данных в зависимости от характеристик, которые необходимо рассчитать (рисунок 4.17). Также пользователем указывается радиус поиска потенциальных аномалий (в километрах) и регион поиска (область отсечения – необязательный параметр).

Результат работы инструмента представляет собой копию слоя выбранных точек с добавлением в атрибутивную таблицу рассчитанных значений геолого-геофизических характеристик в заданной окрестности. Результат расчёта параметров в окрестностях заданных точек доступен для скачивания из панели «Результаты». Результатом загрузки является архив данных в формате «.zip», который содержит основной shape-файл с данными, дополнительные файлы для отображения данных в ГИС-системах (QGIS, NextGIS QGIS, ArcGIS и др.), а также таблицу Excel, дублирующую всю атрибутивную информацию объектов.

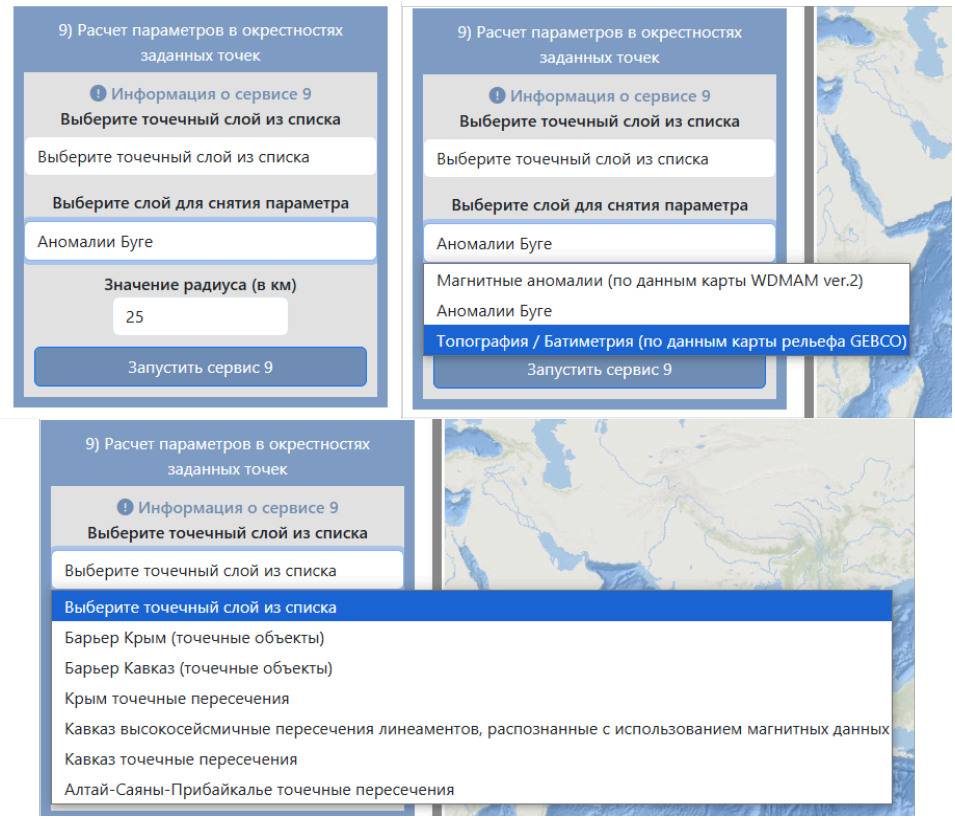


Рисунок 4.17 – Внешний вид инструмента расчёта параметров и задание входных параметров

4.8 Разработка приложения ГИС «Науки о Земле – Кластерный анализ»

4.8.1 Приложение ГИС «Науки о Земле – Кластерный анализ»

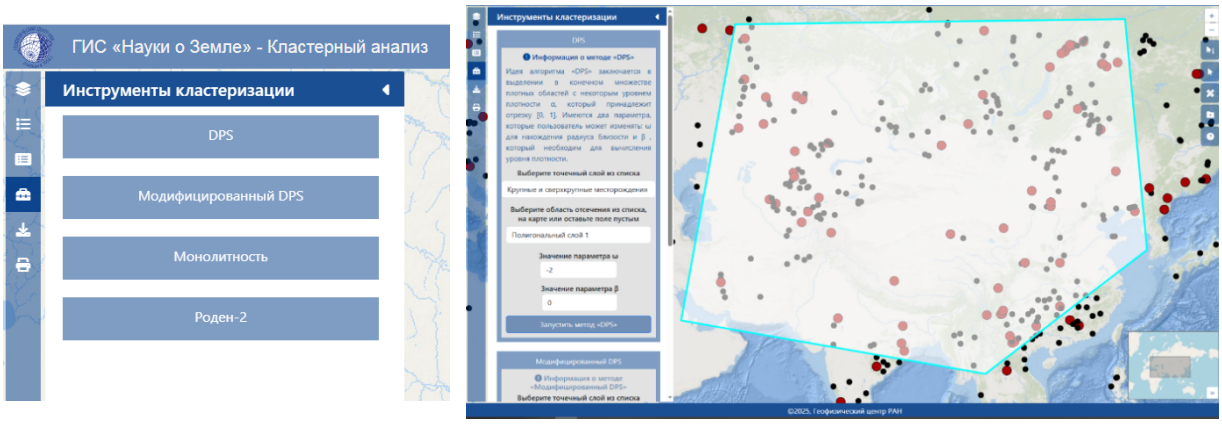
В рамках НИР в 2025 г. создано веб-ориентированное приложение ГИС «Науки о Земле – Кластерный анализ», позволяющее проводить анализ данных с использованием инструментов геообработки, в основе которых лежат авторские методы кластеризации на базе созданного в ГЦ РАН дискретного математического анализа (ДМА). При этом использованы следующие открытые решения: фреймворк Flask [*Flask*…] для организации работы серверной части и библиотека OpenLayers [*OpenLayers*…] для создания веб-карты и визуализации геопространственных данных. Веб-ГИС приложение разработано в среде программирования JavaScript. Интерфейс приложения представлен на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Общий вид приложения ГИС «Науки о Земле – Кластерный анализ»

Интегрированные алгоритмы кластеризации на основе ДМА в данном способе реализации применимы только к точечным данным, поэтому для удобства работы в дерево слоёв включен ограниченный набор слоев данных, содержащих точечные объекты. Стиль отображаемых слоёв точечных данных описан с использованием библиотеки OpenLayers. Добавление данных на карту в виде векторных тайлов позволяет просматривать атрибутивную информацию каждого объекта слоя при включении режима показа атрибутивной информации.

Интеллектуальную основу приложения составляют алгоритмы кластеризации, созданные в рамках ДМА, который представляет собой подход к изучению многомерных массивов и временных рядов, базирующийся на нечеткой математике и нечеткой логике [*Гвишиани и др.*, 2010, *Agayan et al.*, 2018]. В настоящее время для запуска в качестве инструментов геообработки доступно четыре метода кластеризации: DPS; Модифицированный DPS; Монолит; Роден-2. Краткое описание каждого алгоритма и параметров для его выполнения, включая возможные значения/диапазон значений, приводятся в разделе «Информация о методе» (рисунок 4.19).



а) б)

Рисунок 4.19 – Панель инструментов кластеризации: а) список доступных инструментов; б) пример заполнения окна ввода параметров

Результат работы каждого алгоритма добавляется на карту в виде отдельного слоя с заданной легендой. Вся атрибутивная информация объектов сохраняется и соответствует объектам исходного слоя. При необходимости результат работы может быть загружен в виде архива, содержащего shape-файл, а также необходимые вспомогательные файлы. В разделе «Печать карты» результат работы алгоритмов кластеризации можно сохранить в виде изображения в формате PNG или PDF-файла с заданным размером страницы и разрешением.

4.8.2 Интеграция приложения в геопортал ГИС «Науки о Земле»

Также в ходе этапа НИР 2025 г. осуществлена модернизация информационной инфраструктуры ГИС «Науки о Земле» на базе отечественной программной платформы «1С-Битрикс: Управление сайтом». Создана обновленная версия геопортала ГИС «Науки о Земле», доступная по адресу https://gis.gcras.ru и включающая в себя данные из различных тематических категорий, их описание, а также инструменты кластерного анализа. Основное меню геопортала ГИС «Науки о Земле» и включает в себя следующие разделы: карта, инструменты геообработки, описание данных, метаданные, описание инструментов геообработки, публикации, о проекте. Общая информация на странице геопортала доступна на двух языках: русском и английском. Разработанное приложение «Науки о Земле – Кластерный анализ» интегрировано в веб-ГИС «Науки о Земле» и доступно во вкладке «Инструменты геообработки» для просмотра и выполнения кластерного анализа. В качестве способа интеграции выбрана технология встроенного фрейма (iframe).

Основной раздел «Карта» содержит встроенный сервис просмотра карт (рисунок 4.20). В качестве способа интеграции была также выбрана технология встроенного фрейма, как и в случае веб-ГИС в разделе «Инструменты геообработки». Представленная веб-карта содержит данные по различным тематическим категориям. Каждая группа содержит набор слоёв различных типов данных.

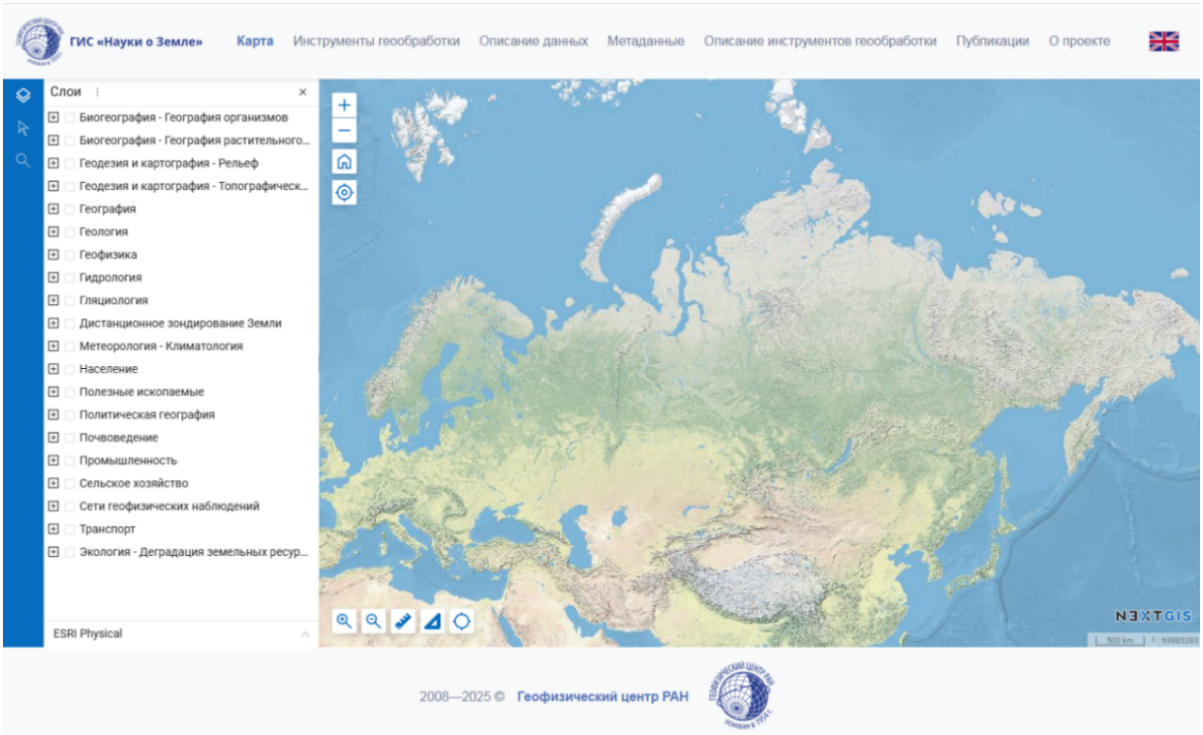


Рисунок 4.20 – Интерфейс раздела «Карта» геопортала ГИС «Науки о Земле»

Раздел «Метаданные» содержит таблицу с описанием всех данных, которые добавлены в ГИС «Науки о Земле» и представлены в разделе «Карта» на текущий момент. Описание всех данных выполнено с использованием единой унифицированной формы.

4.8.3 Геопортал геотермического атласа Сибири и Дальнего Востока

В рамках научного сотрудничества с Институтом нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) создан тематический геопортал, основанный на каталоге данных о глубинах криолитозоны, плотности теплового потока и температуре на различных глубинных уровнях, объединенном в геотермический атлас [*Дучков и др.*, 2012]. Каталог формировался на протяжении нескольких десятилетий и включает значительное количество уникальных измерений, выполненных на территории Западной Сибири и Дальнего Востока России.

В рамках НИР в 2025 г. выполнены работы по созданию новой версии геопортала и клиентского веб-приложения с учетом обновления базы исходных данных. Представленные данные включают три основных параметра: плотность теплового потока, глубину нижней границы криолитозоны и температуру (на пяти различных глубинах – 0,5, 1, 2, 3 и 5 км). Исходные данные получены преимущественно как результаты измерений в скважинах, бурившихся в рамках работ по разведке нефтегазоносных месторождений. Атрибутивная таблица для каждой точки содержит сведения о географическом положении (регион, участок, координаты, высота), номере скважины, а также точные значения температур на заданных глубинах и плотность теплового потока. Веб-приложение геопортала функционирует на базе информационной инфраструктуры NextGIS Web и включает в себя весь базовый инструментарий. Геопортал является открытым ресурсом с доступом по адресу: http://sibgeotherm.gcras.ru/ (рисунок 4.21).

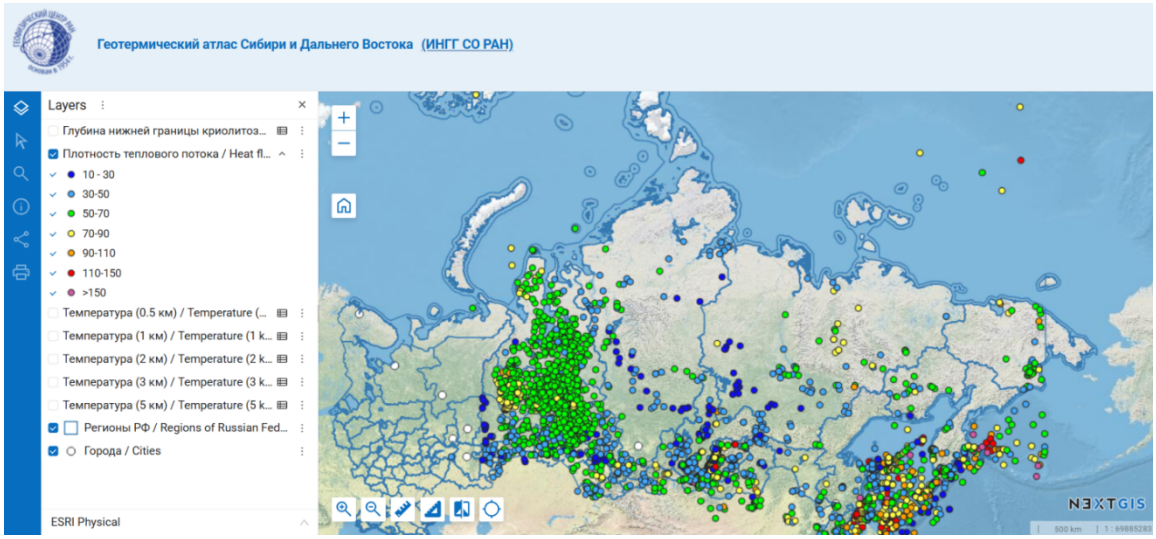


Рисунок 4.21 – Пример отображения древа проекта и оформления точечных данных в рамках интерфейса Геотермического атласа Сибири

4.9 Создание и развитие инфраструктуры ГИС для представления и анализа данных о Луне

Работа была направлена на сбор, систематизацию и унификацию открытых геопространственных данных о Луне и создание веб-ресурса для их совместной визуализации и предварительного анализа. В результате сформирован единый каталог лунных данных и разработан геопортал «Комплексная база данных о Луне», обеспечивающий отображение и базовую геообработку растровых и векторных материалов в лунной системе координат [*Соловьев и др.*, 2025].

4.9.1 Сбор и обработка геопространственных данных

При выполнении работы были объединены пространственные данные о Луне различного происхождения и тематик. Источниками послужили как результаты собственных расчетов авторов, прежде всего карты аномального гравитационного поля, полученные по коэффициентам сферических гармоник, так и открытые международные архивы и специализированные репозитории лунных данных, включая [*NASA Planetary Data System…; USGS Astrogeology Science Center…; JAXA Science Data Archive (DARTS)*…] и др.

Сформированный каталог включает 65 растровых и векторных слоев, охватывающих основные направления современных лунных исследований: геологическое строение, морфометрию поверхности, гравиметрию, магнитометрию, тепловое состояние, минералогию и элементный состав. В каталог включались только те продукты, которые дают содержательно различающуюся информацию; при наличии нескольких близких по смыслу наборов выбиралась наиболее репрезентативная версия. Все данные сохранялись в исходном пространственном разрешении, что позволило избежать искусственной унификации и сохранить научную корректность последующего сопоставления.

Предварительная обработка была направлена на приведение исходных материалов к единой логике представления. Растровые данные различных форматов переводились в формат GeoTIFF, пригодный для веб-публикации, а векторные данные конвертировались в GeoJSON. Для корректного совместного отображения использовалась лунная система координат GCS_Moon_2000, согласованная с общепринятыми параметрами картографи-

ческого описания Луны [*Archinal и др*., 2011]. Для каждого слоя готовилось краткое описание с указанием содержания, пространственного разрешения и прямой ссылки на первоисточник, что повышает прослеживаемость данных и делает портал пригодным не только для просмотра, но и для научной навигации по исходным ресурсам.

4.9.2 Создание и программная реализация геопортала

На первом этапе использовалась платформа NextGIS Web, позволившая быстро развернуть прототип веб-ГИС, организовать многослойное отображение данных и публикацию описательной информации о слоях [*NextGIS Web*…]. Этот этап использовался для отработки структуры каталога.

В ходе эксплуатации были выявлены ограничения, критичные для планетарных приложений. Ориентация NextGIS Web на земную веб-картографию и проекцию EPSG:3857 не обеспечивает корректную работу с глобальными лунными данными, особенно в полярных областях. Кроме того, инструменты геообработки не были встроены непосредственно в интерфейс карты. Это потребовало перехода к собственной архитектуре ресурса.

Текущая версия геопортала реализована на основе [*Flask*…; *OpenLayers*…]. Это обеспечило гибкость настройки интерфейса, поддержку лунной системы координат и возможность включения собственных сервисов обработки данных. Векторные слои в формате GeoJSON передаются клиенту в сжатом виде, а растровые материалы публикуются как тайловые ресурсы. OpenLayers обеспечивает отображение слоев, управление их видимостью и работу с пользовательскими объектами.

Интерфейс запущенного геопортала «Комплексный портал данных о Луне» показан на рисунке 4.22.

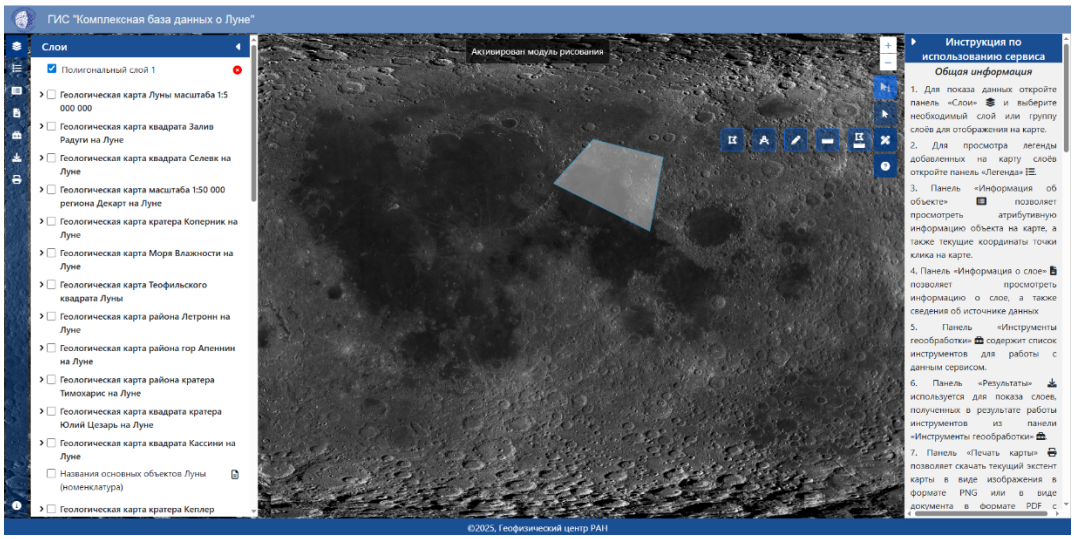


Рисунок 4.22 – Интерфейс текущей версии геопортала «Комплексная база данных о Луне»

В интерфейс портала встроены инструменты работы с данными и картой. Пользователь может просматривать сведения о выбранном объекте и источнике данных, выполнять измерения и рисование, сохранять картографическое изображение и запускать базовые сервисы геообработки. В текущей версии реализованы следующие инструменты геообработки: обрезка растра по маске, обрезка по координатам, построение изолиний и по-

лучение информации о растровом слое (рисунок 4.23). Все операции выполняются на сервере и возвращают результат либо в виде нового слоя, автоматически добавляемого на карту, либо в виде файла для выгрузки.

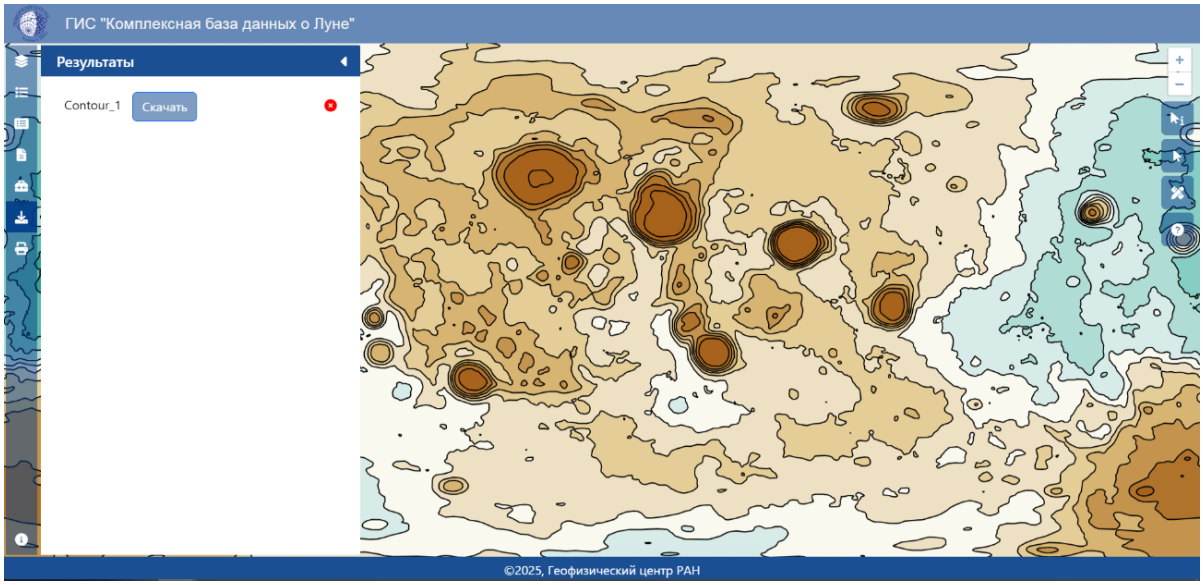


Рисунок 4.23 – Пример результата работы сервиса геообработки «Построение изолиний»

Переход к собственной архитектуре позволил реализовать русскоязычную и англоязычную версии интерфейса и снять ограничения, связанные с использованием земных картографических решений. В результате геопортал стал специализированной средой предварительного анализа лунных данных, пригодной для исследовательской работы и демонстрации результатов.

4.9.3 Заключение

Выполненная работа обеспечила создание единого каталога данных о Луне и их приведение к согласованной системе представления. На основе этого каталога разработан и введен в эксплуатацию геопортал «Комплексная база данных о Луне», совмещающий функции поиска, визуализации и базовой геообработки пространственных данных. По сравнению с прототипом на платформе NextGIS текущая реализация с использованием Flask и OpenLayers обеспечивает корректную работу с лунной системой координат, более гибкую настройку интерфейса и возможность расширения аналитического инструментария. Полученный результат формирует основу для дальнейшего пополнения каталога и развития сервисов обработки.

4.10 Редакционно-издательская деятельность Геофизического центра РАН

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

Russian Journal of Earth Sciences (RJES) выпускается с 1998 года. Главный редактор – академик РАН А. Д. Гвишиани. RJES вносит весомый вклад в развитие науки, знакомя научное сообщество с новейшими российскими и зарубежными исследованиями. Русско- и англоязычные статьи посвящены последним достижениям в геологии, геофизике, геохимии, экологии, физике атмосферы и океана. Все работы получают идентификаторы DOI и EDN. Решение о публикации принимается на основе двух положительных ре-

цензий в рамках системы одностороннего слепого рецензирования. Наукометрические показатели в Scopus и Web of Science подтверждают международную значимость издания. RJES входит в четвертый квартиль (Q4); к концу 2025 года импакт-фактор составил 0,5. В РИНЦ журнал занимает 338-е место из 4495.

В 2025 году RJES был включён в авторитетную базу данных Directory of Open Access Journals (DOAJ). Это расширило международное влияние журнала и цитируемость работ российских авторов. Кроме того, в 2025 году RJES достиг первого уровня «Белого списка».

Индикаторы журнала в Scopus и SCImago (2020–2024) (рисунок 4.24)

- 2020: Q3 квартиль, CiteScore 1,0, H-index 7.
- 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.
- 2024: Q3 квартиль, CiteScore 1,2, H-index 23.

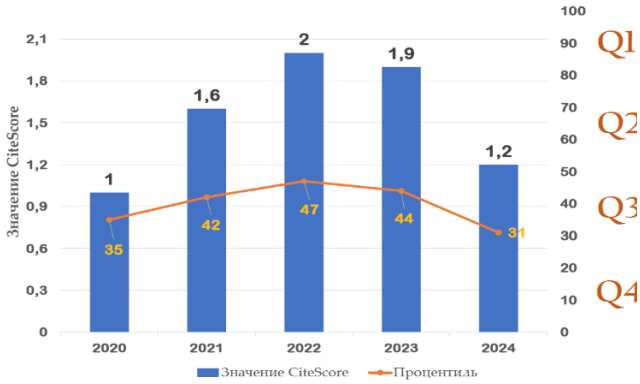


Рисунок 4.24 – График показателей RJES

В 2025 году были опубликованы 3 специальных выпуска RJES (рисунок 4.25). В спецвыпуске «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» представлены материалы одноимённой конференции (Суздаль, 2024 год). В 4 номере RJES опубликован спецвыпуск «К 80-летию секции "Осадочные породы" Московского общества испытателей природы (МОИП)», в который вошли материалы научных чтений «Экзолит –2024» (Москва, 2024 год). В 6 номере вышел спецвыпуск «Advance in Environmental Studies…», содержащий материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 2025 год).



Рисунок 4.25 – Спецвыпуски «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли»; «К 80-летию секции "Осадочные породы" Московского общества испытателей природы (МОИП)»; «Advance in Environmental Studies…»

Журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» с 2009 года публикует официальную информацию ОНЗ РАН, новости о деятельности ОНЗ РАН и связанных с ним научных организаций, а также новости, репортажи, интервью и другие материалы о науках о Земле. С 2025 года с целью популяризации новейших исследований в журнале выходят обзоры статей, публикуемых в RJES. Кроме того, в «Вестнике ОНЗ РАН» представлены научные статьи со стандартным рецензированием (за исключением публикаций членов РАН), с регистрацией в Crossref, присвоением DOI и индексацией в РИНЦ.

Издание «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» с 2018 года публикует научные статьи о применении информационных технологий в науках о Земле, от сбора данных до их использования в исследованиях.

По итогам 2025 года было опубликовано:

- В RJES – 121 статья в 6 выпусках (включая 3 спецвыпуска);
- В «Вестнике ОНЗ РАН» – 851 научно-познавательный материал, 3 научных статьи;
- В «Исследованиях по геоинформатике» – 1 статья.

Издательская платформа «Эдиторум» была внедрена в 2021–2022 годах. Она значительно улучшила процесс подготовки публикаций и метаданных. Был обновлен сайт журнала, улучшена навигация и дизайн (рисунок 4.26).

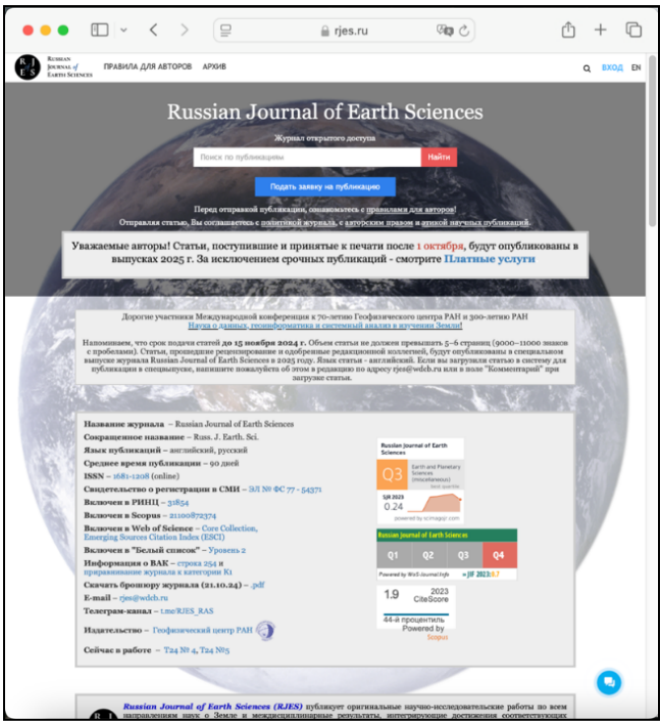


Рисунок 4.26 – Сайт журнала RJES на платформе «Эдиторум»

В 2025 году платформа была усовершенствована. Введена система нумерации статей для журналов, которые используют eLocator. Это шестизначный код: две первые буквы в нём неизменны, следующая цифра соответствует номеру (issue), далее идёт порядковый номер статьи в номере, например, ES2020. Реализованы также гиперссылки внутри текстов и графические аннотации. Кроме того, внедрены публикации online first и continuous publishing – современные инструменты работы научного журнала, которые позволяют публиковать статьи вне зависимости от даты закрытия выпуска.

ГЦ РАН непрерывно совершенствует уровень и повышает значимость издательской деятельности. Благодаря этому в настоящее время RJES является одним из ведущих отечественных журналов в области наук о Земле.

Список использованных источников

База данных наблюдений Солнца в линии He I 1083 нм, полученных на телескопе БСТ-2 КрАО. [Электронный ресурс]. URL: https://sun.crao.ru/observations/hel-1083nm (дата обращения: 04.05.2026).

Бюллетень сети сейсмических станций СССР (ежеквартальный), 1957–1977 гг. М.: АН СССР, Совет по сейсмологии. 1958–1981.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьев А. А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 16. – № 2. – С. 109–125.

Горшков А. И., Соловьев А. А., Жарких Ю. И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны – Прибайкалье // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 479. – № 3. – С. 333–335. DOI: 10.7868/S0869565218090219.

Дучков А. Д., Железняк М. Н., Аюнов Д. Е., Веселов О. В., Соколова Л. С., Казанцев С. А., Горнов П. Ю., Добрецов Н. Н., Болдырев И. И., Пчельников Д. В., Добрецов А. Н. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2012). [Электронный ресурс]. URL: http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru/ (дата обращения 04.05.2026).

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

Землетрясения Северной Евразии, … год (ежегодники 1992–2020 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 1997–2024. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ceme.gsras.ru/zse/contents.html (дата обращения: 04.05.2026).

Каталог гравиметрических определений в Антарктиде. М.: ИФЗ АН СССР, 1962.

Корякин Е. Д., Фролов А. И. Каталог гравиметрических пунктов, определенных в Антарктическом рейсе НИС "Профессор Зубов" в 1968-1969 гг. / в сб.: Морские гравиметрические исследования, выпуск 7, ред. Н. Э. Грушинский. М.: Издательство Московского университета, 1973. – С. 48–73.

Ростовцева Ю. В., Попов С. В. Геохимические исследования: возможности и противоречия // Экзолит–2025: Собрание (научные чтения), посвященные 220-летию основания Московского общества испытателей природы. Москва, 13–14 ноября 2025 г.: Сборник научных материалов / Секция «Литология» МОИП, Геофизический центр РАН; под ред. Ю. В. Ростовцевой. – М.: МАКС Пресс, 2025. – С.163–167.

Сальная Н. В., Ростовцева Ю. В., Пилипенко О. В. Проблемы датирования миоценовых пород Восточного Паратетиса с помощью палеомагнитного метода: к вопросу первичности естественной остаточной намагниченности // Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (ЛИТОЛ 2025). Материалы Всероссийской научной конференции (с иностранным участием). Конференция посвящена памяти Анны Григорьевны Коссовской (1915–2000) и Ирины Васильевны Хворовой (1913–2003). 1–5 апреля 2025 г., ГИН РАН. – М.: ГЕОС, 2025а. – С. 230–232.

Сальная Н. В., Ростовцева Ю. В., Коиава К. П., Кудашин А. С. Проблемы и перспективы изучения миоценовых пород Восточного Паратетиса: магнитостратиграфические исследования разреза Уджарма (Грузия) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXXVI молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца и акад. РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты, 22–27 сентября 2025 г. – Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2025б. – С. 69–71.

Соловьев Ал. А., Горшков А. И., Соловьев Ан. А. Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. – 2016. – № 6. – С. 21–27. DOI: 10.7868/S0002333716050148.

Соловьев А. А., Горшков А. И., Жарких Ю. И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. – 2017. – № 6. – С. 21–27. DOI: 10.7868/S0203030617060025.

Соловьев А. А., Шевалдышева О. О., Николова Ю. И. ГИС «Комплексная база данных о Луне» (2025). [Электронный ресурс]. URL: https://luna-gis.gcras.ru/ (дата обращения: 24.04.2026).

Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Krasnoperov R. I. Short introduction into DMA // Russian Journal of Earth Sciences. – 2018. – Vol. 18. – No. 2. – ES2001. DOI: 10.2205/2018ES000618.

Archinal B. A., A'Hearn M. F., Bowell E. et al. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009 // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2011. – Vol. 109. – P. 101–135. – DOI: 10.1007/s10569-010-9320-4.

Bondár I., McLaughlin K. L. A new ground truth data set for seismic studies // Seismological Research Letters. – 2009. – Vol. 80. – №. 3. – P. 465-472. DOI: 10.1785/gssrl.80.3.465.

Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seismic Instruments. – 2019. – Vol. 55. – No. 1. – P. 17–23. DOI: 10.3103/S0747923919010067.

Flask Documentation. [Электронный ресурс]. URL: https://flask.palletsprojects.com (дата обращения: 04.05.2026).

Förste C., Bruinsma S. L., Abrykosov O., Lemoine J.-M., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // GFZ Data Services. – 2014. DOI: 10.5880/ICGEM.2015.1.

Förste C., Shako R., Flechtner F., Dahle C., Abrykosov O., Neumayer K.-H., Barthelmes F., König R., Bruinsma S.-L., Marty J.-C., Lemoine J.-M., Balmino G., Biancale R. A new release for EIGEN-6 – the latest combined global gravity field model including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // Geophysical Research Abstracts. – 2012. – Vol. 14. – No. – EGU2012-2821.

Gavin H. P. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems // Department of Civil and Environmental Engineering Duke University August. – 2019. – Vol. 3. – P. 1–23.

JAXA Science Data Archive (DARTS). Kaguya (Selene). [Электронный ресурс]. URL: https://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/selene/ (дата обращения: 24.04.2026).

Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophysical Journal International. – 1995. – Vol. 122. – No. 1. – P. 108–124. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.

Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Dyment J., Thébault E. Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // Earth, Planets and Space. – 2016. – Vol. 68. – No. 27. – P. 1–13. DOI: 10.1186/s40623-016-0404-6.

NASA Planetary Data System (PDS). [Электронный ресурс]. URL: https://pds.nasa.gov/ (дата обращения: 24.04.2026).

NextGIS Web. [Электронный ресурс]. URL: https://nextgis.com/nextgis-web/ (дата обращения: 24.04.2026).

OpenLayers. [Электронный ресурс]. URL: https://openlayers.org/ (дата обращения: 24.04.2026).

Shako R., Förste C., Abrikosov O., Bruinsma S., Marty J., Lemoine J., Flechtner F., Neumayer H., Dahle C. EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model Including GOCE Data // In: Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions (Eds: Flechtner F., Sneeuw N., Schuh W.-D.). – 2013. – P. 155–161. DOI: 10.1007/978-3-642-32135-1_20.

Tesauro M., Kaban M. K., Cloetingh S. EuCRUST-07: A new reference model for the European crust // Geophysical Research Letters. – 2008. – Vol. 35. Is. 5. DOI: 10.1029/2007GL032244.

Tesauro M., Kaban M. K., Mooney W. D., and Cloetingh S. A. P. L. Density, temperature, and composition of the North American lithosphere – New insights from a joint analysis of seismic, gravity, and mineral physics data: 2. Thermal and compositional model of the upper mantle // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2014. – Vol. 15. – Is. 12. – P. 4808–4830. DOI: 10.1002/2014GC005484.

Thrastarson S., van Herwaarden D. P., Noe S., Schiller C.J., Fichtner A. REVEAL: A global full-waveform inversion model // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2024. – Vol. 114. – No. 3. – P. 1392–1406. DOI: 10.1785/0120230273.

USGS Astrogeology Science Center. [Электронный ресурс]. URL: https://www.usgs.gov/centers/astrogeology-science-center (дата обращения: 24.04.2026).

Zabelina I., Koulakov I., Amanatashvili I., El Khrepy S., Al-Arifi N. Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography // Journal of Asian Earth Sciences. – 2016. – Vol. 119. – P. 87–99. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.010.

5 Создание теоретических основ, методик и алгоритмов для развития пунктов и сетей мониторинга геофизических процессов

Шифр темы: FMWG-2025-0008
Регистрационный №: 125062407514-5
Руководитель: зав. лаб., в.н.с., к.т.н. Д. В. Кудин

В 2025 г. работы велись по семи направлениям: (1) обработка данных обсерватории «Санкт-Петербург» сети ИНТЕРМАГНЕТ и испытание нового вариометра GM4; (2) выявление и геологическое объяснение магнитной аномалии в окрестностях обсерватории «Михнево»; (3) отработка методики измерения географического азимута миры; (4) изучение магнитных свойств стройматериалов для немагнитных павильонов; (5) обоснование методики совместного анализа ГНСС-измерений и геомагнитных возмущений; (6) оценивание нестационарных параметров геомагнитных пульсаций Pc3 типа «жемчужины»; (7) теоретические модели конденсационного роста капель в атмосфере. Отдельно отражено научное сотрудничество (раздел 5.8).

5.1 Обработка данных обсерватории «Санкт-Петербург» (ИНТЕРМАГНЕТ)

Обсерватория не термостабилизирована и расположена в зоне сильных техногенных помех, поэтому обработка показаний штатного вариометра FGE (ориентация XYZ) включает три этапа: вычисление базисных значений по руководству ИНТЕРМАГНЕТ (X0 = X − Xvar и т.д.) с интерполяцией функцией csaps (Matlab); температурную коррекцию базисных значений; удаление искусственных помех в секундных данных специализированным ПО.

Штатный вариометр FGE. Температурная коррекция потребовалась в феврале, марте, апреле и августе 2025 г. (месяцы наибольших перепадов температуры); её эффект показан на рисунке 5.1. Помехам наиболее подвержены компоненты *Z* и *F* (типичная амплитуда 0,5–1 нТл). Удаление проводится так, чтобы минимизировать потерю минутных данных (таблица 5.1).

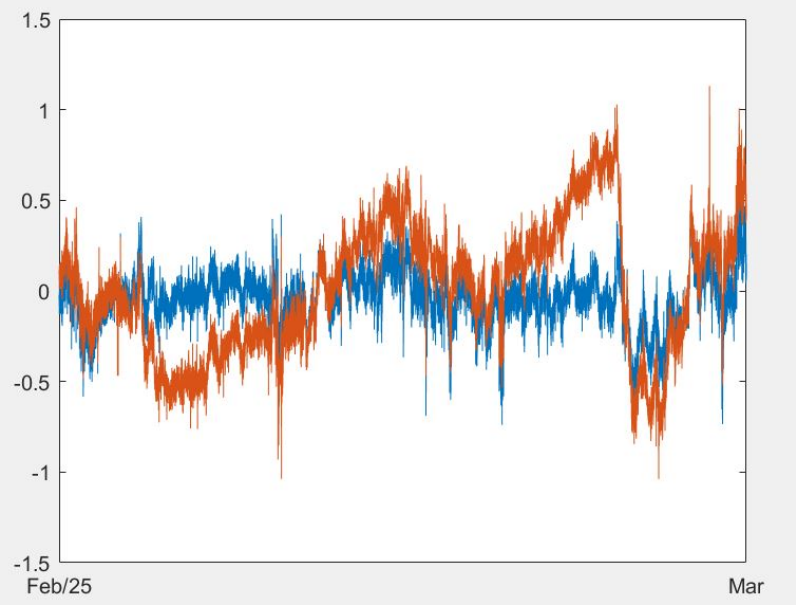


Рисунок 5.1 – Температурная коррекция вариометра FGE, февраль 2025 г.: dF до коррекции (оранжевый) и после (синий), нТл

Таблица 5.1 – Удалённые помехи и потерянные минутные данные (сбои аппаратуры + удаление помех) в 2025 г.

Месяц	Удалено помех	Потеряно минутных значений, шт. (%)			
		X	Y	Z	F
Январь	1387	15 (0,0)	9 (0,0)	51 (0,1)	44 (0,1)
Февраль	868	0 (0,0)	0 (0,0)	19 (0,0)	6 (0,0)
Март	1744	11 (0,0)	9 (0,0)	59 (0,1)	92 (0,2)
Апрель	621	0 (0,0)	4 (0,0)	15 (0,0)	7 (0,0)
Май	806	0 (0,0)	0 (0,0)	9 (0,0)	238 (0,5)
Июнь	1014	19 (0,0)	20 (0,0)	42 (0,1)	617 (1,4)
Июль	639	20 (0,0)	20 (0,0)	44 (0,1)	65 (0,1)
Август	583	1 (0,0)	4 (0,0)	27 (0,1)	53 (0,1)
Сентябрь	384	0 (0,0)	0 (0,0)	23 (0,1)	16 (0,0)
Октябрь	523	240 (0,5)	241 (0,5)	256 (0,6)	2147 (4,8)
Итого	8569				

Тестируемый вариометр GM4 (ориентация HDZ, код SP4) обрабатывался с использованием скалярных, температурных и абсолютных данных штатного комплекса. Выявлено, что температурная зависимость GM4 обратна по знаку зависимости FGE и значительно сильнее (особенно в апреле 2025 г.); избыточные суточные колебания dF заметно уменьшились после 20 апреля. Разности показаний GM4 и FGE вычислялись по парам компонент *H*, *Z* и *X*, *Y* (рисунок 5.2): суточная вариация сильнее проявляется в разности *H*, чем *Z*; в разности *Y* температурная зависимость выражена значительно сильнее, чем в *X*.

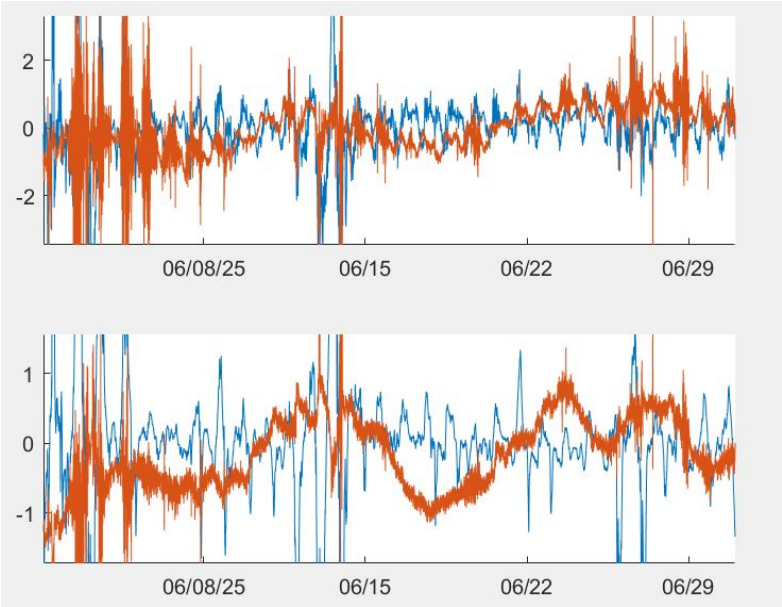


Рисунок 5.2 – Разности показаний GM4 и FGE по компонентам H (вверху) и Z (внизу), июнь 2025 г. (оранжевый); синим – суточные вариации FGE, приведённые к уровню разностей

Результаты. FGE в 2025 г. выдаёт данные высокого качества: после температурной коррекции dF не выходит за ±0,5 нТл (кроме периодов геомагнитных возмущений); потери минутных данных по X, Y, Z не превышают 0,6 %. GM4 по предварительным оценкам

также способен выдавать данные высокого качества с расхождением порядка 1 нТл относительно штатного вариометра; следующий шаг – организация его температурной коррекции и контроль стабильности.

5.2 Исследование аномального поля в окрестности обсерватории «Михнево»

Поводом для работ стало отклонение измеряемых в обсерватории склонения *D* и наклонения *I* от модельных значений. Цель – подтвердить, локализовать и объяснить аномалию. Работы включали полевой (три выезда: 04.09, 16.09 и 25.09.2025) и камеральный этапы. Использовались магнитометр GSM-19, градиентометр GSM-19GW, ГНСС-приёмники PrinCe i50, металлоискатель Fisher F11 и деклинометр/инклинометр MinGeo 010A.

Выбор площадки. Критерии: удаление ~4 км от обсерватории, вне населённых пунктов, ≥10 км от ж/д, ≥1 км от ЛЭП и магистралей. Выбрана площадка у н.п. Каменищи; на участке 10×10 м с шагом 1 м выполнена градиентометрическая съёмка. Аномальное поле ΔF_a составило от −1,8 до 4 нТл (экстремумы у дороги, вероятно, техногенные); для абсолютных измерений выбран центр участка, удовлетворяющий рекомендациям IAGA (градиент ≤1 нТл/м).

Абсолютные измерения выполнены 16.09.2025 нуль- и оффсетным методами на миру в 175 м. Истинный азимут миры определён статическими ГНСС-наблюдениями (2 ч, 30 с) с уравниванием от сети PrinNet: 124,1297222°. Результаты (таблица 5.2) показали, что склонение на площадке на ~1,82° меньше обсерваторского (разности 1,78–1,87° в пяти сериях), наклонение – на ~0,14°; при этом значения на площадке близки к моделям IGRF и CampusCL, а обсерваторские от них существенно отличаются.

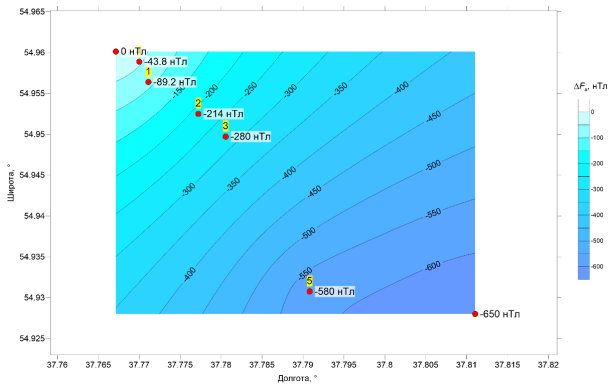
Таблица 5.2 – Средние склонение D и наклонение I (16.09.2025), градусы

Источник	D, °	I, °	Отличие от обсерватории, D / I
Обсерватория (среднее)	13,5002	71,4236	—
Площадка, измерения (среднее)	11,6791	71,2827	−1,821 / −0,141
CampusCL, обсерватория	11,6156	71,1944	−1,885 / −0,229
CampusCL, площадка	11,6091	71,1760	−1,891 / −0,248
IGRF, обсерватория	11,6340	71,2070	−1,866 / −0,217
IGRF, площадка	11,6270	71,1890	−1,873 / −0,235

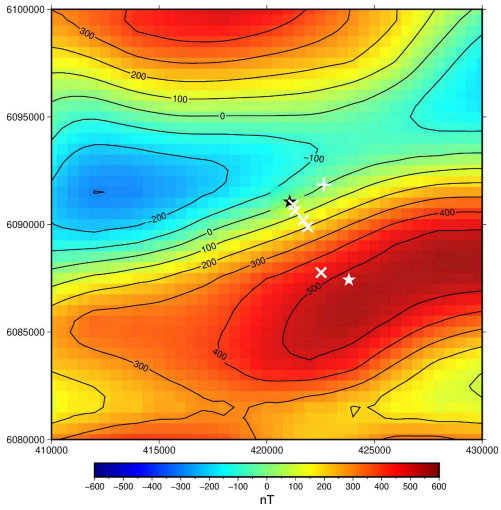
Границы аномалии. 25.09.2025 модуль поля измерен в точках на створе обсерватория – площадка (таблица 5.3). Резкой границы не выявлено: поле убывает постепенно по мере удаления от обсерватории, т. е. аномалия имеет региональный характер (рисунок 5.3а).

Таблица 5.3 – Разность полевых и обсерваторских значений модуля поля

Удаление от обсерватории, км	0	0,255	0,505	1,09	1,46	3,61	4,52
ΔFa, нТл	0,00	−43,82	−89,15	−213,66	−280,00	−579,73	−649,66



а) изменение поля относительно обсерватории по данным выезда 25.09.2025



б) карта магнитных аномалий района (★ белая – площадка D/I, ★ чёрная – обсерватория)

Рисунок 5.3 – Структура аномального поля в окрестности обсерватории «Михнево»

Геолого-геофизическая интерпретация. Карты аэромагнитной съёмки и магнитных аномалий подтвердили крупную аномалию с градиентным (не ступенчатым) изменением поля – обсерватория расположена в зоне перехода к крупной отрицательной аномалии (рисунок 5.3б). Осадочный чехол района (каменноугольные и девонские известняки, доломиты, глины, пески) практически немагнитен, интрузивных тел не обнаружено. На разрезе геологической карты по линии А–Г выявлен крупный поднятие кристаллического фундамента (архей-нижнепротерозойские гнейсы и граниты AR-PR_1), заполненный породами рифея. Такие локальные структуры юго-западного склона Московской синеклизы, образованные разломами и дифференциальными движениями блоков фундамента, хорошо проявляются в геофизических полях.

Результат: аномалия подтверждена, локализована и получила наиболее вероятное объяснение – поднятие кристаллического фундамента в районе обсерватории. Планируются дополнительные исследования и публикация статьи.

5.3 Отработка методики измерения географического азимута

Азимут миры – обязательное условие измерения *D* и *I*. В полевых условиях он определяется только ГНСС-приёмниками (относительные определения в режиме «статика»), в обсерватории, где постамент находится внутри павильона, – комбинацией ГНСС и электронного тахеометра (передача координат линейно-угловыми измерениями). Уравнивание выполняется от высокоточных сетей ФАГС (СКП взаимного положения 2 см в плане, 3 см по высоте), PrinNet или ITRF.

– **Надымский район ЯНАО** (апрель 2025 г.): на каждом участке закладывался опорный пункт (база ГНСС), уравненный в ПО Magneto от четырёх пунктов ФАГС (ANTP, SLH1, PNGD, NOYA) с точными эфемеридами; приёмники PrinCe i50 (2 шт.) и PrinCe 5PU, запись 30 с, 1–2 дня наблюдений.

– **Иркутская область** (лето 2025 г., обсерваторские условия): временная база BASE привязана к станциям PrinNet (IRKT, KRMN, SAYN, USUT) в CHCNAV CGO2; координаты переданы с временного пункта ST на постаменты A1, A2 тахеометром Leica TS10 R1000 1″.

– **Окрестности обсерватории «Михнево»** (сентябрь 2025 г., раздел 2): статика 2 ч с уравниванием от PrinNet в CHC Geomatics Office 2.

Таблица 5.4 – Измеренные географические азимуты мир в 2025 г.

Локация	Направление	Азимут	Способ
ЯНАО, участок 1	АН11 → М11	208°15′18″	ГНСС, ФАГС
ЯНАО, участок 2	АН15 → М15	24°46′23″	ГНСС, ФАГС
Иркутская обл., постамент А1	А1 → MIRA	326°52′58″	ГНСС + тахеометр, PrinNet
Иркутская обл., постамент А2 (резервное)	А2 → MIRA	327°24′30″	ГНСС + тахеометр, PrinNet
Михнево, полевая площадка	Деклинометр → мира	124°07′47″ (124,1297°)	ГНСС, PrinNet

Результат: азимуты измерены в трёх локациях, что обеспечило вычисление *D* и *I*; применение современных геодезических средств сократило трудоёмкость и время наблюдений. Направление А2 – MIRA является резервным (постамент А2 предназначен для базового магнитометра).

5.4 Изучение магнитных свойств стройматериалов

5.4.1 Стройматериалы нового вариометрического павильона обсерватории «Климовская»

Проект павильона: два постамента из стеклоблоков на общем бетонном фундаменте (плита и составные бетонные столбы), несущие сваи из ПНД-труб с немагнитным цементом, стены из сэндвич-панелей (пенопласт + ДСП). Магнитная восприимчивость æ измерялась каппаметром ПИМВ (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Магнитная восприимчивость стройматериалов

Материал / конструкция	æ, ×10−5 ед. СИ	Оценка
Цементная смесь (лабораторно)	2,4–3,4	очень слабо магнитная
Бетонная плита фундамента (с жидким стеклом и кварцевым песком)	≈ 0	немагнитная
Несущие сваи	0 (ниже порога ПИМВ)	немагнитные
Сэндвич-панели стен	2,6–2,7	немагнитные
Песок для засыпки котлована (58 замеров)	47–148 (в осн. 50–100)	слабо и очень слабо магнитный

Результат: все исследованные материалы и готовые конструкции (фундамент, сваи) пригодны для строительства немагнитного павильона.

5.4.2 Динамика намагниченности при отвердевании бетона

Эффект изучается после обнаружения намагничивания фундаментов постаментов при строительстве обсерватории «Михнево»: ферромагнитные примеси цемента (отходы металлургии, частицы дробилок) при гидратации дополнительно намагничиваются. На образце «грязного» бетона массой 3,1 кг (æ сухой смеси 585×10^{-5} ед. СИ) с 14 по 31 октября 2025 г. выполнено 10 серий по 40 измерений (всего 400) в 8 точках: 1–4 на верхней, 5–8 на нижней стороне.

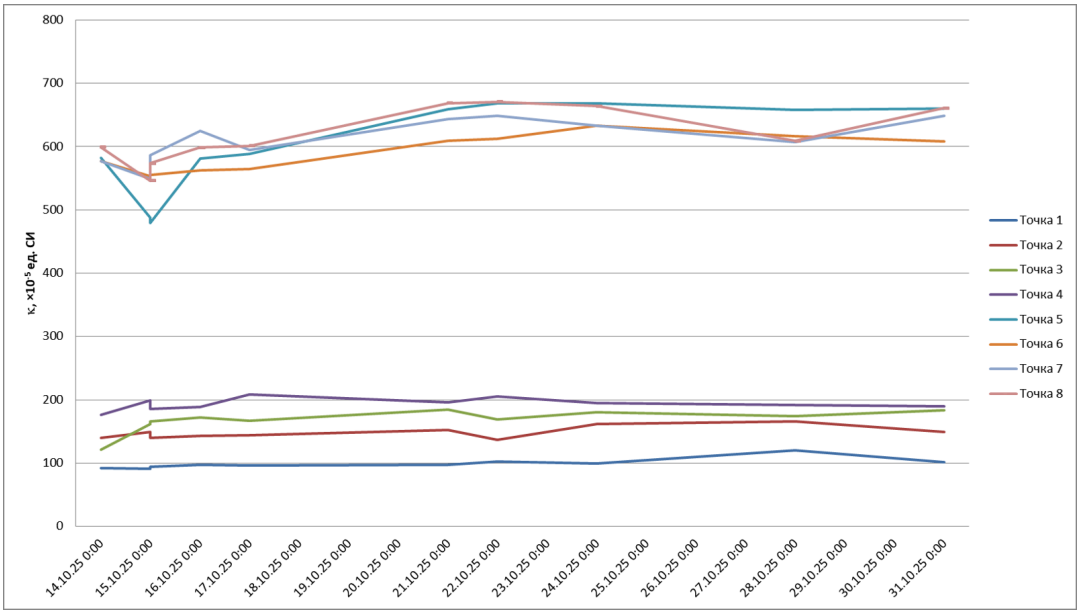


Рисунок 5.4 – Рост магнитной восприимчивости бетонного образца в точках 1–8, 14–31.10.2025

Результат: на нижней стороне æ выросла от 580–600 до $660–674\times10^{-5}$ ед. СИ за 18 дней (в центре нижней поверхности в конце эксперимента – 713×10^{-5}); на верхней стороне намагниченность оставалась малой и почти не росла. Рост с выходом на асимптоту согласуется с моделью Шведова – Бингама для обводнённой смеси как коллоида с ферромагнитной примесью. Далее планируются опыты на образце большей площади, включая торцы.

5.5 Методика анализа ГНСС-измерений при геомагнитных возмущениях

Обосновывается комбинированный анализ данных ГНСС (полное электронное содержание ионосферы, TEC) совместно с геомагнитными данными. Ранее в ГЦ РАН TEC анализировалось совместно с вторичными космическими лучами и индексами активности (бури 2017 г.), а ошибки позиционирования ГНСС-приёмника обсерватории «Климовская» сопоставлялись с геомагнитными вариациями и атмосферным давлением.

Пример – буря 12–14 ноября 2025 г., третья по интенсивности в 25-м солнечном цикле (вспышка X5.1 и приход облака солнечной плазмы, внезапное начало по Dst-индексу; максимум по планетарному K-индексу). Локальные индикаторы системы МАГНУС по данным обсерватории «Климовская» зафиксировали внезапное начало, главную фазу до полудня 12.11, повторное усиление в первой половине 13.11 и окончание фазы восстановления 15.11. Анализировались часовые TEC шести высокоширотных станций IGS:

PETS (Петропавловск-Камчатский), MAG0 (Магадан), TIXI (Тикси), NYAL (Ню-Олесунн), THU2 (Туле), HOLM (Холман, Канада).

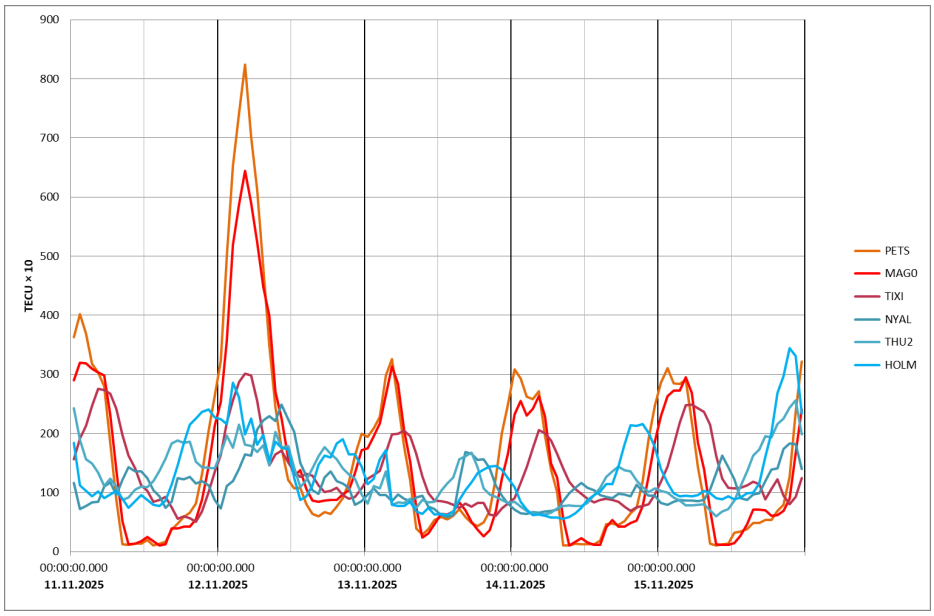


Рисунок 5.5 – Часовые значения TEC высокоширотных станций ГНСС, 11–15.11.2025

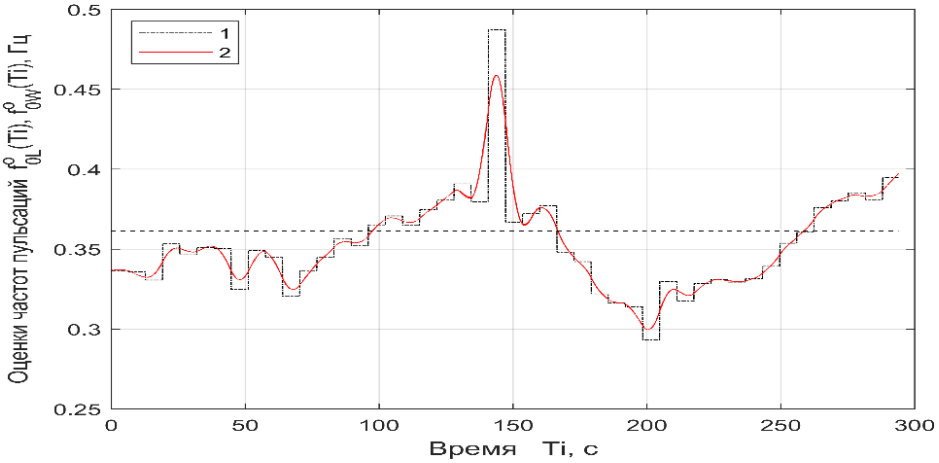
Результаты. При суточной вариации TEC до 18–30 TECU аномалия главной фазы бури достигла **82,4 TECU** (PETS), **64,4 TECU** (MAG0) и 30,1 TECU (TIXI) – станции на дневной стороне в момент начала бури; пики различимы и на станциях противоположной стороны Земли. Второй выраженный пик (PETS, MAG0, THU2, HOLM) совпал со второй генерацией бури 01:00–13:00 UTC 13.11; выделяется и низкочастотная составляющая, совпадающая с главной фазой и фазой восстановления. Это качественно обосновывает методику: между динамикой геомагнитного поля и ГНСС-данными существуют корреляционные связи. Далее будет развиваться методика комплексного анализа магнитного поля, ГНСС и метеопараметров.

5.6 Оценивание нестационарных параметров геомагнитных пульсаций Pc3 типа «жемчужины»

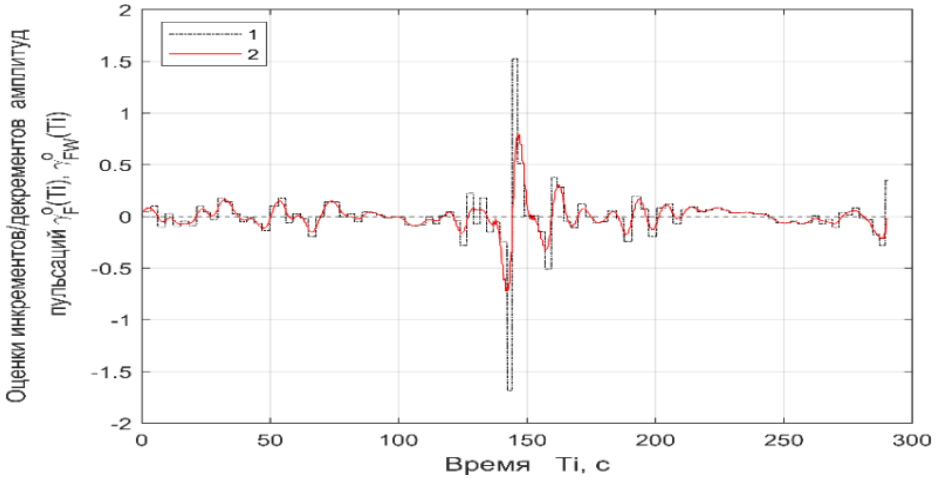
Инкременты/декременты характеризуют нарастание/затухание амплитуд колебаний (диссипативные свойства среды, механизмы неустойчивости волн в околоземной плазме), частотная дисперсия – изменение центральной частоты во времени (природа колебаний, свойства среды распространения). Традиционные методы (ДПФ, преобразование Вигнера, вейвлет-анализ) имеют ограниченное разрешение для коротких нестационарных сигналов.

Разработанная технология – двухэтапная аппроксимация. Этап 1: время наблюдений разбивается на локальные интервалы, на каждом строится модель с линейными и нелинейными параметрами; линейные находятся из системы нормальных уравнений при фиксированных нелинейных, нелинейные – минимизационным поиском с ограничениями; результат – кусочно-непрерывные оценки параметрических функций. Этап 2: скользящие локальные модели и взвешенное аппроксимационное усреднение сглаживают разрывы. Для амплитуды и частоты применяется кусочно-синусоидальная модель; инкременты/декременты оцениваются по относительным изменениям положительных локальных максимумов отфильтрованного сигнала, частотная дисперсия – по интервалам между нулями (полупериодам).

Экспериментальные данные: станция SDY (Гренландия), 16.01.2016, начало 13:10 UT, N = 46696 отсчётов, шаг T = 0,1 с. Средняя частота по ДПФ-спектру (разрешение 0,0195 Гц, 45 усреднений) $f_0 \approx 0{,}3613$ Гц; полосовой фильтр Баттерворта 6-го порядка ($W_{c1} = 0{,}02$, $W_{c2} = 0{,}12$); диапазон частотного поиска 0,005–0,605 Гц.



а) оценки частотной функции (1 — этап 1, 2 – этап 2), пунктир – f_0



б) оценки инкрементов/декрементов амплитуд (1 – этап 1, 2 – этап 2)

Рисунок 5.6 – Оценки нестационарных параметрических функций экспериментальных пульсаций

Таблица 5.6 – Относительные погрешности оценок (по результатам моделирования)

Параметрическая функция	Амплитуда	Частота	Инкременты/декременты	Частотная дисперсия
Относительная погрешность	≈ 1,8 %	≈ 5,2 %	≈ 7 %	≈ 5 %

Результаты. Технология работоспособна и эффективна на реальных Pc3-пульсациях; точность оценок удовлетворительная (таблица 5.6). Предварительно установлено, что частота «жемчужин» изменялась почти линейно со скоростью **0,04–0,06 Гц/мин** (требует статистического подтверждения). Метод применим также к волнам Релея, хорам в магнитосфере, механическим, радио- и биомедицинским сигналам. Результаты опубликованы [*Getmanov et al.*, 2025].

5.7 Теоретические модели конденсационного роста капель в атмосфере

Цель – модели конденсационного роста капель на начальном этапе осадкообразования в диапазоне 0,1–20 мкм в условиях, близких к атмосферным.

5.7.1 Влияние электрического поля (термодинамическая модель)

В конвективных облаках напряжённость поля достигает ~10^5 В/м. Модель основана на модифицированном уравнении Кельвина с вкладом энергии поля в свободную энергию Гиббса: $\ln(c_0/c_{\text{flat}}) = (M/RT\rho)\cdot[2\sigma/r - (\varepsilon_0/2)E^2]$. Впервые комплексно учтены четыре источника анизотропного поля: внешнее поле облака E_0, поляризация капли (коэффициент $P = 1 + 2(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2)$), собственный заряд E_q и ζ-потенциал двойного электрического слоя E_ζ. Интегрированием по поверхности капли получено аналитическое выражение для усреднённой концентрации пара и скорости роста.

- **Линейная зависимость:** относительное увеличение концентрации пара у поверхности (и скорости роста) линейно по E_0: $\Delta c/c_{\text{flat}} = (M/RT\rho)(\varepsilon_0/2)(\zeta/\delta)^2(1 + 2P\delta E_0/\zeta)$ – теоретическое обоснование наблюдаемого ускорения осадкообразования под облаками.
- **Температурная зависимость:** эффективность электроконденсации $\propto 1/T$, что объясняет её усиление при пониженных температурах.
- **Компенсация замедленного роста:** поле действует против эффекта Кельвина и помогает каплям быстрее преодолеть наноразмерный «барьер».

5.7.2 Рост субмикронных капель с учётом кинетических эффектов

Для частиц, сравнимых с длиной свободного пробега $\langle\lambda\rangle \approx 0{,}1$ мкм (частицы Айткена, «зазор Гринфилда»), построена полуаналитическая модель с учётом слоя Кнудсена (эффективный коэффициент диффузии $D_{\text{eff}} = D / [r/(r + \langle\lambda\rangle) + D/(r\langle v\rangle\alpha_c)]$) и стефановского потока. Получено уравнение роста $F(r) - F(r_0) + A(r - r_0) = \tau - \tau_0$ и скорость роста площади $dS/d\tau = 8\pi r / (A + r\cdot\ln[(1 + \langle\lambda\rangle/r)^{*r^{*/\langle\lambda\rangle}}])$, содержащая классический максвелловский предел $dS/d\tau \to 8\pi$.

- **Результаты (T = 10 °C):** при $r = \langle\lambda\rangle$ скорость роста вдвое ниже классической диффузионной; время выхода на стадию интенсивного роста для капель с $r_0 = 0{,}1\langle\lambda\rangle$ увеличивается примерно на **20%**. Это объясняет увеличенное время жизни частиц Айткена и медленное преодоление «зазора Гринфилда».

Обе модели пригодны для параметризации микрофизики в численных моделях прогноза погоды, климата и переноса аэрозолей. Результаты опубликованы в Journal of Aerosol Science (Q1) и RJES (2025).

5.8 Сотрудничество с научными и производственными организациями

- **Российские:** «Шлюмберже» – развёртывание обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ у п. Сабетта (Ямал); ООО «НТЦ "ТПМ"» (для ПАО «Газпром») – научно-методическое сопровождение строительства обсерватории в Восточной Сибири; ФИЦКИА УрО РАН – обсерватория «Климовская»; ИДГ РАН – «Михнево»; ИГФ УрО РАН – «Арти»; СПбФ ИЗМИРАН – «Санкт-Петербург»; ИНГГ СО РАН – «Остров Самойловский» (дельта Лены); геологический факультет МГУ – абсолютные измерения на Александровской базе практик (Калужская обл.).

– **Международные:** ИГИС НАН Армении – обсерватория «Гюлагарак» (GLK); Институт сейсмологии АН Узбекистана – магнитометрический комплекс на обсерватории «Янгибазар» (TKT); Институт геофизики Китайской администрации по землетрясениям – совместный анализ данных GM4 на обсерватории SPG (доклад на ассамблее IAGA-IASPEI, Лиссабон); Южно-Африканское космическое агентство (SANSA) – семинар в феврале 2025 г. и подписанное соглашение о научно-техническом сотрудничестве.

Заключение

Основные результаты 2025 г.:

1. Обработаны данные обсерватории «Санкт-Петербург» за январь–октябрь 2025 г.: удалено 8569 помех, dF после температурной коррекции в пределах ±0,5 нТл; новый вариометр GM4 показал расхождение со штатным FGE порядка 1 нТл при более сильной обратной температурной зависимости.
2. Подтверждена и локализована региональная магнитная аномалия у обсерватории «Михнево» (ΔD ≈ 1,8°, ΔI ≈ 0,14°; Δ*F* до −650 нТл на удалении 4,5 км); её наиболее вероятная причина – поднятие кристаллического фундамента.
3. Высокоточно измерены азимуты мир в трёх локациях (ЯНАО, Иркутская обл., Михнево) с использованием ГНСС и тахеометра.
4. Подтверждена немагнитность стройматериалов павильона обсерватории «Климовская»; установлен рост æ «грязного» бетона при отвердевании на ~10–16% за 18 дней на нижней стороне образца.
5. Обоснована методика совместного анализа ТЕС ГНСС и геомагнитных данных на примере бури 12–14.11.2025 (аномалия ТЕС до 82,4 TECU).
6. Разработана технология двухэтапных аппроксимаций для оценки нестационарных параметров пульсаций Pc3 (погрешности 1,8–7%; дрейф частоты 0,04–0,06 Гц/мин).
7. Созданы термодинамическая (влияние электрического поля) и кинетическая (субмикронные капли) модели конденсационного роста капель.

Результаты вносят вклад в фундаментальные исследования в области геомагнетизма, геодезии и физики атмосферы и имеют прикладной потенциал для мониторинга и прогнозирования геофизических процессов [*Getmanov et al*., 2025].

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., д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев

6.1 Разработка и верификация алгоритмов выделения экстремальных геомагнитных событий

6.1.1 Введение

Продолжена работа по развитию алгоритмической базы системы Больших данных, обеспечивающей интеллектуальную обработку данных обсерваторских наблюдений в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). Цель исследований – разработка эффективных алгоритмов распознавания и декластеризации экстремальных геомагнитных событий для их прогнозирования. С этой целью проведен сравнительный анализ данных за 24-й солнечный цикл (2009–2020 гг.) с 2 арктических станций («Соданкюля» (Финляндия) и «Тикси» (Якутия)), 6 среднеширотных и одной приэкваториальной обсерватории («Алма-Ата» (Казахстан)).

6.1.2 Исходные данные

В качестве исходных данных использовались ежеминутные записи магнитного поля (в нТл). Сначала выделялась горизонтальная составляющая магнитного поля, а затем рассчитывалась ее разностная производная за 1 и 10 минут. Для выборки наиболее значимых событий и удаления наименее выраженных использовалась отсечка в 30 нТл/мин для северных широт и 15 нТл/мин для среднеширотных и экваториальных событий. Затем производилась процедуры выборки, в результате которой для каждого интервала времени выбиралось событие лишь с максимальной амплитудой. Таким образом, была сформирована база данных с декластеризованными событиями. Более подробно методика декластеризации описана в работе [*Love et al.*, 2016]. Далее данные очищались от техногенных и антропогенных аномалий. После автоматической обработки для каждой станции рассчитывался процент доступности данных и строились разностные производные горизонтальной компоненты за весь период рассмотрения. В табл. 6.1 приведены максимальные значения разностной производной за 24 солнечный цикл.

Таблица 6.1 – Максимальные значения dBhdt/min по обсерваториям за 24 солнечный цикл

IAGA-код	Значение dBhdt/min	Дата и время события
TIK	685,80	24-Окт-2019 08:43:00
SOD	536,70	08-Сент-2017 00:24:00
BOX	113,35	26-Сент-2011 02:54:00
MGD	62,20	07-Сент-2017 16:14:00
NVS	93,30	22-Июн-2015 16:03:00
IRT	119,62	22-Июн-2015 18:32:00
PET	72,00	21-Июн-2015 18:31:00
LVV	71,47	22-Июн-2015 05:44:00
AAA	98,60	20-Июн-2015 02:50:00

6.1.3 Оценка распределения событий

Полученные после очистки данные использовались для построения графиков распределения экстремальных геомагнитных событий для каждой обсерватории. На рисунке 6.1 представлены распределения всех событий и декластеризованных событий для обсерватории Иркутск. Как видно из рисунка, переход к изолированным геомагнитным событиям путем декластеризации полностью меняет вид распределения.

(а) (б)

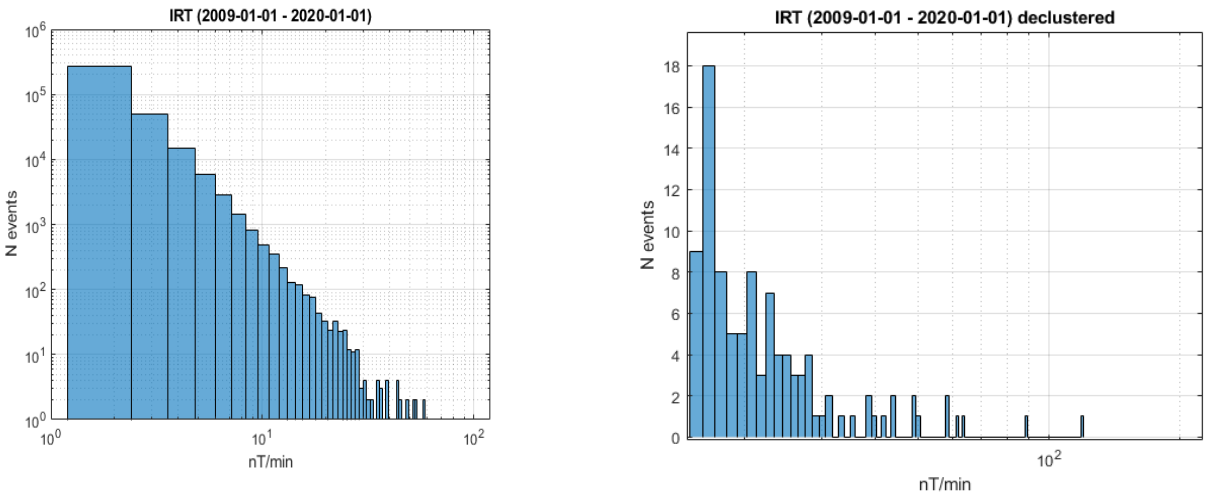


Рисунок 6.1 – Графики плотностей распределения всех событий (а) и декластеризованных событий (б) для обсерватории Иркутск

С точки зрения оценки опасности возникновения экстремальных событий очевидно, что первичной является оценка вероятности возникновения событий с максимальным значением без включения кластеризованных сопутствующих возмущений. В связи с этим рассчитаны аналитические приближения эмпирических распределений событий формулами логнормального распределения и распределения Парето. Результаты показали, что гипотеза о логнормальности распределения событий высокоширотных обсерваторий не может быть отвергнута (p-значение = 0,0054) в отличие от принадлежности к распределению Парето. Что касается среднеширотных обсерваторских данных – обе гипотезы принадлежности были отвергнуты (*p*-значение > 0,05).

6.2 Новые региональные геомагнитные индексы для Российского сектора Арктики

6.2.1 Введение

Наибольшие риски космической погоды для современной технологической инфраструктуры – сбои навигации, радиосвязи, энергосистем и автоматики – возникают в высоких широтах в области аврорального овала вследствие вторжения в атмосферу электронов из околоземного пространства [*Белаховский и др.*, 2018; *Птицына и др.*, 2008; *Соколова и др.*, 2019]. Проблемы испытывают также спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС [*Afraimovich et al.*, 2009; *Kozyreva et al.*, 2017].

Геоэффективность погоды характеризуется следующими основными геомагнитными индексами: Dst/SYM-H (кольцевой ток), Kp (средние широты), AE/AU/AL (авроральные токи). Дополнительно используются PC-индекс (трансполярный ток) [*Troshichev and Janzhura*, 2012] и УНЧ-индекс (флуктуации) [*Pilipenko et al.*, 2017]. Индексы постоянно модифицируются, к примеру, был введен SME-индекс (>100 станций) [*Newell and Gjerloev*, 2011a, 2011b], также разрабатываются AMC-индекс – усовершенствованный вариант Kp индекса [*Pick and Korte*, 2017], региональные индексы (EI для Фенноскандии) и индикаторы суббурь. Однако Планетарные индексы рассчитываются по сети неравномерно распределенных станций. К тому же суббури развиваются в узком долготном секторе, поэтому индексы неадекватно описывают обстановку на территории Российской Федерации. Поэтому для наземных систем нужны новые индексы на основе dB/dt [*Viljanen et al.*, 2006]. Стандартные AE и PC недостаточны для прогноза геоиндуцированных токов в ЛЭП на северо-западе Российской Федерации. В связи с этим в рамках НИР велась апробация методики расчета региональных индексов авроральной активности по данным российских станций и создание общедоступной базы данных для России. Для расчета региональных индексов для территории Российской Федерации использовались данные всех доступных российских станций с шагом по времени Δt = 1 мин. Магнитограммы всех имеющихся станций условно разделялись на полярные (Ф>70°), авроральные, среднеширотные (40°<Ф<70°) и низкоширотные (Ф<40°).

6.2.2 Индикаторы валидности предлагаемых индексов

В ходе исследований новые индексы сопоставлялись со стандартными (1-часовыми и 1-минутными) индексами: среднечасовой Dst-индекс рассчитывался по 4 приэкваториальным станциям (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/) и его 1-мин аналог SYM-H/ASYM-H (https://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) по 6 приэкваториальным станциям. Они характеризуют магнитную бурю и кольцевой ток. Авроральные 1-мин индексы AE/AU/AL (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/) рассчитывались по 11 авроральным станциям, индекс AL реагирует на начало суббури, а AE – на ее величину. PCN/PCS (https://pcindex.org/) – индексы полярных шапок, описывающие транспорт энергии из солнечного ветра в магнитосферу [*Janzhura et al.*, 2007]. Также рассматривался уточненный индекс PC-n [*Stauning*, 2007].

Рассмотрены и неофициальные индексы: 1-мин индексы SME/SML/SMU (https://supermag.jhuapl.edu/indices/) (SuperMAG, > 150 станций в широтах 50°–90°) – уточняют AE/AL/AU [*Gjerloev,* 2012]. УНЧ-индекс Sgr (http://ulf.gcras.ru/) характеризует спектральную мощность пульсаций 1,7–7,0 мГц в северном полушарии. EI (electrojet indicator) (Финляндия) характеризует интенсивность аврорального электроджета в Скандинавии по сети IMAGE.

6.2.3 Элементы формализации предлагаемых индексов

Предложено ввести следующие региональные индексы для территории Российской Федерации:

SME-R [нТл] – 1-мин индекс, рассчитываемый по данным до 18 российских станций в геомагнитных широтах 50°–79,5°. Суточный тренд удаляется вычитанием среднегодового значения с окном 17 дней (методика SuperMAG) [*Gjerloev*, 2012].

VAR [нТл/мин] – 15-минутный индекс вариабельности поля, равный модулю производной $dB/dt = \sqrt{dX/dt^2 + dY/dt^2}$ по 1-мин данным горизонтальных компонент. У него есть два подтипа: (а) VAR за 15-мин интервал, усредненный по всем станциям Российской Федерации; (б) VAR-max – максимальное значение dB/dt на любой станции в течение 15 мин.

JW – 1-мин индекс полного тока западного аврорального электроджета [*Evdokimova and Petrukovich*, 2020], рассчитываемый по меридиональной цепочке станций. Достоверен только при наличии суббури. Для цепочек с большим числом станций – многопараметрические модели, для малого числа – трехпараметрическая модель тока и его границ.

6.2.4 Сопоставление различных индексов для магнитных бурь 2015 г.

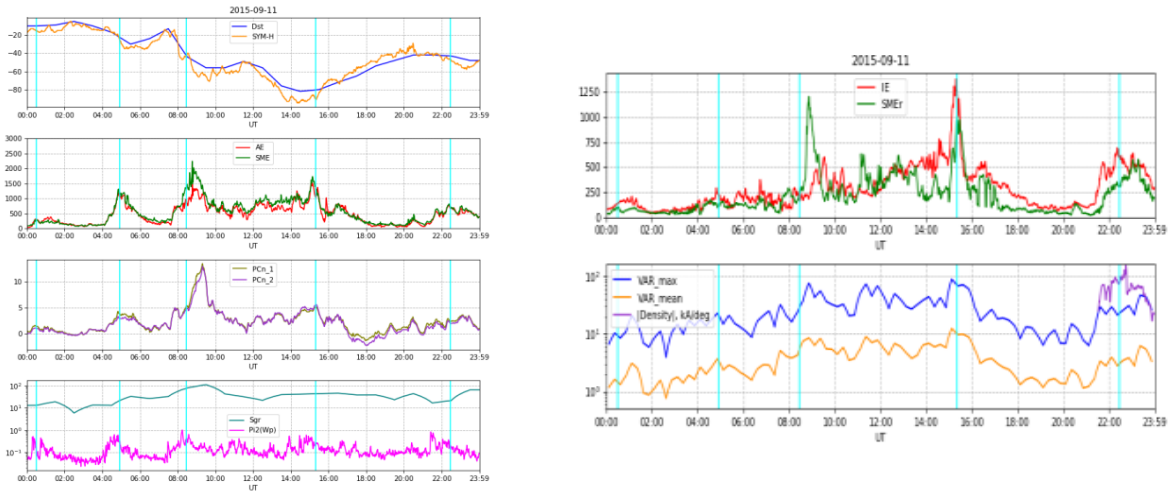
Для сравнения предложенных индексов между собой и со стандартными индексами они рассчитывались по разным алгоритмам для трех дней 2015 г. с наиболее сильными бурями – 2015/09/11, 2015/06/23 и 2015/03/17. Начало суббурь отмечалось по индексу MPB [*Forsyth et al.*, 2015; *McPherron and Chu*, 2017], а рассмотрение велось в порядке нарастания величины магнитной бури (экстремальное значение величины Dst).

Для бури 2015/09/11 фаза роста длилась с 02 до 14 UT. Dst сглаживает вариации SYM-H (SYM-H ~ -95 нТл). На фоне бури зафиксировано 5 активизаций (~05, ~09, ~15, ~22 UT), видимых в AE, SME, PCN-индексах. Начала совпадают с MPB и Pi2(Wp)-индексами. Активизация в 00:40 UT слабо видна в AE-индексе, но четко – в Pi2(Wp). Иногда AE-индекс может занижать возмущение, если суббуря развивается вне сектора стандартных обсерваторий: в ~09 UT SME ~ 2500 нТл, а AE ~ 1300 нТл. PCN и PCN-n близки, опережающего роста PCN нет.

Региональные индексы (рис. 6.2): EI реагирует на суббури в Скандинавии (~09, ~15, ~20 UT), SME-R показывает их отчетливее. JW (21–24 UT) совпадает с EI. VAR-max возрастает от 10 до ~ 100 нТл/мин. VAR-mean повторяет VAR-max. Вариабельность VAR отнюдь не соответствует однозначно величине SME-R. Максимум VAR отмечен не при самой интенсивной суббуре (09 UT), а при более слабой (15 UT).

Для бури 2015/06/23 на фоне плавной фазы восстановления происходит несколько активизаций. SME показывает их отчетливее, чем AE. Для этой сложной бури результаты определения начал суббуревых активизаций по разным методикам расходятся. По MPB в ~04 UT активизации нет, но она есть в AE и Pi2; в ~05 UT – наоборот. PCN и PCN-n расходятся на 2–3 мВ/м, опережающего роста PCN нет. SME-R показывает не все суббури, видимые в SME. JW (20–00 UT) не совпадает с EI. Временной ход вариабельности VAR в целом соответствует ходу SME-R.

Во время известной бури св. Патрика 2015/03/17 наблюдается длительная фаза развития с ~05 UT, несколько активизаций (~07, ~09, ~14, ~21, ~23 UT) по AE, SME, PCN. Активизация ~18 UT видна в PCN и Pi2(Wp), но не в AE или SME. SME-R показывает меньше активизаций, чем SME и AE, так как часть суббурь развивается в другом секторе. Как и в рассмотренных выше событиях VAR-max синхронен с VAR-mean. Каждое усиление VAR соответствует росту SME-R, но однозначной связи величин нет. JW (17–23 UT) хорошо совпадает с EI.



(а) (б)

Рисунок 6.2 – (а) Планетарные геомагнитные индексы для магнитной бури 2015/09/11: 1-часовой Dst индекс и 1-мин SYM-H индекс. Вертикальными розовыми линиями отмечены начала суббурь по индексу MPB; 1-минутные AE и SME индексы; 1-мин PCN индексы: стандартный (синяя линия) и модифицированный (красным); 1-часовой индекс наземной УНЧ активности Sgr, 1-мин индекс активности Pi2 пульсаций Wp. (б) Региональные геомагнитные индексы для магнитной бури 2015/09/11: индекс интенсивности электроджета EI, индекс Jw; вариабельность геомагнитного поля в российском секторе: VAR-mean – среднее dB/dt за 15 мин по всем станциям России (синим), и VAR-max – максимальное dB/dt за 15 мин из всех станций России (красным). Вертикальными розовыми линиями отмечены начала суббурь по индексу MPB

6.2.5 Анализ результатов

Сравнительный анализ геомагнитных индексов показал: SME-индекс реагирует на суббури четче, чем AE-индекс, и предпочтителен для глобальной авроральной активности. Dst-индекс сглаживает экстремумы SYM-H. AE может занижать магнитуду возмущений при неблагоприятном расположении станций. SME-R позволяет исключить суббури вне российского сектора. Однако индекса, адекватно описывающего суббуревую активность, не существует из-за отсутствия общепринятого определения суббури и критериев отличия от псевдоактивизаций, а редкие сети станций могут давать некорректные результаты. Поэтому существующие алгоритмы определения характеристик суббурь противоречивы: SOPHIE (~8 интенсификаций/день), MPB (~10), [*Borovsky and Yakymenko*, 2017] (~2). В то же время каталог SuperMAG содержит много ложных активизаций. Надежнее использовать комплекс индексов (AL, SML, MDI, Wp). Геомагнитные индексы, в свою очередь, могут быть полезны при поиске предвестников землетрясений и извержений вулканов [*Surkov and Pilipenko*, 2015]. ULF-индекс поможет разделить локальные аномалии и планетарные возмущения [*Currie and Waters*, 2014]. С помощью Wp-индекса было показано магнитосферное происхождение сигналов, ошибочно принимаемых за предвестники землетрясений [*Костерин и др.*, 2015]. Расчет электроджета по IMAGE иногда расходится с EI, причина этого выясняется. Зависимость SME-R от числа станций также не изучена. В данном случае из расчетов были исключены низкоширотные (Ф<40°) станции, а влияние полярных (Ф>70°) на величину индексов еще предстоит оценить. Индексы VAR и VAR-max растут при суббурях, но их величины не связаны напрямую с AE или SME индексами. Поэтому для моделей геоиндуцированных токов (ГИТ) в России стандартных индексов недостаточно – нужны SME-R и VAR индексы.

6.2.6 Заключение

В настоящее время из-за нечеткости определений и редких сетей станций отсутствует адекватный индикатор суббуревой активности. В ходе исследований разработаны и опробованы алгоритмы расчета региональных индексов для российской Арктики на базе Больших данных ГЦ РАН. Индексы, полученные в ходе исследований, являются региональными модификациями уже существующих индексов, адаптированных к Big Data.

6.3 Применение методов дистанционного зондирования Земли в задачах спектрального дешифрирования редкоземельных минералов в условиях Арктики

6.3.1 Современная изученность месторождений редкоземельных элементов в Арктической зоне Российской Федерации

Освоение месторождений редкоземельных элементов (РЗЭ) в АЗРФ имеет не только экономическое, но и стратегическое значение, поскольку РЗЭ являются важнейшей сырьевой основой для современной электроники, энергетики, оптоэлектроники и высокотехнологичной промышленности. Несмотря на наличие в АЗРФ крупных и хорошо известных объектов, прежде всего на Кольском полуострове, степень их изученности по ряду участков остается недостаточной, особенно в части детального установления минеральных форм носителей РЗЭ, условий их пространственной локализации и технологических возможностей извлечения. Для Кольского региона это особенно актуально, поскольку часть РЗЭ сосредоточена не только в коренных объектах, но и в техногенных продуктах переработки. В связи с этим особую важность приобретает интеграция методов дистанционного зондирования, геохимических и геолого-минералогических данных для раннего выявления перспективных участков и повышения эффективности последующих поисково-оценочных работ [*Kalashnikov et al.*, 2016; *Goodenough et al.*, 2018; *Solovyova and Cherepovitsyna*, 2023].

6.3.2 Спектральные методы поиска и картирования минералов-носителей редкоземельных элементов

Одним из наиболее перспективных направлений является спектральное дешифрирование минералов-носителей редкоземельных элементов. Его основой служит анализ отражательных спектров поверхности в диапазоне VNIR-SWIR и выявление характерных узких полос поглощения, связанных с электронными переходами ионов редкоземельных элементов, прежде всего Nd, Pr, Sm и Dy. Подобные особенности могут быть зафиксированы у монацита, бастнезита, ксенотима, эвдиалита и других минералов.

Наиболее надежное распознавание таких полос достигается по гиперспектральным данным, однако мультиспектральные сенсоры, в частности Sentinel-2 MSI, также могут использоваться на этапе регионального скрининга при условии осторожной интерпретации результатов и их последующей проверки по более детализированным данным. Практическая схема применения ДЗЗ в задачах поиска РЗЭ включает три уровня: региональное ранжирование контрастов, локальное уточнение по гиперспектральным материалам и этап подтверждения наземными и лабораторными методами [*Kokaly et al.*, 2017; *Boesche et al.*, 2015; *Asadzadeh et al.*, 2024].

В качестве ключевого инструмента спектрального выделения целевых объектов использован метод адаптивного косинусного оценщика Adaptive Cosine Estimator, ACE. Этот метод относится к классу спектральных детекторов и предназначен для поиска пикселей,

спектральная подпись которых близка к выбранному эталонному спектру с учетом статистических характеристик фона. Принцип его работы заключается в сопоставлении спектра каждого пикселя с целевым спектром не напрямую, а с учетом ковариационной структуры фонового сигнала, что позволяет уменьшить влияние коррелированного шума и повысить устойчивость выявления контрастов.

Нормированная метрика ACE рассчитывается по формуле:

$$ACE(x) = \frac{(s^T K^{-1} x)^2}{(s^T K^{-1} s)(x^T K^{-1} x)}, \quad (6.1)$$

где s^T – транспонированный вектор целевого спектра; K^{-1} – обратная ковариационная матрица фонового сигнала; x – вектор спектральных значений пикселя.

Значения метрики ACE изменяются от 0 до 1: низкие значения соответствуют слабому сходству с эталоном, а высокие указывают на значительную степень спектрального соответствия [*Karimzadeh and Tangestani*, 2022]. При этом использование метода требует учета ограничений, связанных с влиянием растительности, влажности, продуктов выветривания, общей шириной спектральных каналов мультиспектральной съемки. Поэтому результаты ACE следует рассматривать как вероятностную индикацию перспективных зон, а не как прямое доказательство присутствия конкретного минерала.

6.3.3 Выявление потенциальных точек скопления РЗЭ на территории Хибинского массива Кольского полуострова

Практическая апробация методики выполнена для территории Хибинского массива Кольского полуострова, который является одним из наиболее значимых редкоземельных и апатит-нефелиновых объектов Арктики. Хибинский массив представляет собой крупную многофазную щелочную интрузию кольцевого строения, сложенную нефелиновыми сиенитами, фоидолитами и поздними карбонатитами. Его минералого-геохимическая специфика делает территорию особенно важной для задач дистанционного картирования РЗЭ. Главным концентратором редкоземельных элементов здесь выступает фторапатит апатит-нефелиновых тел, а также ассоциированные минералы и техногенные продукты переработки. Существенное значение имеют и косвенные признаки, связанные с фенитизацией, щелочными метасоматитами, особенностями вмещающих пород и общей метасоматической зональностью [*Kalashnikov et al.*, 2016; *Kogarko*, 2018; *Kogarko*, 2023].

Для реализации алгоритма использована облачная геоинформационная платформа Google Earth Engine с применением языка JavaScript. Исходными данными послужили снимки коллекции COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED за летний период 2021 года для территории Хибинского массива. Отбор выполнялся по критерию минимальной облачности, а в дальнейшей обработке использовался композит девяти каналов Sentinel-2 MSI: B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 и B12. Эти каналы охватывают видимую область спектра, зону «красного края», ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный диапазоны, что обеспечивает приемлемое сочетание спектральной информативности и пространственной детализации при решении поисковой задачи.

В качестве эталонного сигнала использован лабораторный спектр монацита, предварительно адаптированный к спектральным каналам Sentinel-2 MSI путем свертки с функциями спектрального отклика сенсора. Наиболее устойчивые диагностические полосы фиксируются в интервалах 0,58–0,60 мкм, ~0,74 мкм, 0,80–0,82 мкм и ~0,87 мкм, а также как более слабые поглощения в ближнем ИК (1,3–1,6 мкм) (рис. 6.3); их корректная идентификация требует высококачественных гиперспектральных данных и эталонных библиотек [*Kokaly et al.*, 2017; *Boesche et al.*, 2015].

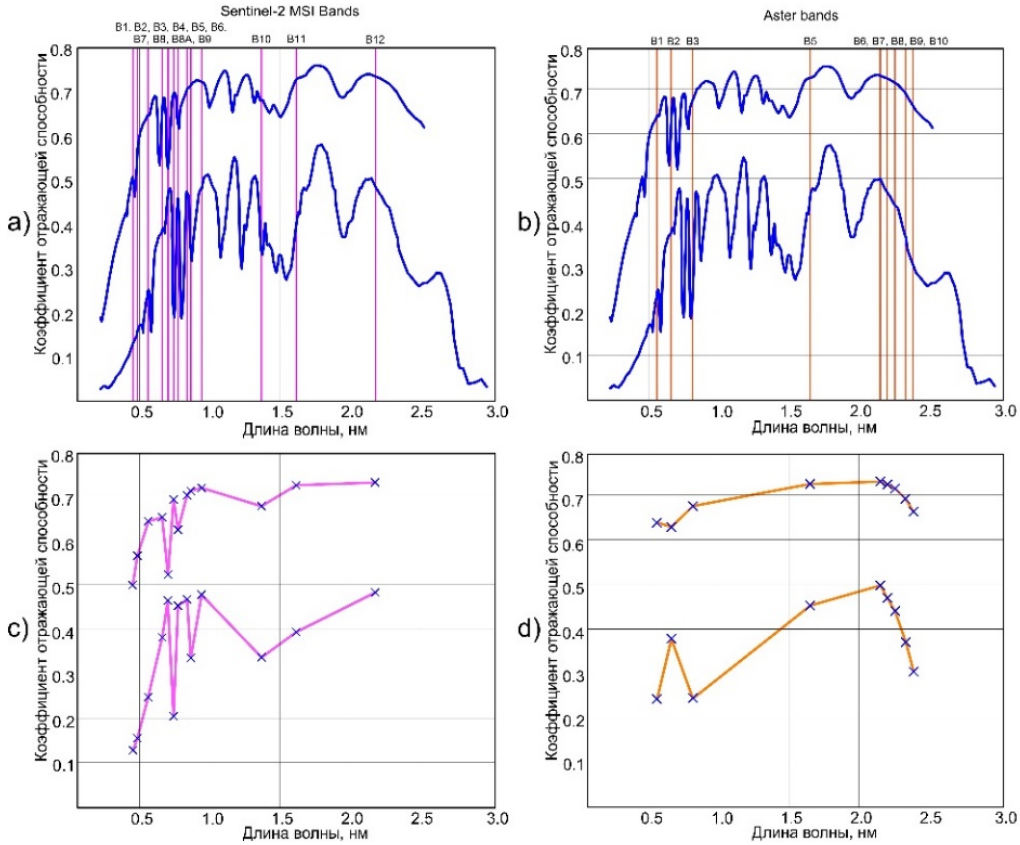


Рисунок 6.3 – (a), (b) – лабораторные спектры монацита [*Kokaly et al*., 2017] и положения каналов Sentinel-2 MSI и ASTER, вертикальные линии указывают положения центров диапазонов каналов;(c), (d) – спектры монацита, свернутые под спектральную дискретизацию Sentinel-2 MSI и ASTER

Для каждого пикселя рабочего композита формировался спектральный вектор по выбранным каналам, а по всей исследуемой территории рассчитывалась ковариационная матрица фонового сигнала с исключением водных и облачных участков. Рабочий композит создавался по сценам летнего периода с маскированием водных поверхностей по индексу NDWI и вычислением медианных значений отражения в пределах контура массива. Отдельно формировался фоновый естественно-цветный композит, использованный для визуального сопоставления контрастов с морфологией местности и типами подстилающей поверхности. Такая организация обработки позволила разделить собственно вычислительный этап и этап экспертной интерпретации результатов.

По итогам расчетов полученные значения ACE приведены к дискретной шкале интервалов и использованы для построения карты пространственного распределения зон, спектрально близких к эталонному спектру монацита (рис. 6.4). Эта карта позволила выделить участки с повышенной вероятностью присутствия редкоземельной минерализации

на территории Хибинского массива. Вместе с тем первичные результаты нуждались в экспертной фильтрации, поскольку высокие значения ACE могли быть связаны не только с минералогическими особенностями, но и с наличием спектрально контрастных объектов, таких как антропогенные поверхности, карьеры, отвалы, участки открытых скал, водные объекты или территории с ослабленным растительным покровом. Сопоставление с естественно-цветным композитом Sentinel-2 и дополнительной информацией о характере поверхности позволило исключить часть ложноположительных контрастов и получить более достоверную итоговую схему распределения потенциальных редкоземельных участков.

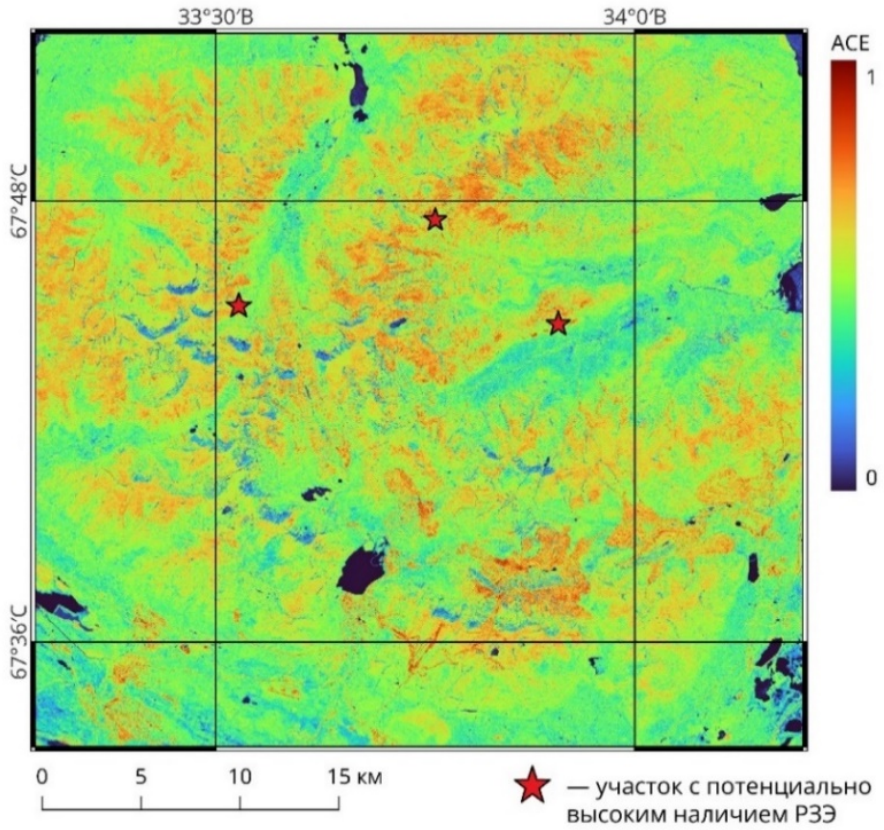


Рисунок 6.4 – Карта распределения значений ACE по Хибинскому массиву с выделением потенциальных редкоземельных участков

6.3.4 Заключение

Мультиспектральные данные Sentinel-2 в сочетании с методом ACE и облачной обработкой в Google Earth Engine могут использоваться как инструмент предварительного поиска и ранжирования перспективных зон в арктических условиях. Основное достоинство подхода заключается в возможности обработки больших территорий, быстрого выделения точек интереса и формирования основы для последующей полевой, лабораторной и гиперспектральной проверки. В то же время ограничения мультиспектральной съемки не позволяют рассматривать полученные результаты как окончательное доказательство наличия конкретных минералов-носителей РЗЭ. Поэтому наиболее рациональной представляется многоэтапная схема, в которой Sentinel-2 применяется на стадии первичного скрининга, а дальнейшее уточнение выполняется на основе гиперспектральных данных, наземной спектрометрии, геохимического опробования и геологической интерпретации.

6.4 Геологическая характеристика и составление геологической карты северо-западной части Оймяконского района

6.4.1 Построение геологической карты

В рамках НИР выполнено геологическое изучение северо-западной части Оймяконского района Республики Саха (Якутия), где сохраняется высокая хозяйственная и минерагеническая значимость территории. Основной задачей стало составление сводной геологической карты и ее интерпретация на основе государственных, фондовых и опубликованных материалов, что позволило уточнить строение района и его золотоносность.

Район картографирования охватывает около 11,6 тыс. км^2 в пределах 64°13′–65°24′ с.ш. и 140°19′–142°12′ в.д. в системе ГСК-2011. Карта составлена по материалам геологических съемок и камеральных работ, выполненных Верхне-Индигирской экспедицией и смежными организациями в районе Усть-Неры. Основу составили государственные геологические карты масштаба 1:1 000 000 и 1:200 000, прежде всего лист Q-54 «Усть-Нера» и листы Q-54-XXVII, XXVIII, а также фондовые материалы по золотоносности района [*Протопопов и др.*, 2018, 2019; *Нургалеев и Соболев*, 2016].

При построении карты использовались: программная ГИС-платформа NextGIS QGIS и редактор векторной графики CorelDRAW. По картам дочетвертичных образований и объяснительным запискам обобщены стратиграфия, литолого-фациальные особенности триасовых, юрских и меловых толщ, а также распространение интрузивных комплексов [*Протопопов и др.*, 2018, 2019]. Для уточнения складчатой структуры, тектонических линий, простирания пластов и положения дайковых полей привлекались материалы геологической съемки масштаба 1:200 000 [*Нургалеев и Соболев*, 2016]. Информация о рудных и россыпных объектах, минеральных зонах и закономерностях размещения оруденения использовалась для нанесения золотоносных площадей и уточнения их структурной приуроченности [*Ахъяев*, 2008].

Четвертичные и позднекайнозойские отложения наносились с учетом карт четвертичных образований и фондовых данных по долинам Эльги, Ольчана и Иньяли. При этом уточнялись контуры покровных толщ, террасовые уровни и современные аллювиальные образования, играющие важную роль в формировании россыпей. Гидрографическая основа была заимствована из цифровой топографической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000.

Созданная карта (рис. 6.5) представляет собой обобщенный картографический продукт, который объединяет сведения о стратиграфии, интрузивном магматизме, разломной тектонике и золотоносности района. Все основные элементы воспроизведены в соответствии с исходными геологическими материалами и фондовыми данными, а сама карта может использоваться как основа для дальнейших тематических и прогнозных исследований.

6.4.2 Геологическая характеристика территории

Исследуемая территория расположена в северо-восточной части Якутии, главным образом в пределах Оймяконского района, частично затрагивая Томпонский район. В физико-географическом отношении она приурочена к бассейну реки Эльги, а северо-восточ-

ная часть относится к системе хребта Черского. В промышленно-геологическом районировании площадь входит в Верхне-Индигирский горнопромышленный район, известный высокой концентрацией золоторудных и россыпных объектов.

Рельеф района в основном среднегорный, с абсолютными высотами 1000–1800 м, при этом отдельные массивы достигают 2000–2500 м. Территория расчленена глубоко врезанными долинами и тектоническими понижениями северо-восточного и северо-западного простирания. Гидросеть относится к бассейну верхней Индигирки и представлена реками Эльга, Ольчан, Иньяли и их притоками. В долинах и на террасах широко развиты аллювиальные толщи, во многом контролирующие размещение россыпного золота. Климат резко континентальный, с распространением многолетнемерзлых пород и активными криогенными процессами, что усиливает физическое выветривание и переотложение рыхлого материала.

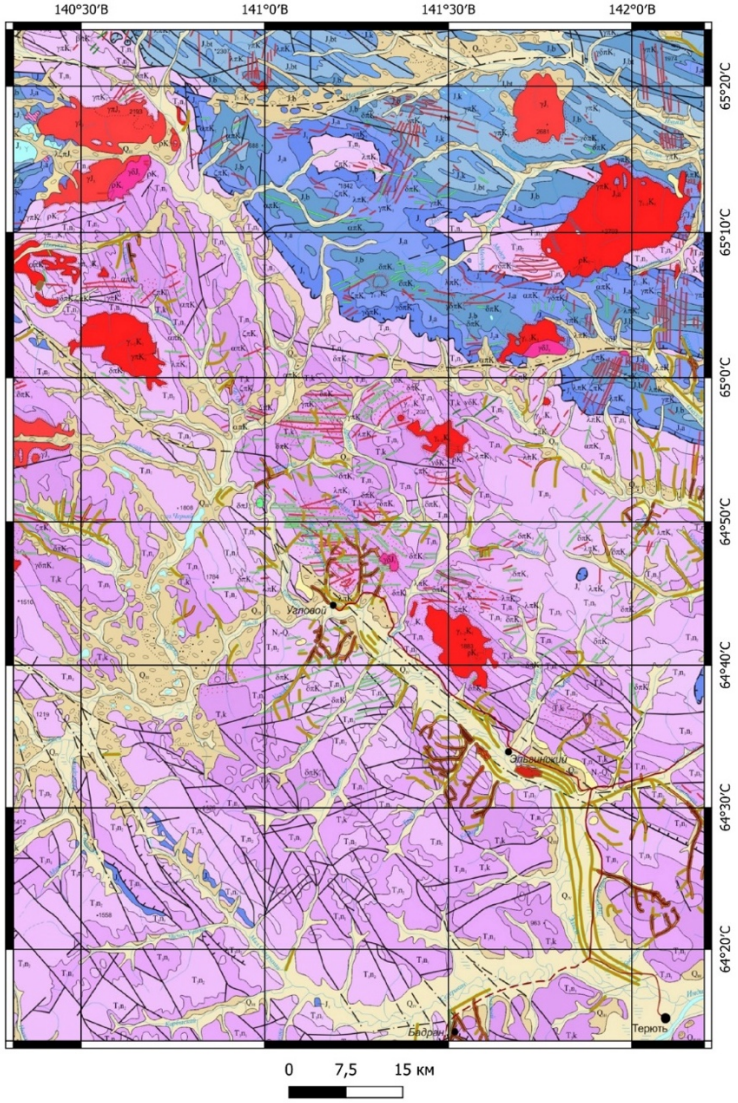


Рисунок 6.5 – Геологическая карта северо-западной части Оймяконского района

В геологическом строении района участвуют осадочные и осадочно-вулканогенные образования триаса и юры, интрузивные комплексы раннемелового возраста, а также неоген-четвертичные покровные отложения. Наиболее широко распространены триасовые породы, представленные карнийскими и норийскими толщами. Карнийские отложения

развиты ограниченно и сложены преимущественно алевролитами и тонкослоистыми песчаниками. Основную часть триаса составляют норийские отложения, подразделяемые на нижние, средние и верхние горизонты. Для них характерны алевролиты, аргиллиты, алевропесчаники и песчаники, причем вверх по разрезу заметно возрастает доля более грубого материала. Верхненорийские песчанистые толщи формируют значительные площади карты и часто слагают водораздельные гряды [*Протопопов и др.*, 2019].

Юрские образования широко развиты в северо-восточной части района и перекрывают триасовые толщи согласно либо с небольшими нарушениями. Нижняя юра представлена аргиллитами, алевролитами, глинистыми и кремнистыми сланцами с подчиненными песчаниками. В среднем отделе возрастает роль песчанистого материала: ааленские, байосские и батские толщи включают ритмично переслаивающиеся алевролиты, аргиллиты и песчаники, местами с признаками вулканогенной примеси. В целом юрская система отражает переход от более тонкозернистого терригенного осадконакопления к более грубому и активному [*Протопопов и др.*, 2019].

Меловые осадочные толщи выражены слабо, но ранний мел имеет ключевое значение благодаря развитию Колымского интрузивного комплекса. Первая фаза представлена гранодиоритами, граносиенитами, кварцевыми диоритами и гранитами, вторая – более светлыми гранитами, гранит-порфирами и микрогранитами. Эти интрузии внедряются в триасово-юрские толщи, формируют батолиты, штоки и дайковые тела, вызывают контактовый метаморфизм и метасоматические изменения. С ними связаны окварцевание, грейзенизация, развитие роговиков и биотит-хлоритовых пород, что делает интрузивные узлы важнейшими центрами рудообразования [*Нургалеев и Соболев*, 2016].

Неогеновые и четвертичные отложения занимают долины рек, террасы, понижения рельефа и частично водораздельные поверхности. Они представлены конгломератами, гравелитами, песчано-галечниковыми толщами, супесями, суглинками и современными русловыми отложениями. Именно эти комплексы играют главную роль в накоплении и сохранении россыпного золота, поскольку служат ловушками для материала, поступающего при разрушении золотоносных коренных источников [*Нургалеев и Соболев*, 2016].

Тектоническое строение района определяется прежде всего Адыча-Эльгинской тектонической зоной, в пределах которой развиты крупные разломы северо-восточного и северо-западного направлений, линейные складки, надвигово-чешуйчатые структуры и зоны интенсивной хрупко-пластической деформации. Ключевыми элементами являются Делине-Селериканский и Бадран-Эгеляхский разломы. Вдоль них прослеживаются полосы милонитов, катаклазитов, тектонических брекчий, зоны рассланцевания, а также участки внедрения гранитоидов и даек. Эти структуры не только формируют общий каркас района, но и контролируют миграцию гидротермальных растворов, развитие кварцевых жил и локализацию рудной минерализации [*Протопопов и др.*, 2019].

Минерагенически район относится к Ольчано-Нерской и Адыча-Тарынской золото-сурьмяным зонам Верхояно-Колымской провинции. Здесь развиты жильные, жильно-прожилковые и штокверковые тела малосульфидной золото-кварцевой формации, а также золото-сурьмяные проявления. По фондовым и опубликованным данным в пределах карты известно более десяти золоторудных узлов. Особенно важны россыпные месторождения, сформированные в несколько этапов от позднего мела до голоцена. Крупные россыпи приурочены к долинам Эльги, Ольчана, Иньяли и ряду притоков, а их основной источник связан с разрушением кварцевожильных и гидротермально измененных коренных тел [*Ахъяев*, 2008].

Таким образом, северо-западная часть Оймяконского района представляет собой сложную геологическую систему, где триасово-юрские осадочные толщи, раннемеловые интрузии и позднекайнозойские рыхлые образования объединены единым тектоно-минерагеническим каркасом. Решающее значение имеет Адыча-Эльгинская зона, контролирующая складчатость, разломы, внедрение магмы и размещение золоторудных объектов. Составленная карта уточняет геологическую основу территории и может использоваться для дальнейшего районирования, прогноза рудоносности и оценки минерально-сырьевого потенциала арктических и субарктических районов Якутии.

6.3 Внедрение цифровой модели высокого разрешения ArcticDEM в веб-ГИС сервисы

Современные исследования региона АЗРФ требуют наличия точной пространственной информации о рельефе региона. Актуальные высокодетальные цифровые модели поверхности и рельефа и позволяют изучать морфологию территорий, изучать природные процессы и проводить анализ ландшафтов. Одним из наиболее детальных источников данных для высоких широт на сегодняшний день является модель ArcticDEM [*Porter et al.*, 2023].

ArcticDEM представляет собой цифровую модель поверхности (ЦМП), охватывающую сушу Арктики, включая территории Российской Федерации, Гренландии, Аляски и Камчатки. В отличие от классической цифровой модели рельефа, она отражает первую видимую поверхность, поэтому в данные включаются не только формы рельефа, но и растительность, здания и другие объекты.

Проект ArcticDEM реализуется Polar Geospatial Center на основе стереоизображений спутников WorldView-1/2/3 и GeoEye-1. Обработка выполнялась алгоритмом SETSM [*Noh and Howat*, 2017], предназначенным для автоматического построения высотных моделей по спутниковым стереопарам. Итоговые данные представлены в виде полосовых моделей и мозаик. Технические характеристики модели ArcticDEM представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 – Технические характеристики модели ArcticDEM

Параметр	Значение
Формат данных	Cloud Optimized GeoTIFF (COG), 32-бит
Пространственное разрешение	2 м (основное), также доступны варианты 10, 32, 100, 500 м и 1 км
Система координат	NSIDC Sea Ice Polar Stereographic North, EPSG:3413, датум WGS84
Высотная основа	Высоты над эллипсоидом WGS84 (возможны отрицательные значения у побережья)
Единица измерения	Метры
Пустые значения (NoData)	–9999
Постобработка	Выравнивание по Copernicus DEM GLO-30
Коррекция рельефа по водным объектам	На основе классов водных тел ESA WorldCover 2020
Объем памяти	17 терабайт

Мозаики формируются из фрагментов размером 100×100 км, дополнительно разделенных на плитки 50×50 км. Для повышения качества используется медианный метод объединения с фильтрацией выбросов. В версии v4.1 была выполнена коррекция водных поверхностей и вертикальная привязка по Copernicus DEM GLO-30. Общий объем модели составляет около 17 ТБ.

Основная практическая задача заключалась во внедрении ArcticDEM в веб-ГИС. Это связано с рядом технических трудностей. При пространственном разрешении 2 м и полном покрытии Арктики модель содержит огромный объем данных, что делает невозможной эффективную публикацию исходных GeoTIFF-файлов напрямую. В таком случае серверу приходится в реальном времени выполнять чтение, обрезку, перепроецирование и визуализацию крупных растров, что резко снижает производительность.

Для решения этой проблемы была применена тайловая (плиточная) схема визуализации. Ее суть заключается в предварительной подготовке и кэшировании небольших фрагментов изображения, которые подгружаются только по мере необходимости. Такой подход уменьшает нагрузку на сервер, ускоряет работу картографического интерфейса и позволяет обслуживать одновременно большое число пользователей.

В качестве исходных данных использовалась мозаика ArcticDEM v4.1 с разрешением 2 м. Были загружены два типа файлов: DEM, содержащие абсолютные высоты поверхности, и Hillshade, представляющие отмывку рельефа для наглядной визуализации. Из полного массива данных были отобраны только те плитки, которые покрывают территорию Российской Федерации, включая Арктическую зону, районы севернее 60° с. ш. и Камчатку.

Для снижения вычислительной нагрузки выбранные данные были разбиты на 19 региональных наборов. Такое решение позволило избежать перегрузки сервера при обработке большого числа крупных файлов. В результате было подготовлено 4388 файлов типа Hillshade общим объемом около 92,8 ГБ и 4388 файлов DEM общим объемом около 4,2 ТБ.

Подготовленные данные были размещены на локальном сервере, на котором предварительно развернуто программное обеспечение GeoServer. На его основе создан слой типа ImageMosaic, обеспечивающий автоматическое объединение отдельных растров в единый виртуальный слой с пространственным индексированием и динамической подгрузкой. Дополнительно выполнялось перепроецирование данных в систему координат, пригодную для веб-картографических приложений.

Для отображения слоя использовались заранее подготовленные SLD-стили, задающие правила визуализации высотной основы и теневой отмывки. Публикация выполнялась по протоколу WMS. Для ускорения доступа было подключено расширение GeoWebCache, которое осуществляет кэширование изображений и формирование плиток на уровнях масштабирования 0–15. Доступ к подготовленным данным предоставлялся по протоколу TMS. Механизм внедрения модели представлен на рис. 6.6.

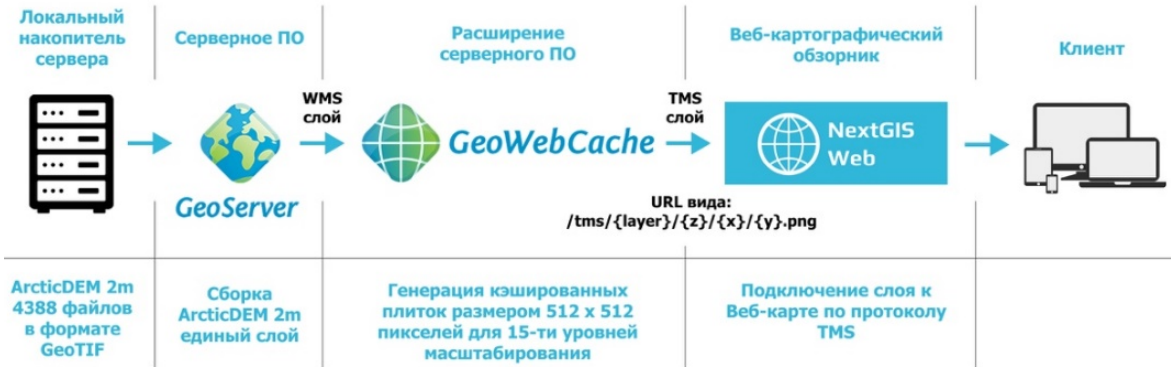


Рисунок 6.6 – Схема внедрения модели ArcticDEM в веб-ГИС

Практический результат состоит в создании доступных через сеть Интернет слоев высотной основы и теневой отмывки рельефа для геопорталов, ориентированных на арктические исследования. Применение данного подхода позволило обеспечить стабильную загрузку слоя, высокую скорость отклика и доступность детализированных моделей рельефа в веб-ГИС порталах.

Итоговые TMS-слои были интегрированы в веб-ГИС на платформе NextGIS Web (рис. 6.7). Они предназначены для использования в ГИС-проекте «ГИС Большие данные в арктических исследованиях».

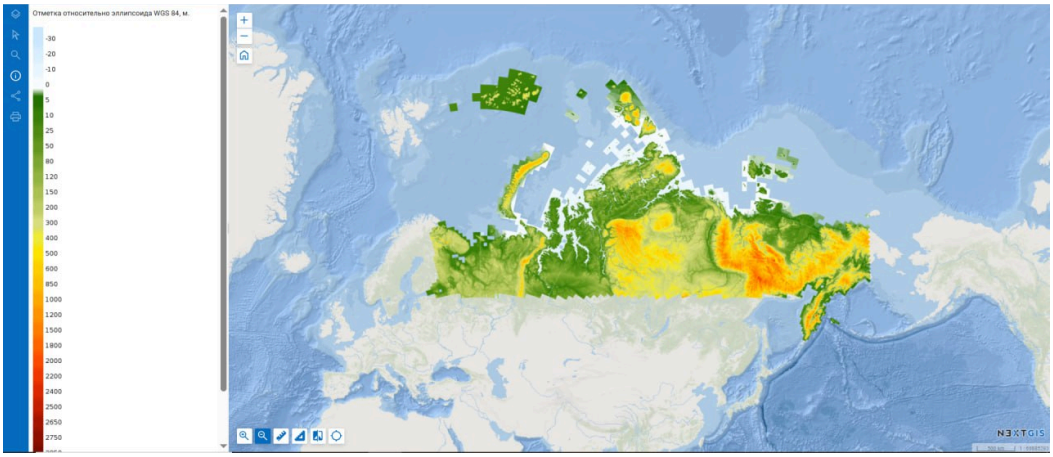


Рисунок 6.7 – Модель ArcticDEM (высотная основа), добавленная на геопортал

Список использованных источников

Ахъяев М. Р. Отчет по переоценке минерально-сырьевой базы Верхне-Индигирского горнопромышленного района (с составлением комплекта карт золотоносности масштаба 1:500000 на листы Q-54,55; P-54,55). Лист Q-54-В,Г. – 2008.

Белаховский В. Б., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. – 2018. – № 1. – С. 56–68. – DOI: 10.7868/S0002333718010052.

Костерин Н. А., Пилипенко В. А., Дмитриев Э. М. О глобальных ультранизкочастотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16, № 1. – С. 24–34. – URL: https://portal.ifz.ru/geofizicheskie-issledovaniya/soderzhanie/tom-16-nomer-1-2015/03.

Нургалеев Р. Ю., Соболев А. Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Верхоянская. Лист Q-54-XXVII, XXVIII. Объяснительная записка // Минприроды России, Государственный комитет Республики Саха (Якутия) по геологии и недропользованию, ГУП ГГП «Восточно-Якутское», ГУДП «Верхне-Индигирская Экспедиция». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016. – 89 с.

Протопопов Г. Х., Трущелев А. М., Кузнецов Ю. В., Войтенко В. Н., Радулевич Я. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Геологическая карта дочетвертичных образований. Верхояно-Колымская серия. Лист Q-54 – Усть-Нера. Масштаб 1:1 000 000 // Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «Якутскгеология». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2018.

Протопопов Г. Х., Трущелев А. М., Кузнецов Ю. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхоянско-Колымская. Лист Q-54 – Усть-Нера. Объяснительная записка // Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «Якутскгеология». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. – 845 с.

Птицына Н. Г., Тясто М. И., Касинский В. В., Ляхов Н. Н. Влияние космической погоды на технические системы: сбои железнодорожной телеметрии во время геомагнитных бурь // Солнечно-земная физика. – 2008. – Вып. 12, Т. 2. – С. 360. – URL: http://ru.iszf.irk.ru/images/3/32/360.pdf.

Соколова О. Н., Сахаров Я. А., Грицутенко С. С., Коровкин Н. В. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 5. – С. 33–52. – DOI: 10.1134/S0002331019050145.

Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Gamayunov I. F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips // Advances in Space Research. – 2009. – Vol. 43, № 6. – P. 964–972. – DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.015.

Asadzadeh S., Koellner N., Chabrillat S. Detecting rare earth elements using EnMAP hyperspectral satellite data: a case study from Mountain Pass, California // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Article 20766. – DOI: 10.1038/s41598-024-71395-2.

Boesche N. K., Rogass C., Lubitz C. et al. Hyperspectral REE (Rare Earth Element) Mapping of Outcrops – Applications for Neodymium Detection // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7, No. 5. – P. 5160–5183. – DOI: 10.3390/rs70505160.

Borovsky J. E., Yakymenko K. Systems science of the magnetosphere: Creating indices of substorm activity, of the substorm-injected electron population, and of the electron radiation belt // Journal of Geophysical Research. Space Physics. – 2017. – Vol. 122. – P. 10012–10035. – DOI: 10.1002/2017JA024250.

Currie J. L., Waters C. L. On the use of geomagnetic indices and ULF waves for earthquake precursor signatures // Journal of Geophysical Research. Space Physics. – 2014. – Vol. 119. – P. 992–1003. – DOI: 10.1002/2013JA019530.

Evdokimova M. A., Petrukovich A. A. Estimation of the westward auroral electrojet current using sparse magnetometer chain data // Annales Geophysicae. – 2020. – Vol. 38. – P. 109–121. – DOI: 10.5194/angeo-38-109-2020.

Forsyth C., Rae I. J., Coxon J. C., Freeman M. P., Jackman C. M., Gjerloev J., Fazakerley A. N. A new technique for determining Substorm Onsets and Phases from Indices of the Electrojet (SOPHIE) // Journal of Geophysical Research. Space Physics. – 2015. – Vol. 120. – P. 10592–10606. – DOI: 10.1002/2015JA021343.

Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117. – A09213. – DOI: 10.1029/2012JA017683.

Goodenough K. M., Wall F., Merriman D. The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations // Ore Geology Reviews. – 2018. – Vol. 72, No. 1. – P. 838–856. – DOI: 10.1007/s11053-017-9336-5.

Janzhura A., Troshichev O., Stauning P. Unified PC indices: relation to the isolated magnetic substorms // Journal of Geophysical Research. – 2007. – Vol. 112. – A09207. – DOI: 10.1029/2006JA012132.

Kalashnikov A. O., Konopleva N. G., Pakhomovsky Ya. A., Ivanyuk G. Yu. Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia – A Review // Economic Geology. – 2016. – Vol. 111, No. 7. – P. 1529–1559. – DOI: 10.2113/econgeo.111.7.1529.

Karimzadeh S., Tangestani M. H. Potential of Sentinel-2 MSI data in targeting rare earth element (Nd^{3+}) bearing minerals in Esfordi phosphate deposit, Iran // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. – 2022. – Vol. 25, No. 3. – P. 697–710. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.04.001.

Kogarko L. N. Chemical composition and petrogenetic implications of apatite in the Khibiny apatite-nepheline deposits (Kola Peninsula) // Minerals. – 2018. – Vol. 8, No. 11. – Article 532. – DOI: 10.3390/min8110532.

Kogarko L. N. Rare earth element resource potential of super-large deposits in Eastern Fennoscandia // Doklady Earth Sciences. – 2023. – Vol. 513. – P. 1296–1300. – DOI: 10.1134/S1028334X23602067.

Kokaly R. F. et al. USGS Spectral Library Version 7. – USGS Data Series 1035. – Reston: U.S. Geological Survey, 2017. – 61 p. – DOI: 10.3133/ds1035.

Kozyreva O. V., Pilipenko V. A., Zakharov V. I., Engebretson M. J. GPS-TEC response to the substorm onset during April 5, 2010, magnetic storm // GPS Solutions. – 2017. – Vol. 21. – P. 927–936. – DOI: 10.1007/s10291-016-0581-6.

Love J. J., Coisson P., Pulkkinen A. Global statistical maps of extreme-event magnetic observatory 1 min first differences in horizontal intensity // Geophysical Research Letters. – 2016. – Vol. 43, No 9. – P. 4126–4135.

McPherron R. L., Chu X. The Mid-Latitude Positive Bay and the MPB Index of Substorm Activity // Space Science Reviews. – 2017. – Vol. 206. – P. 91–122. – DOI: 10.1007/s11214-016-0316-6.

Newell P. T., Gjerloev J. W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // Journal of Geophysical Research. – 2011a. – Vol. 116. – A12211. – DOI: 10.1029/2011JA016779.

Newell P. T., Gjerloev J. W. Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices // Journal of Geophysical Research. – 2011b. – Vol. 116. – A12232. – DOI: 10.1029/2011JA016936.

Noh M., Howat I. M. The surface extraction from tin based search-space minimization (setsm) algorithm // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 129. – P. 55–76. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.04.019.

Pick L. J. L., Korte M. An annual proxy for the geomagnetic signal of magnetospheric currents on Earth based on observatory data from 1900–2010 // Geophysical Journal International. – 2017. – Vol. 211, No. 2. – P. 1223–1236. – DOI: 10.1093/gji/ggx367.

Pilipenko V. A., Kozyreva O. V., Engebretson M. J., Soloviev A. A. ULF wave power index for space weather and geophysical applications: A review // Russian Journal of Earth Sciences. – 2017. – Vol. 17, No. 2. – ES1004. – DOI: 10.2205/2017ES000597.

Porter C., Howat I., Noh M., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. ArcticDEM – Mosaics, Version 4.1 // Harvard Dataverse. – 2023. – Vol. 1. – DOI: 10.7910/DVN/3VDC4W.

Solovyova V., Cherepovitsyna A. Prospective industrial complexes in the Russian Arctic: focus on rare-earth metals // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 378. – Article 06005. – DOI: 10.1051/e3sconf/202337806005.

Stauning P. A new index for the interplanetary merging electric field and the global geomagnetic activity: Application of the unified polar cap indices // Space Weather. – 2007. – Vol. 5. – S09001. – DOI: 10.1029/2007SW000311.

Surkov V. V., Pilipenko V. A. Estimate of ULF electromagnetic noise caused by a fluid flow during seismic or volcano activity // Annals of Geophysics. – 2015. – Vol. 58, No. 6. – DOI: 10.4401/ag-6767.

Troshichev O., Janzhura A. Space weather monitoring by ground-based means: PC Index. – Springer Berlin, Heidelberg, – 2012. – 288 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-16803-1.

Viljanen A., Tanskanen E. I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field // Annales Geophysicae. – 2006. – Vol. 24, No. 2. – P. 725–733. – DOI: 10.5194/angeo-24-725-2006.

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

Грант РНФ №: 21-77-30010-П
Регистрационный №: 125070407907-0
Руководитель: г.н.с. д.ф.-м.н. В.А. Пилипенко

7.1 Исследование эффектов космической погоды и ГИТ

Возмущения космической погоды воздействуют на спутниковые и наземные технологические системы, что требует понимания механизмов их влияния. Выполнен обзор исследований по физике космической погоды и задач, связанных с прогнозом состояния околоземного пространства. Показано, что современные модели не позволяют полностью описать процессы, приводящие к возникновению геоиндуцированных токов (ГИТ). Прогноз ГИТ требует учёта как крупномасштабных токовых систем магнитосферы и ионосферы, так и локальных вариаций продольных токов.

Выполнено численное моделирование воздействия низкочастотных электромагнитных полей от протяжённых излучателей на ионосферу. Рассмотрено влияние передатчика ЗЕВС и линий электропередачи как возможных источников ионосферного нагрева. Показано, что излучение на частотах 50–80 Гц может вызывать незначительное повышение температуры ионов, однако влияние на электронную компоненту остаётся слабым.

Проведён анализ воздействия сильных магнитных бурь и суббурь на работу энергетических и навигационных систем. С использованием современных моделей аврорального овала построены карты возможных рисков для территории России при экстремальных значениях индексов Dst и AL. Выполнено сопоставление результатов различных моделей ионосферных возмущений и предложены подходы к оценке пространственного положения авроральных границ в периоды экстремальных бурь.

Изучено влияние антропогенных электромагнитных излучений на ионосферу. Показано, что нарушение симметрии трёхфазных токов в линиях электропередач приводит к генерации гармоник промышленной частоты, амплитуда которых может быть сопоставима с основной. Результаты моделирования свидетельствуют, что подобные излучения способны создавать поля, регистрируемые спутниковыми средствами, и требуют дальнейшего анализа их вклада в вариации естественного электромагнитного фона.

Исследована связь вариаций геоиндуцированных токов с индексами авроральной и волновой активности. Разработана аппроксимационная модель для оценки динамики ГИТ на основе двух индексов, позволяющая прогнозировать периоды усиления токов и потенциальные риски для инфраструктуры.

На основе данных многолетней регистрации ГИТ на Кольском п-ве разработаны и верифицированы статистические модели, демонстрирующие взаимосвязь ГИТ, регистрируемых в высокоширотных ЛЭП, с возмущениями космической погоды. Впервые предложено в качестве индикатора возмущений использовать видимые полярные сияния.

Выявлено, что распределение значений ГИТ в районе Кольского полуострова сопряжено со структурой полярных сияний. Выдвинута гипотеза о том, что статистика ГИТ

(при различных типах наблюдаемых сияний) характеризуется преимущественно логнормальным законом распределения и «тяжелыми хвостами», толщина которых возрастает с ростом интенсивности сияний [*Воробьев и др.,* 2026].

На основании анализа 163 899 изображений небосвода в области Кольского полуострова разработан подход к классификации полярных сияний путем автоматизированной идентификации изображений с камер всего неба. Создана система машинного зрения, идентифицирующая с точностью 96 % принадлежность изображения к одному из семи предложенных классов.

Создана база данных (https://disk.yandex.ru/i/76OMyWR4YyVYuw) геофизических событий в АЗРФ, регистрируемых синхронно с изменением режимов работы пространственно-распределенных объектов высокоширотной инфраструктуры [*Воробьев и др.,* 2025а].

Разработаны модель хранения пространственных данных геофизических полей [*Воробьев и др.,* 2025б] и подход к веб-рендерингу геофизических полей в ГИС [*Vorobeva et al.,* 2025], что позволило эффективно обрабатывать информацию и обеспечило возможность выявления аномалий и скрытых зависимостей.

Разработаны, верифицированы и формализованы в виде статистических и вероятностных моделей результаты исследования характера корреляционно-статистических взаимосвязей между вариациями геофизических параметров, регистрируемых в АЗРФ и изменением режимов работы пространственно-распределенных объектов высокоширотной инфраструктуры. Показано, что ГИТ зависят от области проявления сияний, а вероятность превышения ими некоторого значения дается выражением: $P(J_0) = a \cdot \exp(b \cdot J_0) + c$, где J_0 – пороговое значение ГИТ; a, b и c – константы [*Vorobev et al.,* 2025а].

Установлено, что при дискретных сияниях уровень ГИТ с вероятностью 50% превышает 2,58 А. С той же вероятностью во время сияний типа «дуга» ГИТ преодолевают порог 0,98 А. В периоды диффузных сияний или в отсутствие сияний уровень ГИТ с вероятностью 50% не превышает 0,72 и 0,41 А соответственно [*Vorobev et al.,* 2025b].

Выполнен сбор и анализ данных, содержащих сведения о наличии расхождения азимутальных и зенитных углов при скважинной магнитной инклинометрии, в результате чего обнаружена устойчивая корреляция между сезонным ходом уровня геомагнитных возмущений и качеством проводимых замеров в ходе геофизических исследований скважин в АЗРФ [*Ковалев и др.,* 2025].

7.2 Исследование характеристик литосферы

В 2025 г. решались задачи по уточнению и детализации моделей литосферы восточной части АЗРФ, а также решались связанные с этим проблемы по изучению динамики вечной мерзлоты.

Разработан новый метод тектонического районирования с использованием кластерного анализа «K-Means», который был применен для литосферы Западно-Сибирского бассейна (ЗСБ) на многопараметрическом наборе данных, включающих мощность литосферы, коры, осадочного слоя, плотности теплового потока (МТП) и карты вариации поперечных сейсмических волн на глубине 100 км. Получена новая карта теплового потока для ЗСБ, которая была рассчитана с использованием оценки долгосрочных изменений на

основе международных баз МТП и национальных источников [*Neumann et al., 2025, Duchkov et al.,* 2012]. В результате выделено шесть основных кластеров с характерным для каждого строением литосферы и тепловым режимом. Установлено, что большинство крупных нефтяных месторождений в ЗСБ локализованы в двух специфических кластерах.

На основании новой тепловой модели верхней мантии определена глубина до подошвы литосферы [*Kaban et al*., 2025]. Были проанализированы связи реологических параметров литосферы и сейсмичности. В частности, проведено комплексное исследование связи между горизонтальными градиентами эффективной мощности упругой литосферы (EET) и сейсмической активностью в Северо-Восточной Евразии с использованием 420 экспериментов машинного обучения. Было показано, что распределение сильных землетрясений (с магнитудой ≥5,5) значимо коррелируется с повышенными значениями горизонтальных градиентов EET.

На основании новейшей томографической модели REVEAL [*Thrastarson et al.*, 2024] с использованием соотношений физических свойств минералов была построена предварительная модель литосферы и верхней мантии с разрешением 0,5°×0,5° по горизонтали и 25 км по вертикали. Модель включает трёхмерное распределение плотности и температуры и будет использована в дальнейшем как основа для построения окончательной модели. Кроме того, была построена улучшенная модель осадочного чехла [*Sidorov, Kaban*, 2025].

7.3 Сейсмические исследования

В рамках проекта актуализированы каталоги землетрясений западного, восточного и северного секторов АЗРФ и построен объединённый каталог региона.

Выполнена предобработка каталогов ЕГС РАН (по 2023 г.) и ISC (по 2025 г.): пространственно-территориальный отбор, исключение записей без магнитуд, разделение землетрясений и взрывов, очистка от несейсмических событий (в т. ч. техногенных в районе Хибинского массива за 2020–2023 гг.).

Автоматизированное объединение каталогов реализовано с помощью нового математического обеспечения – идентификация дублей проведена на основе анализа распределений метрики в пространстве ошибок времени и эпицентров. Ручная корректировка потребовалась только для доочистки восточного сектора. Магнитуды унифицированы к шкале моментной магнитуды с учётом региональных и временных калибровок.

Построены актуализированные секторные каталоги:

1. Восточный сектор – 26 232 события;
2. Западный сектор – 7 036 событий;
3. Хребты Гаккеля и Книповича и архипелаг Шпицберген – 20 528 событий.

При стыковке устранено 19 межрегиональных дублей на границе Шпицберген – шельф Баренцева моря. Сформирован объединённый каталог АЗРФ за 1962–2024 гг. на 53 777 землетрясений (34 096 из ISC и 19 681 из ЕГС РАН). Выполнена проверка уровня регистрации: для Восточного сектора уточнены вариации магнитуды полной регистрации, для Западного сектора и района хребтов/Шпицбергена подтверждено сохранение оценок полноты. Подготовлены сопроводительные материалы и результаты представлены к публикации.

На основе данных с использованием модели ak135 [*Kennett et al.*, 1995] и алгоритма локации в программе NAS [*Асминг и др.,* 2021] создан сводный каталог землетрясений восточного сектора АЗРФ (70,0°–90,0° с. ш., 70,0° в. д.–170,0° з. д.) за 1900–1961 гг. Дополнительно сформирован каталог событий за пределами района и с недостаточными данными о сейсмических фазах (менее трёх станций), с указанием причин включения в разделе «Примечание».

Объединение каталога 1900–1961 гг. с каталогом 1962–2022 гг. [*Gvishiani et al.*, 2022; *Vorobieva et al.*, 2023a,b] дало обобщённый каталог за весь инструментальный период. Сопоставление с ЛДФ-моделями ОСР-97 и ОСР-2016 [*Уломов, Шумилина, 1999; Уломов и др.*, 2016] показало, что наилучшее согласие с данными демонстрирует ОСР-2016, а ОСР-97 требует корректировки Mmax для ряда доменов и линеаментов.

7.4 Исследование пространственно-временной изменчивости арктических морей

Задача исследования пространственно-временной изменчивости аномалий уровня моря (SLA – Sea Level Anomaly) и значимых высот волн (SWH – Significance Wave Height) на акватории Северного Ледовитого океана по данным спутниковой альтиметрии была разбита на несколько этапов. Это обусловлено различными ледовыми условия в арктических морях. В 2025 году исследовался уровенный и волновой климат Баренцева моря.

Для работы были выбраны альтиметрические измерения значимых высот волн спутников ERS-1/2, GFO-1, Envisat, Cryosat-2, SARAL, Sentinel-3a/3b. Временные интервалы работы этих спутников пересекаются, что позволяет объединить их в единый временной ряд. Однако среднемесячные данные SLA и SWH в интервале пересечения не совпадают, что обусловлено различием в плотности покрытия, а также в используемом алгоритме ретрекинга и в его программной реализации. Объединение среднемесячных данных SLA и SWH в единый временной осуществлялся относительно альтиметрических измерений спутника ERS-1.

После объединения данных в единый временной ряд линейный тренд SWH на акватории Баренцева моря составил +0,1м за 10 лет. Анализ межгодовой изменчивости SWH по месяцам показал, что максимальные тренды SWH наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Анализ повторяемости случаев штормового волнения проводился на основе изменчивости распределения SWH за каждый год. Согласно полученным данным в 2014 и 2019 годы наблюдалось наибольшее число аномальных волн (SWH > 5 м), а 1993 и 1997 – минимальное.

Межгодовая изменчивость SLA Баренцева моря по данным спутниковой альтиметрии имеет положительную тенденцию +2,31 мм в год, что ниже, чем оценки изменчивости уровня Мирового океана 3,4 мм в год. Максимальная скорость роста уровня наблюдается в сентябре, а минимальная в июле.

7.5 Анализ климатических изменений в регионах Российской Арктики

Дополнительно к плану было проведено исследование соответствия различных сценариев SSP (Shared Socioeconomic Pathways) прогностической модели глобального климата CNRM-CM6-1-HR из проекта CMIP6 с измерениями температуры приземного воздуха на высоте 2 м на метеостанциях в западном регионе Арктической зоны Российской

Федерации за период с 2015 по 2025 год. Анализ метрик RMSE (Root Mean Square Error) и KGE (Kling–Gupta Efficiency Coefficient) показал, что по первой метрике изменения климата в регионе идут по консервативному сценарию SSP1-2.6 за исключением южной части Республики Карелии и северной части Ленинградской области в районе Ладожского и Онежского озёр, где климатические изменения развиваются по наиболее пессимистическому сценарию SSP5-8.5. По второй метрике картина более хаотична. По этой причине требуются дополнительные исследования с привлечением других моделей и выбором наиболее оптимальной метрики.

7.6 Геоинформационный анализ пространственных данных

За прошедший год в рамках проекта был разработан прототип нового клиентского веб-приложения геопортала «Арктика» (https://arctic-gis.gcras.ru/). Созданное приложение обеспечивает доступ к просмотру и анализу ряда наборов тематических геолого-геофизических данных. Основная цель разработки заключалась в создании локального, современного, интуитивно понятного инструмента для визуализации, анализа и экспорта пространственной информации.

В ходе проекта на сайте геопортала внедрены инструменты визуализации растровых и векторных данных – для отображения физических полей и точечных, линейных, полигональных объектов. Данные оформлены с помощью: адаптивных цветовых палитр (дискретных/непрерывных); индивидуальных символов для точек; штриховок и полигонов для линейных/площадных данных; подписей к точечным объектам (например, названий населённых пунктов).

Для каждого слоя автоматически формируется легенда; пользователь может открыть палитру растра или набор символов для векторных объектов. Все данные имеют систему координат и корректно отображаются на карте.

Интерактивные инструменты приложения включают: наложение слоёв; древовидную структуру картографических проектов с легендами; масштабирование карты; открытие атрибутивных таблиц для объектов; функции геообработки (измерение расстояний, вычисление площадей, выделение полигонов разных форм); экспорт в *PNG и *PDF с выбором масштаба, разрешения и слоёв.

Приложение имеет открытый доступ к данным. В базу геопространственных данных добавлены сведения о глубинном строении литосферы.

С помощью платформы Google Earth Engine проведён анализ спутниковых данных (Landsat-8, Sentinel-2, Sentinel-1, ICESat-2) для геодинамического районирования АЗРФ. Разработан скрипт для автоматизированной обработки архивов: удаления облачности, формирования медианных композитов и построения временных рядов спектральных коэффициентов яркости.

Создана цифровая база геопространственных данных с топографическими сведениями о транспортных путях для Архангельского транспортного узла и Кольского полуострова. Систематизированы картографические и геологические материалы о разломной тектонике, геодинамических условиях и опасных природных процессах (включая вечную мерзлоту).

Выполнен анализ спутниковых индексов (FMR, CMR, CI, IOR и др.) для выявления зон тектонических нарушений. С применением алгоритма GLCM (Gray Level Co-Occurrence Matrix) для Павловского свинцово-цинкового месторождения (арх. Новая Земля) по данным Sentinel-2 рассчитаны семь текстурных признаков второго порядка (контраст, однородность, энтропия, энергия, дисперсия, диссимилярность, корреляция). Построены карты текстурных параметров и выполнен компонентный анализ, позволивший выделить: систему линейных аномалий (тектонические нарушения); участки повышенной структурной фрагментации (потенциально связанные с минерализацией и геодинамическими процессами).

Методика GLCM подтвердила эффективность для уточнения геологического строения труднодоступных районов Арктики. Разработаны подходы к интеграции спутниковых, геоинформационных и текстурных данных для идентификации разломных зон и геодинамического районирования АЗРФ – это создаёт основу для автоматизированного дешифрирования структурных элементов и мониторинга мерзлотных ландшафтов. В отчетном периоде выполнен полный комплекс работ по исследованию современного гидродинамического режима эстуария реки Онеги и его численному моделированию. Проведён сбор, анализ и систематизация многолетних гидрологических и гидрометеорологических данных, включая уровни, расходы, ветровые и ледовые условия, необходимые для параметризации модели STREAM_2D. Разработана и откалибрована двумерная гидродинамическая модель эстуария Онеги, основанная на уравнениях Сен-Венана, с учётом речного стока, приливных и нагонно-сгонных воздействий Белого моря. Проведено моделирование сезонных режимов течений и колебаний уровня, включая условия открытой воды и ледостава. Выполнено сопоставление расчётных данных, полученных на моделях STREAM_2D и Delft3D, оценены расхождения по уровням и скоростям течений, выявлены особенности и ограничения каждой модели. STREAM_2D показал высокую производительность и устойчивость при описании арктических эстуарных условий, Delft3D обеспечил детализированное воспроизведение трёхмерной структуры течений. Полученные результаты использованы для уточнения представлений о гидродинамике устья Онеги и определения параметров, влияющих на риски затопления прибрежных участков и инфраструктуры.

7.7 Сведения о достигнутых конкретных научных результатах

Подготовлен аналитический обзор по физике космической погоды, предназначенный для неспециалистов, где рассмотрены основные механизмы влияния солнечных возмущений на технологические системы. Отмечено, что существующие глобальные модели не обеспечивают точного прогноза геоиндуцированных токов из-за занижения вариабельности магнитного поля, а задачи прогнозирования требуют дальнейшего развития физических моделей взаимодействия Солнца и Земли.

Разработана численная модель воздействия низкочастотных электромагнитных полей линий электропередачи и передатчика ЗЕВС на ионосферу. Показано, что при существующих параметрах индуцированное поле вызывает слабый нагрев плазмы ионов, однако при росте мощности сверхвысоковольтных сетей влияние может стать значимым.

Проведён анализ географического распространения воздействия магнитных бурь на энергосистемы России. Установлено, что смещение аврорального овала при сильных суббурях создаёт риск возникновения геоиндуцированных токов даже на средних широтах.

Выполнено исследование излучений линий электропередачи в ионосферу по спутниковым данным. Определены региональные различия в спектрах гармоник промышленной частоты. Оценена возможность использования индексов геомагнитной активности для мониторинга геоиндуцированных токов и выявлена более высокая точность прямых измерений dB/dt.

Выявлено, что уровень ГИТ сопряжен с видимой структурой полярных сияний. Выдвинута гипотеза о том, что статистика ГИТ характеризуются логнормальным законом распределения и «тяжелыми хвостами», толщина которых возрастает с ростом интенсивности сияний. Показано, что полярные сияния могут быть использованы в качестве индикатора воздействия космической погоды на высокоширотные технологические системы.

Создана информационная система, идентифицирующая (с точностью 96%) видимую структуру сияний относительно предложенной классификации, а также создана база данных (https://disk.yandex.ru/i/76OMyWR4YyVYuw) идентифицированных сияний, регистрируемых синхронно с изменением режимов работы технологических систем АЗРФ.

Разработаны модель хранения пространственных данных геофизических полей и подход к их веб-рендерингу на базе ГИС.

Показано, что вероятность превышения ГИТ некоторого значения имеет экспоненциальную зависимость. Установлено, что при интенсивных сияниях уровень ГИТ с вероятностью 50 % превышает 2,58 А. В периоды слабых сияний или в их отсутствие уровень ГИТ обычно не превышает 0,72 и 0,41 А соответственно.

Обнаружена корреляция между сезонным ходом уровня геомагнитных возмущений и качеством замеров, проводимых скважинными магнитными инклинометрами в АЗРФ.

Разработан новый метод тектонического районирования с использованием кластерного анализа K-Means.

Построена уточненная модель теплового потока (0,5°×0,5°) для Западной Сибири и сопредельных территорий (поверхностного, а также на глубинах 10 и 20 км) (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_tect.ru.html).

Для этой же территории построена карта распределения вечной мерзлоты (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_thawing.ru.html).

Выделены основные кластеры, представляющие различные типы литосферы Западной Сибири (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_tect.ru.html).

Рассчитаны вариации мощности литосферы для всей АЗРФ (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_thickness.ru.html).

Построена уточненная модель осадочного чехла для восточной части АЗРФ (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_grav_1.ru.html).

Установлена связь распределения сейсмичности с горизонтальными градиентами вариаций эффективной мощности упругой литосферы.

Построены предварительные модели распределения температуры и плотности в литосфере и верхней мантии с разрешением 0,5°×0,5° по горизонтали и 25 км по вертикали (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_InTermDens.ru.html).

Адаптированы для детальных вычислений компьютерные программы для расчета гравитационного поля, его градиентов и динамической топографии, а также, для решения обратных задач с использованием этих параметров.

Получен наиболее полный на сегодня объединённый каталог землетрясений АЗРФ за 1962–2024 гг.: 53 777 событий. Благодаря новому математическому обеспечению внедрен модифицированный алгоритм «ближайшего соседа» для выделения дублей. Автоматический подбор пороговых значений метрики в данном алгоритме обеспечивает воспроизводимость результатов и практически полностью исключает необходимость экспертного назначения параметров. Достигнута однородность магнитуд в объединенном каталоге, благодаря приведению их к «proxy Mw» по регионально-специфическим регрессиям. Исключены взрывы и другие техногенные события по меткам ISC и ЕГС РАН Выявлен примерно пятикратный рост среднегодового числа слабых событий M>=2 в районе Хибинского массива, который невозможно объяснить уровнем улучшения регистрации сети. Однако данные события не помечены агентствами как взрывы. Актуализированы оценки представительной магнитуды в различные временные периоды.

Создан сводный, уточнённый и унифицированный каталог землетрясений восточного сектора АЗРФ, ограниченного координатами 70,0°–90,0° с. ш. и 70,0° в. д. – 170,0° з. д. за период с 1900 по 1961 гг. Каталог составлен на основе максимально полного набора инструментальных данных с использованием современной глобальной скоростной модели ak135 и усовершенствованного алгоритма локации.

Сформирован дополнительный каталог землетрясений, исключённых из основного каталога по результатам уточнения параметров. В него включены события, первоначально приписывавшиеся исследуемому району, но расположенные за его пределами, а также землетрясения с неполными или недостаточными инструментальными данными. Для каждого события указана причина его включения.

Сформирован единый сводный и унифицированный каталог землетрясений АЗРФ, охватывающий весь инструментальный период наблюдений (1900–2022 гг.).

По объединённым данным спутниковой альтиметрии в единый временной ряд линейный тренд значимых высот волн SWH на акватории Баренцева моря составил +0,1±0,06 м за 10 лет. Анализ межгодовой изменчивости SWH по месяцам показал, что максимальные величины наблюдаются зимой: декабрь – 2,38±0,18 м за 10 лет, январь – 2,43±0,19 м за 10 лет и февраль – 2,35±0,18 м за 10 лет в соответствии с максимумом скоростей ветра. Минимальные SWH наблюдаются летом: июнь –1,42±0,13 м за 10 лет, июль – 1,37±0,16 м за 10 лет и 1,48±0,15 м за 10 лет.

Межгодовая изменчивость аномалий уровня SLA Баренцева моря по объединённым данным спутниковой альтиметрии имеет положительную тенденцию +2,31±0,27 мм в год, что ниже, чем оценки изменчивости уровня Мирового океана 3,4 мм в год. По месяцам линейный тренд SLA составил для июня – 3,68±0,33 мм в год, для июля – 1,84±0,11 мм в год, для августа – 3,46±0,37 мм в год и для сентября – 4,29±0,21 мм в год.

Сравнение температуры приземного воздуха на высоте 2 м на метеостанциях и результатам расчётов по климатической модели CNRM-CM6-1-HR показало, что по метрике RMSE (Root Mean Square Error) изменения климата в западном регионе Арктической зоны

за период с 2015 по 2025 год идут по консервативному сценарию SSP1-2.6 за исключением района Ладожского и Онежского озёр, где климатические изменения развиваются по наиболее пессимистическому сценарию SSP5-8.5.

В рамках направления ГИС разработан прототип нового геоинформационного клиентского веб-приложения и геопортала для организации доступа, отображения, анализа и экспорта геолого-геофизических данных. В геопортал внедрён ряд новых функций и инструментов, что обеспечивает возможность более качественной работы с пространственными данными, а также создаёт потенциал для дальнейшего совершенствования приложения и расширение его аналитических возможностей.

В прототип нового веб-приложения интегрирована база геопространственных данных, собранных в рамках предыдущих этапов реализации проекта. Она включает: геофизические модели магнитных и гравитационных аномалий, распределения теплового потока, мощности осадочного чехла, мощности литосферы, сейсмические данные, а также вспомогательные данные по гидрологии, гляциологии, биогеографии и экономическому развитию Арктики. В текущем году были подготовлены наборы данных по строению литосферы, основанные на данных сейсмической томографии, которые включают скоростные модели и срезы температуры и плотности с различных глубин. В базу пространственных данных планируется внедрение Единой электронной картографической основы России (ЕЭКО).

В части совершенствования методов ДЗЗ для геодинамического районирования АЗРФ создан локальный ГИС-проект геологических и картографических данных в пределах Архангельского транспортного узла, Кольского полуострова и архипелага Новая Земля. Для его практической реализации разработан и реализован алгоритм обработки спутниковых данных в среде Google Earth Engine, обеспечивающий автоматизированную очистку архивов миссий Landsat-8, Sentinel-1/2 от облачности, формирование медианных композитов и построение временных рядов спектральных коэффициентов яркости поверхности.

На основе спутниковых наблюдений рассчитаны и протестированы геологические спектральные индексы (FMR, CMR, CI, IOR и др.), характеризующие распределение основных типов минералов и литологических различий. Ключевым научным результатом стала разработка и апробация методики текстурного анализа спутниковых изображений на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого для идентификации разломных зон. Для территории Павловского свинцово-цинкового месторождения впервые рассчитаны семь текстурных признаков второго порядка, выполнен компонентный анализ спутниковых индексов и композитов спутниковых изображений, позволивший выделить линейные аномалии, соответствующие тектоническим нарушениям и зонам возможной минерализации.

Показана высокая эффективность метода GLCM для дешифрирования структурных элементов и уточнения геологического строения труднодоступных районов Арктики. Разработанные алгоритмы и интеграционные подходы создают основу для последующего внедрения автоматизированных технологий мониторинга геодинамических процессов и состояния мерзлотных ландшафтов.

Создана и откалибрована двумерная гидродинамическая модель эстуария Онеги на платформе STREAM_2D, воспроизводящая пространственно-временную структуру течений и уровней воды с точностью 3–5 %. Выполнено сравнение расчетных данных STREAM_2D и Delft3D, установлена сопоставимость результатов при различиях по скоростям не более 0,15 м/с и по уровням до 0,05 м. Показана возможность адекватного описания приливных и ветровых процессов отечественными моделями при учёте ледового сопротивления. Определены зоны максимальных реверсивных течений и влияния морских приливов до 26 км вверх по руслу.

Проведена V Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (22–24 сентября 2025 г.). Школа собрала более 50 участников, из них 17 российских ученых-лекторов и 26 слушателей. На лекциях и круглом столе широко освещались вопросы геологии, геофизики, палеомагнетизма, климатологии, океанологии, дистанционного зондирования, геоинформатики и системного анализа, Больших данных, материаловедения, транспорта и других смежных дисциплин (https://school2025.gcras.ru).

Список использованных источников

Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 27–40. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.02.

Воробьев А. В., Лапин А. Н., Воробьева Г. Р. Подход к автоматическому диагностированию состояния верхней ионосферы по данным наблюдений камер всего неба // Геомагнетизм и аэрономия. 2025а. Т. 65. № 5. С. 728–738. DOI: 10.7868/S3034502225050153.

Воробьев А. В., Соловьев А. А., Воробьева Г. Р., Лапин А. Н. Вероятностная оценка уровня геоиндуцированных токов по данным о локализации и структуре полярных сияний // Солнечно-земная физика. 2026.

Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Орлов Г. О. Модель хранения пространственных данных тензорных геофизических полей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025б. Т. 25. № 3. С. 565–573. DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-565-573.

Ковалев Д. В., Воробьев А. В., Вальчук А. С., Воробьева Г. Р., Ханнанов Н. К. Оценка эффектов воздействия космической погоды на достоверность показаний магнитных инклинометров // Космические исследования. 2025. Т. 63. № 6. С. 14–24.

Уломов В. И., Богданов М. И., Трифонов В. Г., Гусев А. А., Гусев Г. С., Акатова К. Н., Аптикаев Ф. Ф., Данилова Т. И., Кожурин А. И., Медведева Н. С., Никонов А. А., Перетокин С. А., Пустовитенко Б. Г., Стром А. Л. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации: Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.

Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. М-б 1: 8 000 000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.

Duchkov A. D., Zheleznyak M. N., Ayunov D. E., Veselov O. V., Sokolova L. S., Kazantsev S. A., Gornov P. Yu., Dobretsov N. N., Boldyrev I. I., Pchelnikov D. V., Dobretsov A. N. Geothermal Atlas of Siberia and the Far East (2012). – 2012 [Digital resource]. - URL: http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru/

Gvishiani A., Vorobieva I., Shebalin P., Dzeboev B., Dzeranov B., Skorkina A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of Russian Arctic // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Is. 10. 5010. DOI: 10.3390/app12105010.

Kaban M., Petrunin A., Shevaldysheva O. Thickness of the lithosphere in Northeastern Eurasia // Russian Journal of Earth Sciences. 2025.

Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Traveltimes // Geophysical Journal International. 1995. 122 (1). 108–124. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1995.tb03540.x.

Neumann F., Norden B., Balkan-Pazvantoğlu E., Elbarbary S., Petrunin A.G., Elger K., ... & Fuchs S. The 2024 Release of the Global Heat Flow Database (GHFDB): Quality Assessment, Metadata Standards, and a Century of Geothermal Data // Earth System Science Data Discussions. 2025. 1-48. DOI: 10.5194/essd-2025-341.

Sidorov R., Kaban M. Improved sedimentary thickness model for Central-Northern Eurasia derived from decompensative gravity anomalies // Russian Journal of Earth Sciences. 2025.

Thrastarson S., van Herwaarden D.P., Noe S., Josef Schiller C., & Fichtner A. REVEAL: A global full-waveform inversion model // Bulletin of the Seismological Society of America. 2024. 114(3). 1392–1406.

Vorobev A. V., Soloviev A. A., Vorobeva G. R. Approach to Hardwareless Assessment of the Geoinduced Currents Level in High-latitude Power Electric Systems // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. ES5001. DOI: 10.2205/2025es000997.

Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Application of Convolutional Neural Networks for Upper Ionosphere Remote Sensing Using All-Sky Camera Data // Moscow University Physics Bulletin. 2025b.

Vorobeva G. R., Vorobev A. V., Orlov G. O. Glyph-Based Approach to Web Rendering of Geophysical Fields in Geoinformation Systems // Scientific Visualization. 2025. Vol. 17. Is. 3. P. 88–102. DOI: 10.26583/sv.17.3.09.

Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., Skorkina A. A., Sergeeva N. A., Fomenko N. A. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. 2023a. Vol. 13. Is. 12. 7084. DOI: 10.3390/app13127084.

Vorobieva I. A., Gvishiani A. D., Shebalin P. N., Dzeboev B. A., Dzeranov B. V., Sergeeva N. A., Kedrov E. O., Barykina Y. V. Integrated Earthquake Catalog III: Gakkel Ridge, Knipovich Ridge, and Svalbard Archipelago // Applied Sciences. 2023b. Vol. 13. Is. 22. 12422. DOI: 10.3390/app132212422.

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

Грант РНФ № 23-17-00176
Регистрационный №: 123070600012-8
Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев
Ответственные исполнители: академик РАН А. Д. Гвишиани,
чл.-корр. РАН В. Н. Татаринов, д.т.н. В. И. Кафтан

На предыдущих этапах реализации проекта подготовлен наиболее представительный каталог землетрясений для Осетинского сектора Большого Кавказа с однородной магнитудной шкалой, содержащий сейсмические события за 1962–2022 гг. из советских, российских и международных каталогов [*Vorobieva et al.*, 2024a]. После процедуры выделения и удаления афтершоков [*Vorobieva et al.*, 2024b] построена модель сейсмического режима фоновых (основных толчков) землетрясений. В 2025 г. с использованием параметров модели сейсмического режима построен синтетический каталог землетрясений на условный период 20 000 лет, содержащий более 575 000 событий с $M \geq 3{,}0$. В нем воспроизводятся и моделируются ключевые свойства каталога фактически произошедших землетрясений в регионе, а именно:

- региональная повторяемость (рассчитанная для всего региона в единицу времени) фоновых землетрясений во всех интервалах магнитуды;
- региональное соотношение числа афтершоков и фоновых событий;
- локальная повторяемость (оцененная для малой окрестности каждой точки рассматриваемой территории на единицу площади в единицу времени) фоновых землетрясений (без учета афтершоков);
- локальные соотношения числа фоновых землетрясений разной магнитуды (параметр b закона Гутенберга-Рихтера);
- локальные свойства группирования землетрясений;
- пространственное распределение эпицентров сильных землетрясений.

Для построения синтетического каталога использовалась методика, предложенная чл.-корр. РАН П.Н. Шебалиным [*Шебалин и др.*, 2024]. Главные отличия построенного каталога от ему подобных, созданных ранее в различных работах, состоят в следующем:

- каталог сгенерирован по данным только каталога реальных землетрясений и его строго алгоритмической обработки без привлечения параметров, основанных на экспертных решениях;
- места, где могут возникать сильные землетрясения, определены с помощью классического метода EPA (Earthquake-Prone Areas) [*Гвишиани и др.*, 2020];
- синтетический каталог содержит в качестве одного из параметров время событий, что позволит получать точные оценки сейсмического риска, учитывающие пространственные корреляции сейсмических воздействий;
- каталог моделирует афтершоковую активность.

Созданный синтетический каталог землетрясений позволит выполнить оценки сейсмической опасности и риска надолго вперед, учитывающие как возможные экономические потери, так и затраты на мероприятия по их предотвращению.

Для изучения особенностей строения земной коры и подстилающей части верхней мантии в предгорной части Республики Северная Осетия – Алания проанализированы данные широкополосных сейсмических станций «Владикавказ» и «Попов Хутор» Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН). В результате применения метода функций приёмника совместной инверсией сейсмограмм обменных *Ps* и *Sp* волн были построены одномерные модели распределения *Vs* и *Vp*/*Vs* до глубин около 250 км [*Дзебоев и др.*, 2026].

В пределах Осетинского геодинамического полигона в сентябре 2025 г. выполнен третий цикл ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК). Схема расстановки ГНСС-аппаратуры была аналогична эпохам 2023 и 2024 годов. Продолжительность наблюдений на пункте варьировалась от 4 до 12 часов. Использовались 7 комплектов аппаратуры: 4 комплекта PrinCe P5U с антеннами choke-ring C220GR и 3 комплекта Javad Delta 3N с антеннами JAVGRANT-G3T и G5T.

Антенны Choke-ring применялись на пунктах с грунтовыми центрами при наличии хорошей транспортной доступности и возможности установки антенн на геодезические штативы. Антенны Javad использовались на скальных центрах с принудительным центрированием и при затруднённом доступе к пунктам.

Оборудование обеспечивало двухчастотные измерения с поддержкой GPS, ГЛОНАСС, BeiDou и Galileo. Заявленная производителем точность постобработки в статическом режиме составляет: по плановым координатам – до 4 мм, по высоте – до 6 мм, что соответствует уровню обсерваторских станций.

На ряде пунктов были получены некондиционные данные вследствие подавления сигналов средствами радиоэлектронной борьбы. Большинство таких пунктов расположено во внешнем контуре геодезической сети в равнинной части Республики Северная Осетия – Алания. Их вынужденное исключение негативно, однако не оказывает принципиального влияния на геодинамическую интерпретацию СДЗК в ее предгорной и горной частях. В итоге измерения в 2025 г. были успешно выполнены на 28 из 37 пунктов геодинамического полигона. Первичные данные ГНСС-измерений обработаны в программном комплексе «КРЕДО ГНСС».

Проведен деформационный анализ результатов ГНСС-измерений за трехлетний период выполнения проекта. Привязка осуществлялась к местным постоянно действующим базовым станциям ФИЦ ЕГС РАН и АО «ПРИН», координаты которых определялись в глобальной системе отсчета ITRF2020 на основе данных международных пунктов IGS и ФАГС. Опорные станции использовались как жесткие точки, обеспечивающие согласованность положений пунктов всей сети.

Обработка данных спутниковых систем GPS, GLONASS, Galileo и BeiDou проводилась дифференциальным методом. Применялись стандартные модели для компенсации влияния тропосферы (модифицированная модель Хопфилда) и ионосферы (глобальные карты ионосферы IONEX). На первом этапе были определены «жесткие» координаты пяти

опорных станций на основе суточных решений. Уравнивание сети выполнялось методом наименьших квадратов с проверкой замыкания полигонов сети для получения согласованных координат пунктов каждой эпохи наблюдений. Для каждой эпохи использовались актуализированные координаты IGS/ФАГС, для исключения смещений Евразийской плиты.

Использованы смещения для 37 геодезических пунктов за эпохи измерений 2023–2024 гг. и 2023–2025 гг. Деформационный анализ плановых смещений пунктов реализован на основе библиотеки PyGeoStrain, представленной в рамках проекта в 2023 году (доступна на платформе Zenodo [PyGeoStrain: A software package for calculation crustal strain (v1.0). 2023. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7948241]). Для визуализации данные загружались в QGIS 3.

В итоге были получены карты параметров деформаций земной поверхности – деформации дилатации, деформации полного сдвига, ориентации осей главных действующих деформаций (рис. 8.1–8.4).

На рис. 8.1 показаны векторы горизонтальных смещений пунктов ГНСС без смещений Евразийской плиты. В пределах разломных сегментов направления векторов близки к их простиранию; в узловых зонах заметны локальные развороты, указывающие на смену режима смещений на границах соседних сегментов. По обе стороны некоторых разломов прослеживается «зеркальная» картина, отражающая блочное строение и различие относительных перемещений бортов.

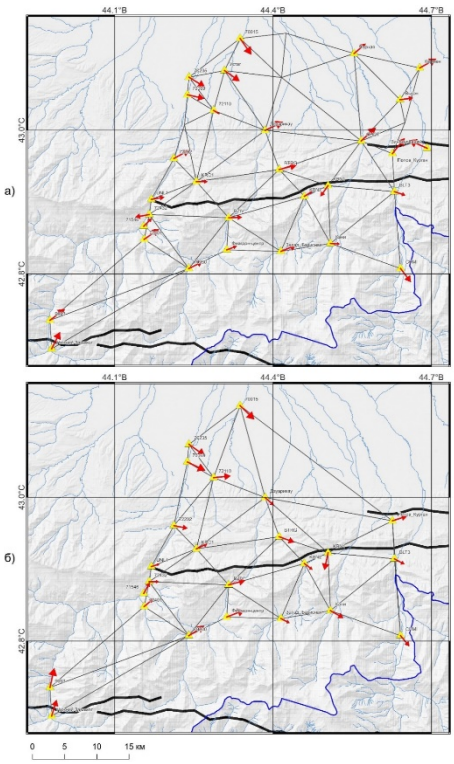


Рисунок 8.1 – Горизонтальные смещения ГНСС-пунктов по эпохам наблюдений: а) 2023–2024 гг.; б) 2023–2025 гг. Черные линии – тектонические разломы. Желтые треугольники – ГНСС-пункты

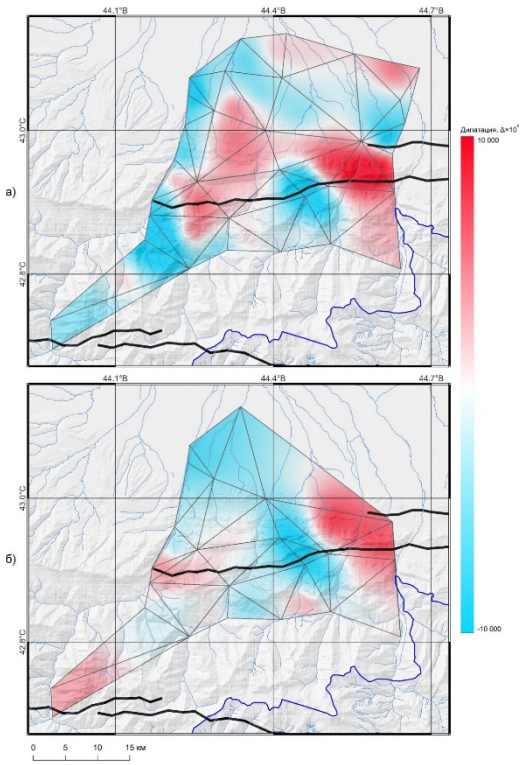


Рисунок 8.2 – Динамика изменения деформации дилатации на территории полигона по эпохам измерений: а) 2023–2024 гг.; б) 2023–2025 гг.

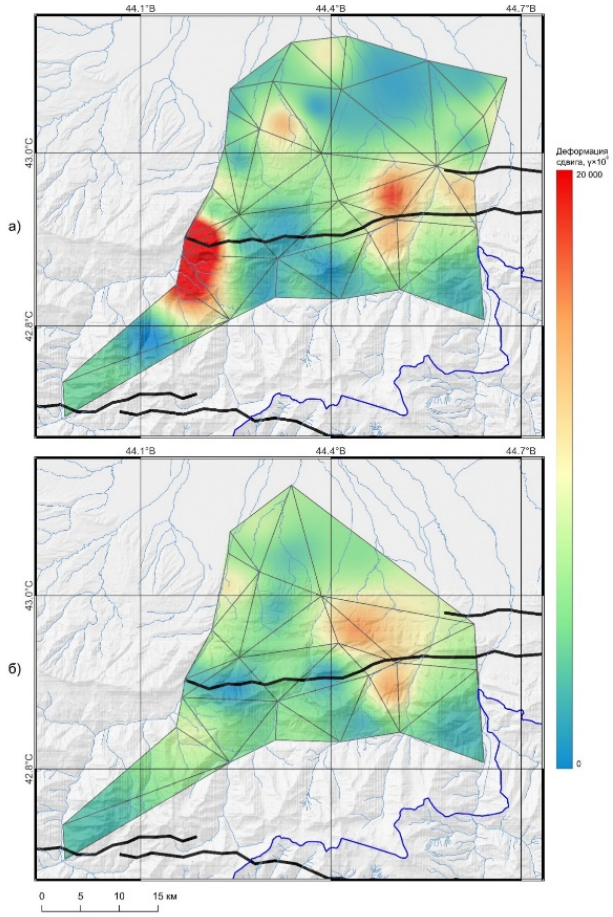


Рисунок 8.3 – Динамика распределения деформации сдвига на территории полигона по эпохам измерений: а) 2023–2024 гг.; б) 2023–2025 гг.

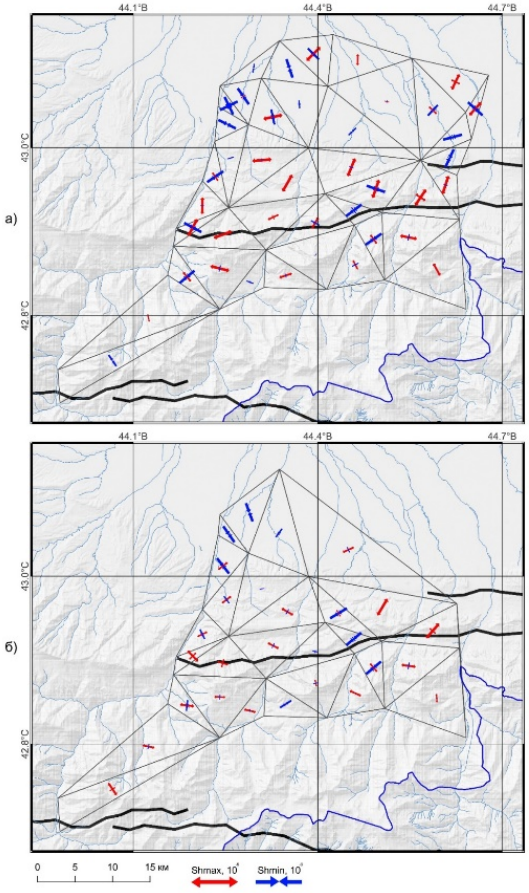


Рисунок 8.4 – Оси главных деформаций по результатам ГНСС-наблюдений полигона по эпохам измерений: а) 2023–2024 гг.; б) 2023–2025 гг.

На рис. 8.2 приведена деформация – дилатации. Видно чередование участков с растяжением (тёплые тона) и сжатием (холодные). Для обеих эпох устойчиво повторяются области экстремумов; отличаются они главным образом степенью выраженности и небольшими смещениями своего положения.

На рис. 8.3 показано распределение деформации сдвига, выделяются протяжённые полосы повышенных значений.

На рис. 8.4 показаны главные оси деформации. Преобладают направления, тянущиеся вдоль простирания разломов. Увеличение длины стержней вблизи пересечений указывает на усиление деформаций в этих узлах и по характеру распределения соответствует картам растяжения и сжатия и участкам повышенной деформации.

В целом векторы горизонтальных смещений и главные оси ориентированы преимущественно вдоль простирания разломов, а максимумы растяжения, сжатия и сдвиговой деформации приурочены к их сегментам и узловым зонам. Между интервалами сохраняется общий характер распределения, изменяются лишь детали в пределах отдельных узлов.

В отчетный период выполнен структурно-парагенетический анализ разрывов, позволяющий реконструировать действующие поля напряжений, на основе данных цифрового рельефа. Для этого были использованы цифровая модель рельефа (ЦМР) FABDEM,

мультиспектральные снимки Landsat-7 и Sentinel-2, а также космоснимки сверхвысокого разрешения GeoEye и WorldView.

Методическая схема включает несколько этапов. На первом этапе по данным ЦМР и дистанционного зондирования Земли проведено дешифрирование линейных элементов рельефа как потенциальных разрывных структур различного ранга. Они ранжировались по длине и азимутам простирания; строились розы-диаграммы и гистограммы распределения. Анализ ориентировок позволил выделить доминирующие системы разрывов и оценить степень их выраженности.

На втором этапе применялся структурно-геоморфологический метод реконструкции напряжений по принципам тектонофизического моделирования. Выделялись три группы оперяющих разрывов: отрывы, ориентированные параллельно оси сжатия, и две сопряжённые системы сколов. Формируемая ими триада позволила определить тип сдвига и направление перемещений. Сопоставление ориентировок триад с палеткой М. В. Гзовского позволило идентифицировать кинематику и обстановки сжатия, растяжения, транстенсии и транспрессии. Полученные параметры использовались для построения моделей действующих напряжений на регулярной сетке 8×8 км – по преобладающим направлениям простирания линеаментов. Сеточная модель позволила наглядно оценить пространственную изменчивость ориентировок осей напряжений.

Отдельным компонентом задачи выступали полевые исследования, направленные на уточнение характеристик локальных разрывных нарушений. На ключевых участках измерялись ориентировки трещин и зеркал скольжения для уточнения кинематики участков разломов и коррекции реконструкции напряжений.

В результате анализа для территории Республики Северная Осетия – Алания выделена система разрывных структур и определены доминирующие ориентировки линейных элементов рельефа. На основе ранжирования линеаментов построены сводные диаграммы ориентировок, выявившие несколько устойчивых парагенезов. По распределению линеаментов восстановлено поле действующих напряжений. Оси сжатия сигма1 имеют преимущественно субмеридиональную ориентацию, оси растяжения сигма3 – субширотную; развороты незначительны. Выделяются локальные зоны изменённого поля напряжений. На восточной границе региона оси сигма3 разворачиваются субмеридионально, совпадая с меридиональными линеаментами и впадиной у с. Тарское, где ранее фиксировались деформации четвертичных террас. Аналогичный разворот сигма3 зафиксирован в западной части 3-го (и частично 4-го) рядов ячеек, совпадая с зоной коленообразного изгиба рек. Эти участки интерпретируются как зоны локального перераспределения напряжений.

Для численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры была построена ее трёхмерная геологическая модель, учитывающая структуры и анизотропию физико-механических свойств среды (рис. 8.5) [*Рогожин и др.*, 2008; 2019]. Моделируемая область охватывает Осетинский сектор Большого Кавказа и прилегающие территории размерами около 200×130×25 км. В модели выделены осадочный чехол и кристаллический фундамент, а также система тектонических разломов с пониженной жёсткостью и зоной влияния около 100 м.

Расчёты НДС выполнены методом конечных элементов с использованием трёхмерной сетки из изопараметрических элементов (рис. 8.5). Для осадочного чехла модуль Юнга

(E) задан по глубинному градиенту в интервалах от 30 до 50 ГПа, а для кристаллического фундамента – от 60 до 80 ГПа; коэффициент Пуассона и плотность также варьируются с глубиной. Для разломных зон E принят на два порядка ниже, что позволяет учесть их повышенную податливость и различие нормальной и сдвиговой жёсткостей [*Морозов и др.*, 2018]. Реологическая модель среды описана неассоциированным упругопластическим критерием Друкера–Прагера–Николаевского [*Николаевский*, 1972; 1983].

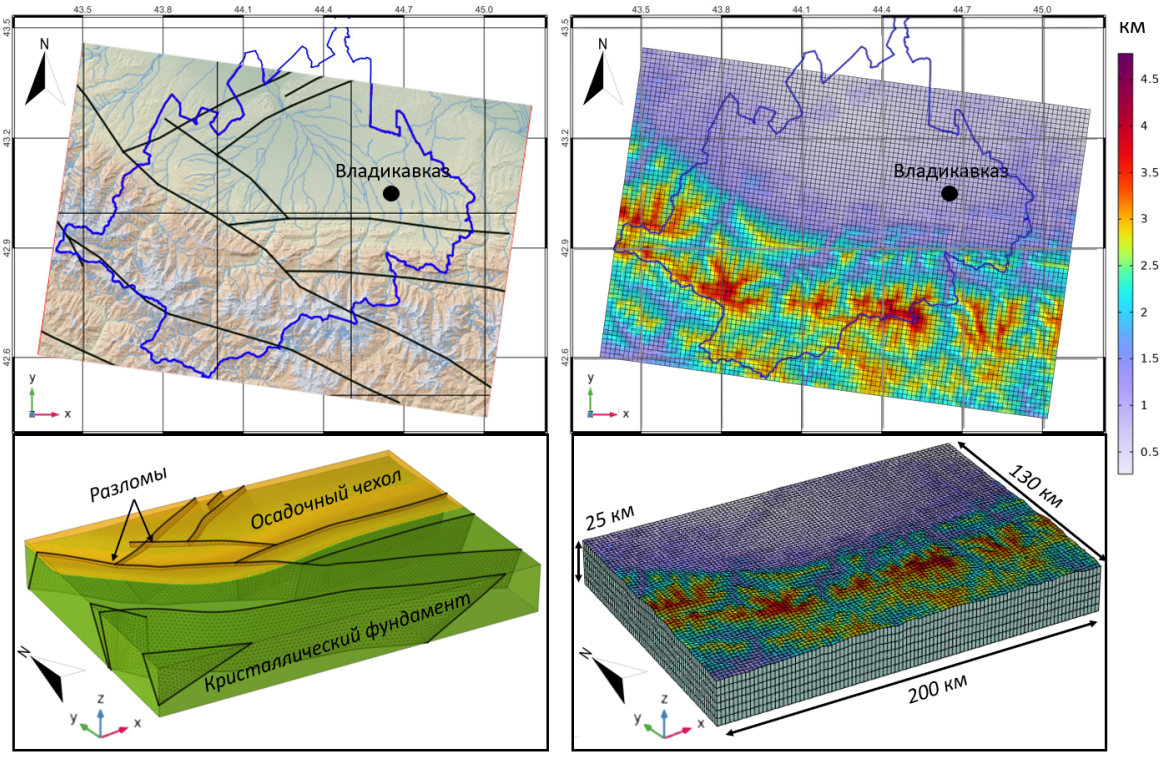


Рисунок 8.5 – Расчётная геологическая модель Осетинского сектора Большого Кавказа: область моделирования (≈ 200×130 км) и схема основных тектонических разломов; трёхмерная геометрия и конечно-элементная сетка, использованная при моделировании НДС

Граничные и начальные условия напряжений сформированы на основе реконструкции поля главных действующих напряжений по данным структурно-кинематического анализа трещин и разломов. Показано, что направление максимального горизонтального сжатия SHmax изменяется в пределах азимута 10–30 град. Начальные напряжения заданы как гидростатические с последующим формированием поля, соответствующего режиму $SHmax > Shmin > Sv$, что согласуется с независимыми оценками регионального напряжённого состояния [*Heidbach et al.*, 2025].

Результаты моделирования представлены в виде горизонтальных сечений на глубине (~15 км): показаны поля интенсивности напряжений σ_i и ориентация главных напряжений, характеризующая тип напряжённого режима, а также распределение вертикальных напряжений и горизонтальных перемещений. Для разломных поверхностей рассчитаны кулоновские напряжения и показатели склонности к сдвигу, что позволило выделить участки повышенного потенциала скольжения. В модель интегрированы данные о гипоцентрах землетрясений различных магнитуд, проецируемые на плоскости разломов, что даёт возможность сопоставить энергетические характеристики землетрясений с $M > 5{,}0$ с зонами концентрации напряжений.

Анализ рассчитанных полей напряжений и деформаций показал, что максимальные значения интенсивности напряжений и вертикальных перемещений приурочены к главным разломным структурам Осетинского сектора Большого Кавказа. Вдоль этих разломов формируются протяжённые зоны повышенных значений σ_i и контрастных значений параметра Лоде–Надаи, что свидетельствует о доминировании сдвигового и взбросово-надвигового типов напряжённого режима. Расчёт кулоновских напряжений и показателя тенденции к сдвигу, определяемого как отношение касательных и нормальных напряжений в плоскости разлома, показывает отдельные участки разломных зон, находящиеся в критическом состоянии (состояние срыва). Кластеры гипоцентров землетрясений $Mw \geq 4{,}0$ приурочены к этим областям, а глубины очагов (около 5–15 км) соответствуют мощности сейсмогенного слоя, что свидетельствует о возможной причинно-следственной связи современной сейсмичности с распределением напряжений в разломах. Выделенные сегменты разломов интерпретируются как области метастабильного состояния, где тектонические напряжения близки к прочности пород и реализуется механизм возникновения землетрясений. Сейсмические события приводят к разуплотнению и диспергированию пород, сопровождающихся увеличением объёма. При этом объёмное расширение преимущественно развивается в направлении минимального главного напряжения. С учётом установленных для Осетинского сектора Большого Кавказа соотношений главных напряжений минимальное напряжение соответствует вертикальной составляющей.

Системный анализ сейсмотектонических моделей возможного сильного землетрясения в пределах Осетинского сектора Большого Кавказа выстроен как последовательный переход от результатов расчёта НДС к параметрам потенциального источника. Очаг и геометрия разрыва определяются нами по пространственной структуре полей напряжений, после чего полученные характеристики используются для оценки сейсмического момента и магнитуды. Область вероятного формирования разрыва выделяется как связная зона превышения некоторого критического уровня интенсивности напряжений, сопоставимого с порогами при ретроспективных реконструкциях сильных сейсмических событий. Длина возможного сейсмического разрыва определяется по протяжённости этой зоны аномально высокой интенсивности напряжений вдоль активного сегмента разлома. Азимут простирания зоны оценивается по направлению её главной оси, которое может устанавливаться по градиенту изменения интенсивности напряжений, либо по данным розы-диаграммы направлений ориентаций разломов в регионе. По геометрии разрыва и эффективной мощности сейсмогенного слоя оценивается площадь потенциальной сейсмодислокации, после чего сейсмический момент и магнитуда определяются с учётом упругих свойств среды и ожидаемых средних смещений на разломе, которые задаются по результатам модельной оценки сброса сдвиговых напряжений.

В условиях современных геодинамических процессов Южный Тибет и Большой Кавказ имеют похожие закономерности напряжённого состояния. В этой связи было выполнено моделирование и совместный анализ закономерностей распределения напряжённо-деформированного состояния в пределах Альпийско-Гималайского орогенного пояса по методике, приведенной в [*Морозов и др.*, 2024].

Одним из ключевых результатов исследований стало установление того, что максимальная концентрация девиаторных напряжений и накопление упругой энергии происхо-

дят на глубинах до 15 км. Эти зоны пространственно совпадают с очагами сильных землетрясений и интенсивных вертикальных движений. Именно прифронтальные зоны надвигов являются основными концентраторами тектонического напряжения, способными инициировать разрушительные сейсмические события. Оба района реагируют на накопление тектонической энергии схожим образом. В Кавказском сегменте предполагается взаимосвязь между фазами вертикальных поднятий, построенными по данным геодезии, и периодами повышенной сейсмической активности [*Татаринов и др.*, 2024]. В Гималайском сегменте аналогичные закономерности выявлены при анализе межсейсмического накопления деформаций по данным ГНСС [*Li et al.*, 2019].

Районами дальнейших детальных исследований в Осетинском секторе Большого Кавказа являются зоны высокой сейсмической опасности, выявленные на основе сейсмотектонической модели и по результатам сейсмического районирования согласно созданному синтетическому каталогу, участки повышенных градиентов скоростей и деформаций, узлы пересечения крупных разломов и границ геодинамических блоков, а также районы размещения ответственных сооружений (включая, ГЭС и транскавказскую магистраль). В этих районах необходим согласованный комплекс геолого-геофизических и геодезических работ с интеграцией результатов в единую базу данных.

Список использованных источников

Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Дзебоев Б. А. Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. – 2020. – № 1. С. 5–29. – DOI: 10.31857/S0002333720010044.

Дзебоев Б. А., Дзеранов Б. В., Алешин И. М., Гоев А. Г., Татаринов В. Н., Орешин С. И. Структура и геомеханические свойства земной коры и верхней мантии предгорной части Северной Осетии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2026. – Т. 526, № 1. – С. 138–146.

Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Колесников И. Ю., Маневич А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране (26 декабря 2003 г. Mw = 6.6) // Физика Земли. – 2018, № 4. – С. 68–78. – DOI: 10.1134/S0002333718040087.

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.

Николаевский В. Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Итоги науки и техники. Серия: Механика твёрдых деформируемых тел. Т. 6. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1972. – С. 5–81.

Николаевский В. Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники. Серия: Механика твёрдых деформируемых тел. Т. 15. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1983. – С. 817–821.

Рогожин Е. А., Габсатарова И. П., Погода Э. В. Зоны ВОЗ и сейсмичность территории Республики Северная Осетия – Алания // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции, посвященной 10-летию выпуска сборника научных трудов «Сейсмичность Северной Евразии». – Обнинск, 2008. – С. 243–249.

Рогожин Е. А., Милюков В. К., Миронов А. П., Овсюченко А. Н., Горбатиков А. В., Андреева Н. В., Лукашова Р. Н., Дробышев В. Н., Хубаев Х. М. Характеристики современных горизонтальных движений в зонах заметных землетрясений начала XXI в. в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с новейшей тектоникой и глубинным строением земной коры // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 91–102. – DOI: 10.21455/GPB2019.1-8.

Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзебоев Б. А., Дзеранов Б. В., Авдонина А. М., Лосев И. В., Королькова А. А. Новейшая тектоническая эволюция Кавказа: современные вертикальные движения и механизм деформирования земной коры // Физика Земли. – 2024, № 4. – С. 76–99. – DOI: 10.31857/S0002333724040068.

Шебалин П. Н., Баранов С. В., Воробьева И. А., Греков Е. М., Крушельницкий К. В., Скоркина А. А., Селюцкая О. В. О моделировании сейсмического режима в задачах оценки сейсмической опасности // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2024. – Т. 515, № 1. – С. 95–109. – DOI: 10.31857/S2686739724030121.

Heidbach O., Rajabi M., Di Giacomo D., Harris J., Lammers S., Morawietz S., Pierdominici S., Reiter K., von Specht S., Storchak D., Ziegler M. O. World Stress Map 2025 // Potsdam, 2025.

Li S., Wang Q., Chen G., He P., Ding K., Chen Y., Zou R. Interseismic coupling in the central Nepalese Himalaya: Spatial correlation with the 2015 Mw 7.9 Gorkha earthquake // Pure and Applied Geophysics. – 2019. – 176. – P. 3893–3911. – DOI: 10.1007/s00024-019-02121-7.

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, No. 1. – ES1003. – DOI: 10.2205/2024ES000892.

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

Шифр темы: 24-17-00346
Регистрационный №: 124071200020-3
Руководитель: директор, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев
Ответственный исполнитель: директор, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев

В 2025 г. выполнен комплекс повысотных аэромагнитных исследований в районах трёх российских геомагнитных обсерваторий: «Арти» (Свердловская обл.), «Белое море» (респ. Карелия) и «Норильск» (Красноярский край). С использованием БПЛА «Геоскан-401» и аэромагнитометра GeoShark проведена многоуровневая аэромагнитная съёмка на высотах 80–240 м с регистрацией вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) наземными квантовыми магнитометрами. Построены цифровые модели рельефа и карты аномального магнитного поля для всех районов работ, рассчитаны карты вертикального градиента магнитного поля с учётом точной разности высот измерений, полученных при решении позиционной задачи с удалённой базой ГНСС. Среднеквадратическая погрешность наблюдений составила 1–2 нТл.

Полученные результаты позволили выявить особенности региональных и локальных магнитных аномалий: подтверждено отсутствие приповерхностных источников в районе обсерватории «Арти» (рис. 9.1а); установлена корреляция магнитных аномалий с формами рельефа в районе «Белого моря» (рис. 9.1б); выявлены заметные антропогенные аномалии и локальные геологические структуры в области «Норильска». Показана эффективность технологии многоэшелонной аэромагнитной съёмки с БПЛА для высокоточных исследований магнитного поля и оценки условия размещения геомагнитных обсерваторий.

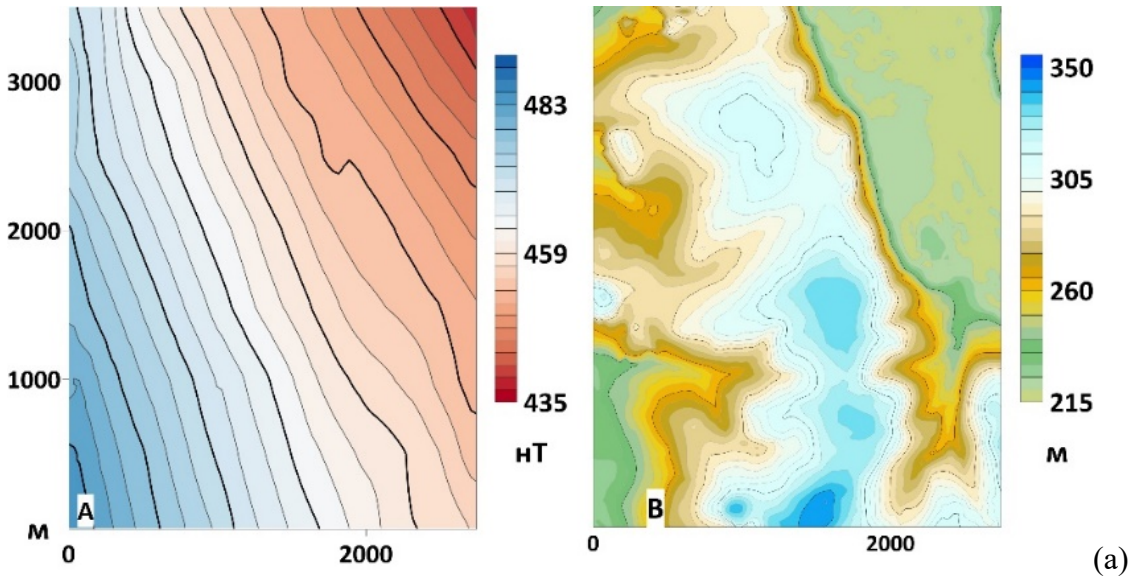
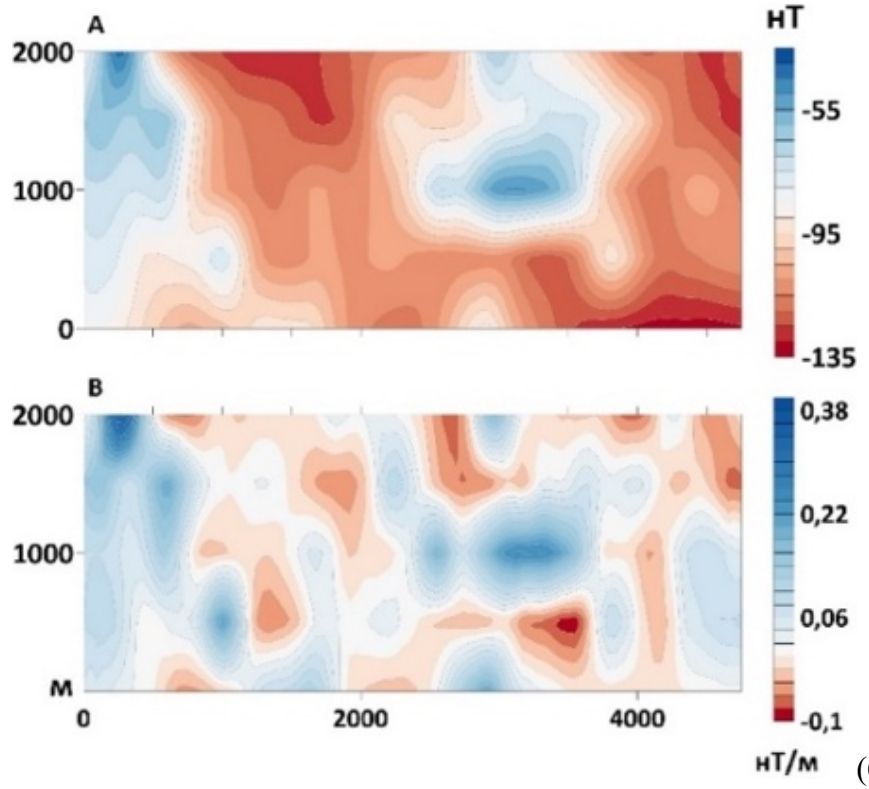


Рисунок 9.1 – Аномальное магнитное поле на уровне 200 метров над дневной поверхностью (слева) и цифровая модель рельефа (справа) в окрестности обсерватории «Арти» (а);



(б)

Рисунок 9.1 (продолжение) – Аномальное МПЗ на уровне 200 метров над дневной поверхностью (сверху) и вертикальный градиент аномального магнитного поля, вычисленный по данным аэромагнитной съёмки на уровнях 200 и 240 метров (снизу) в окрестности обсерватории «Белое море» (б)

В окрестности обсерваторий «Климовская» (Архангельская обл.), «Санкт-Петербург» (Ленинградская обл.) и «Михнево» (Московская обл.) по результатам многоуровневых магнитных съёмок на основе моделирования распределения намагниченности в горизонтальном слое выполнен расчёт компонент аномального магнитного поля в верхнем полупространстве. Моделирование выполнено с учётом измерений на всех уровнях магнитной съёмки одновременно, что позволило выявить и редуцировать методические недочеты съёмок. Для всех трёх объектов среднеквадратические расхождения между наблюденным магнитным полем и полем модели находятся в диапазоне ±0,6–3,2 нТл. Рассчитаны аномальные магнитные поля и их компоненты от поверхности Земли до высоты 500 м. Моделирование распределения намагниченности с учетом особенностей геологического строения в окрестности обсерватории «Климовская» позволило получить такое распределение намагниченности, магнитное поле которого близко к параметрам определенным по данным обсерваторских наблюдений и моделей (рис. 9.2).

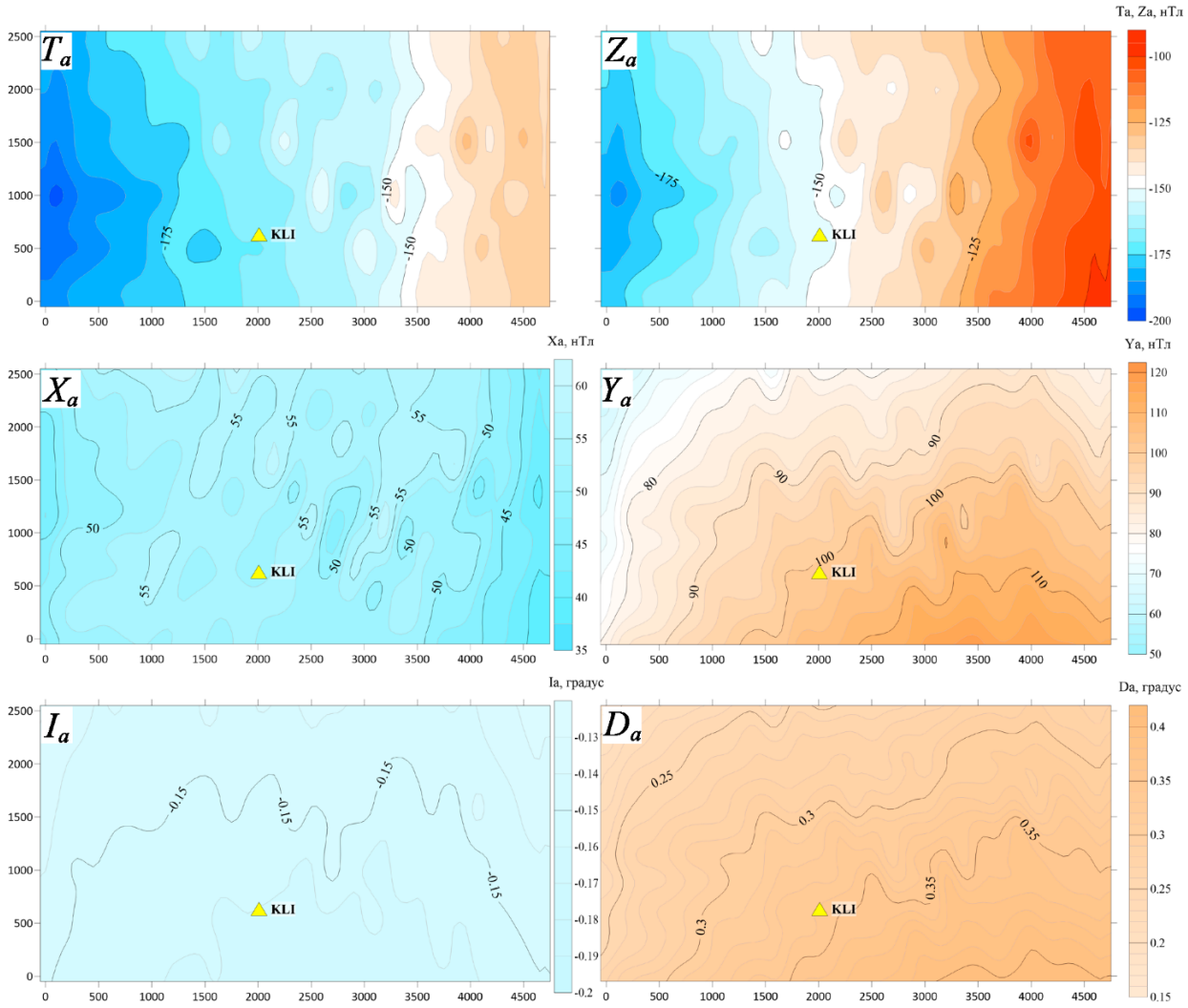


Рисунок 9.2 – Компоненты аномального магнитного поля на альтитуде 145 м в окрестности обсерватории «Климовская»

Выполнена программная реализация проекционного метода, а также линейная параметризация решений аналитическими методами и полиномиальными версиями градиентного (ПГС) и покоординатного (ППС) спусков. В качестве отладки алгоритм ПГС применён для восстановления магнитного поля на полигоне «Валимяки» (респ. Карелия, рис. 9.3). В результате получены распределения магнитных масс для каждого из уровней. Выполнена проверка адекватности полученных решений с помощью решения прямых задач для точек с заданной высотой и рассчитаны погрешности для каждого из уровней. Сравнение результатов показало в большинстве случаев хорошую согласованность полученных полей. Отличия в полях объясняются несогласованностью исходных данных. Метод был применён к данным с учётом статической информации, такой как корреляция, масса и ориентация магнитного поля, путём проведения серия экспериментов с использованием алгоритмов ПГС и ППС.

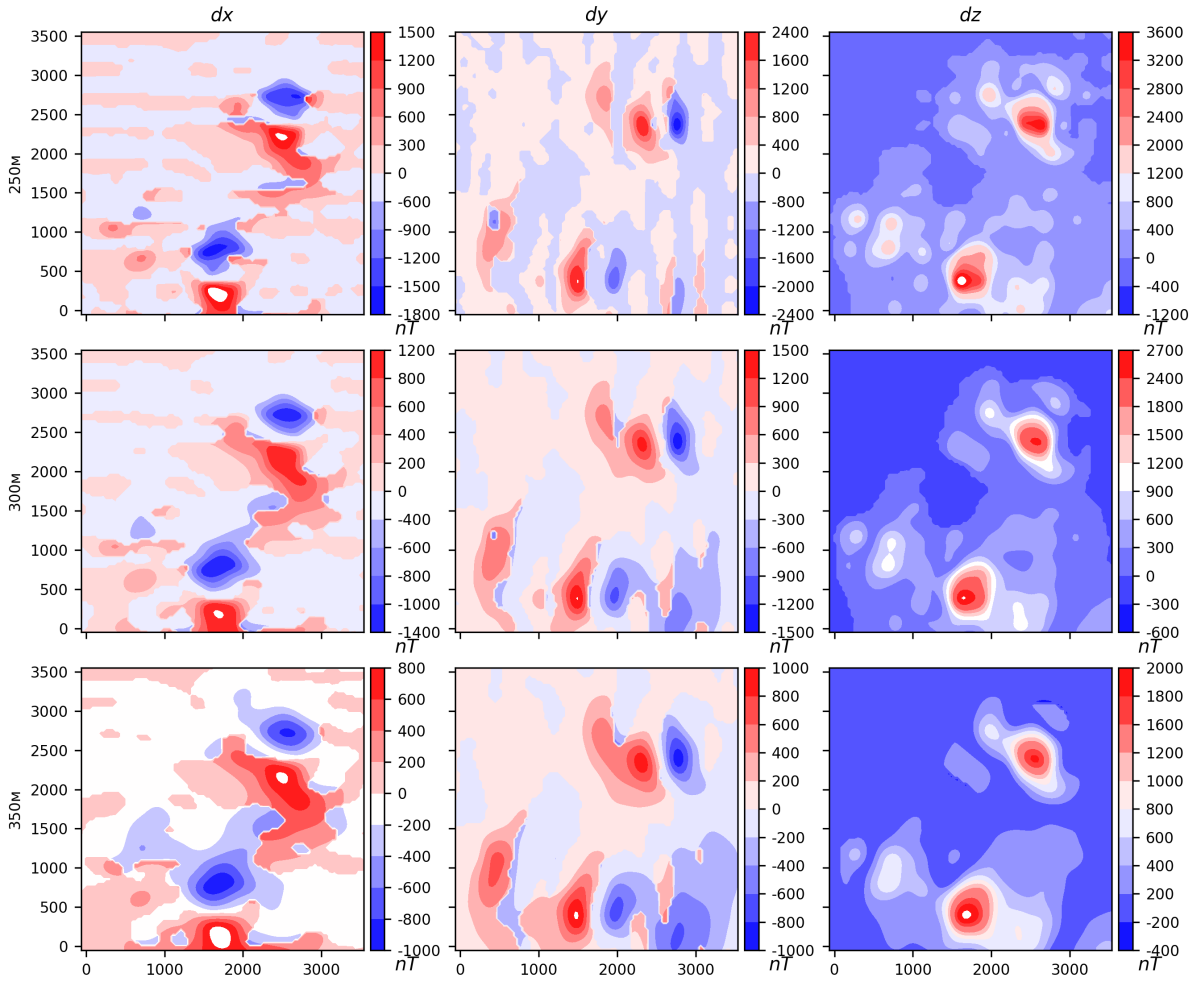


Рисунок 9.3 – Применение проекционного метода для восстановления магнитного поля на полигоне «Валимяки»: расчетные компоненты аномального магнитного поля на горизонтальных уровнях 250–350 м

Выполнено теоретическое изучение динамического варианта полиномиального спуска и поиск гладких дипольных распределений в трёхмерном евклидовом пространстве. Степень гладкости определялась с помощью расчёта величины невязки между исходными и сглаженными данными, а выбор наиболее гладкого решения из многообразия решений СЛАУ связан с задачей минимизации по суперпозиции указанной величины и решался аналитически.

Проекционный метод адаптирован с целью одновременного учёта наземных и БПЛА-измерений магнитного поля Земли. В результате проведения расчётов выявлена прямая зависимость скорости расчёта и качества полученного магнитного распределения на конечном подмножестве в трёхмерном евклидовом пространстве от числа проведенных наземных наблюдений.

Были вычислены компоненты аномального магнитного поля земной коры по данным 12 российских магнитных обсерваторий (рис. 9.4). Дополнительно поправки за аномальное поле рассчитывались для нескольких других обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ для валидации полученных результатов. Поправки были получены для трех ортогональных компонент аномального магнитного поля (*Xa*, *Ya*, *Za*) и аномалии склонения (*Da*), которая представляет собой угол между векторами полного внутреннего и главного полей.

Для 9 обсерваторий такие данные были получены впервые. Результаты сравнения полученных поправок с аналогичными результатами, полученными за 1998–2020 гг., показывают, что поле земной коры в целом за последние три десятилетия существенно не изменилось, однако для некоторых компонент и обсерваторий отклонения превысили 3-сигма. Это еще раз подчеркивает важность периодического обновления вклада аномального поля земной коры на магнитных обсерваториях. Полученные данные также позволили оценить точность существующих цифровых карт магнитных аномалий и некоторых моделей аномального поля земной коры.

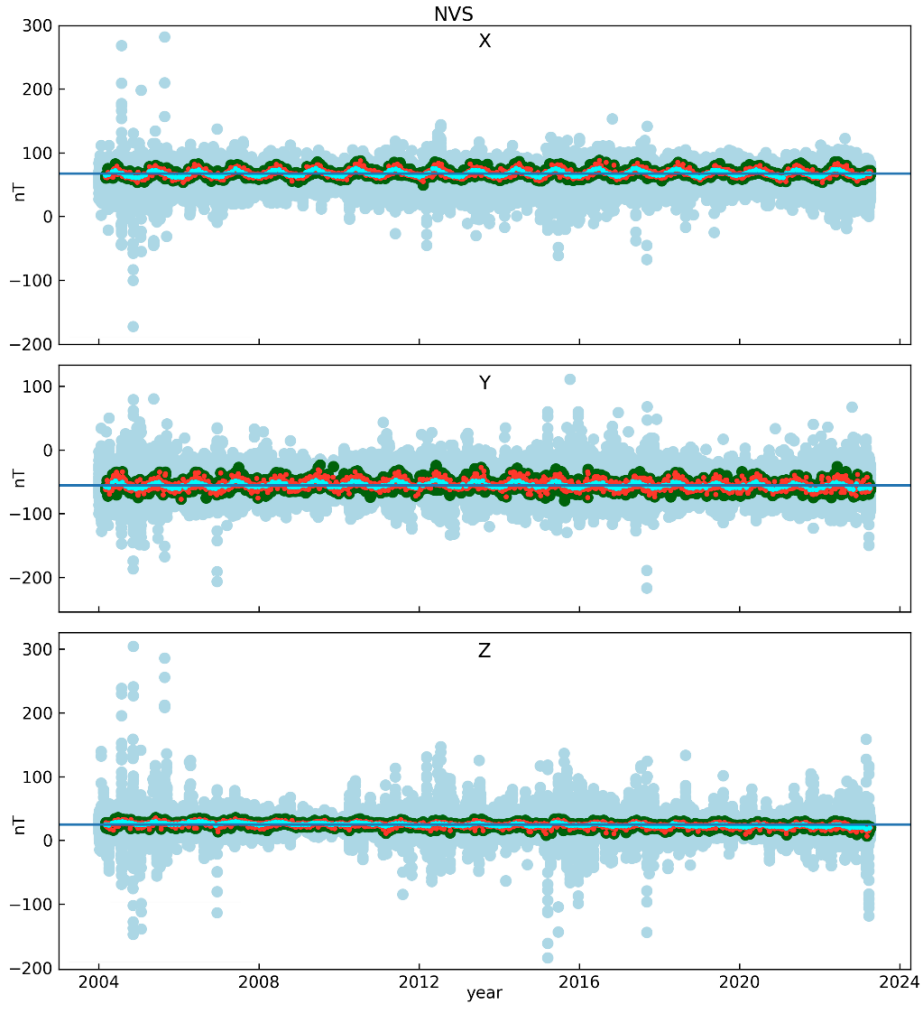


Рисунок 9.4 – Последовательное удаление вклада внешних полей из компонент магнитного поля и вычисление поправок за аномальное поле на обсерватории «Новосибирск»: среднечасовые данные за вычетом вклада главного и крупномасштабного магнитосферного полей (голубой), отфильтрованные значения за период пониженной геомагнитной активности (зеленый), среднесуточные значения (красный), среднемесячные значения (бирюзовый), вычисленная медиана (синяя линия)

Полученные геоданные преобразованы в ГИС формат с использованием QGIS с указанием пространственной привязки и опубликованы в базе геопространственных данных под управлением СУБД PostgreSQL-17 с расширениями PostGIS и PostGIS Raster. Создана ГИС на базе технологии геопортала. Применение программного стека Flask, JavaScript и OpenLayers позволило создать прототип ГИС для визуализации и взаимодействия с геоданными, полученными в результате БПЛА-съёмок, работа с которой осуществляется без необходимости установки и использования специализированного программного обеспечения, а только с использованием браузера.

10 Международная деятельность ГЦ РАН в 2025 году

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав руководящих органов международных научных организаций. Директор ГЦ РАН, член-корреспондент РАН А. А. Соловьев является членом Национального комитета РАН Комитета по данным для науки и техники Международного совета по науке (CODATA), членом Национального комитета по международной программе “Future Earth” при Президиуме РАН, с 2017 г. российский национальный делегат в Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии Международного геодезического и геофизического союза. Научный руководитель ГЦ РАН академик РАН 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, председателем Национального комитета 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. И. А. Шеремет – почётный член (Fellow) Китайской компьютерной федерации (China Computer Federation, CCF) и приглашённый профессор Харбинского политехнического университета (КНР).

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

Сотрудниками ГЦ РАН г.н.с. Ю. В. Ростовцевой и с.н.с. А. С. Кудашиным совместно со с.н.с. Н. В. Сальной (ГИН РАН), с.н.с. О. В. Пилипенко (ИФЗ РАН) и с.н.с. К. Коиава Института геологии имени А. Джанелидзе (Грузия) проводились работы по Госзаданию ГЦ РАН по теме «Циклостратиграфия». Были проведены лабораторные исследования проб, отобранных из конкских отложений Восточной Грузии (разрез Уджарма), для получения данных о первичной палеомагнитной записи горных пород, возраст которой согласуется с возрастом седиментации. Результаты работ опубликованы в различных научных изданиях:

Сальная Н., Ростовцева Ю., Коиава К., Кудашин А. Магнитостратиграфические исследования среднемиоценовых пород разреза Уджарма (Восточная Грузия): предварительные результаты / Всероссийская школа-конференция “Палеомагнетизм и магнетизм горных пород”, КФУ, г. Казань 31.03.2025 – 4.04.2025 г.

Сальная Н. В., Ростовцева Ю. В., Коиава К. П., Кудашин А. С. Проблемы и перспективы изучения миоценовых пород Восточного Паратетиса: магнитостратиграфические исследования разреза Уджарма (Грузия) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXXVI молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К. О. Кратца и акад. РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты, 22–27 сентября 2025 г. – Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2025. С. 69–71.

По результатам изучения прослоев вулканических пеплов, присутствующих в верхнемиоценовых отложениях разреза Удабно (Грузия), совместно со с.н.с. К. Коиава Института геологии имени А. Джанелидзе (Грузия).

Rostovtseva, Y., Koiava, K., Odintsova, A., Rybkina, A. (2025). Secondary Alterations in Upper Miocene Tuffs of Eastern Georgia. In: Ciner, A., *et al.* Recent Research on Sedimentology, Stratigraphy, Paleontology, Tectonics, Geochemistry, Volcanology and Petroleum Geology. MedGU 2023. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87558-8_26

В августе 2025 года в Gondwana Research опубликованы результаты совместного исследования литосферы Северного Тибета г.н.с. ГЦ РАН д.ф.-м.н. М. К. Кабана совместно с коллегами из Технологического университета Чэнду, Геологической службы Китая и Потсдамского центра им. Гельмгольца. Ученые раскрыли связь строения литосферы Тибетского нагорья с механизмами ее деформации. В результате комплексного анализа данных была построена трехмерная плотностная модель литосферы и подстилающей ее мантии.

В 2025 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 в академическом рейтинге журналов *RSCI* входит в первый квартиль *K1*, с нормированным рейтингом 0,410. В сводном рейтинге журналов *RSCI Russian Journal of Earth Sciences* занимает 143 место из 931, а в тематическом рейтинге "*OECD 105. Earth and related environmental sciences"* – 21 место из 61 журнала. Включен в *ядро РИНЦ*, пятилетний импакт-фактор (на 2024 г.) - 0,92. Входит в *"Белый список"* (Уровень 1). На сегодняшний день журнал входит в международные базы цитирования: *Scopus, Web of Science, GeoRef* и имеет высокие наукометрические показатели (на 2024 г.). Входит в 3 квартиль по *ScimagoJR (Q3)* и имеет *CiteScore* = 1,2. В базе *Web of Science* включен в четвертый квартиль (*Q4*) в отрасли знаний «Науки о Земле, междисциплинарные» (Geosciences, Multidisciplinary). В 2025 году журнал вошел в *DOAJ*.

В 2025 г. опубликован спецвыпуск Russian Journal of Earth Sciences по материалам международной конференции к 70-летию Геофизического центра РАН и 300-летию РАН «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» по широкому спектру тем в области наук о Земле, включая природные катастрофы, разведку полезных ископаемых, климатические изменения, экологические проблемы, геофизические исследования, большие данные и методы их обработки.

Важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах, которые состоялись в 2025 г.:

С 12 по 14 февраля 2025 года состоялся рабочий визит сотрудников Геофизического центра РАН в Южноафриканское национальное космическое агентство (SANSA, South African National Space Agency) в город Херманус, ЮАР. ГЦ РАН представляли директор член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв, ученый секретарь к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров и заведующий сектором геофизического мониторинга к.т.н.

Д. В. Кудин. В рамках визита был организован научный семинар Департамента космических исследований SANSA, на котором были представлены доклады о научной деятельности, ведущейся в обеих организациях. Состоялась рабочая встреча представителей российской делегации и руководства Департамента космических исследований SANSA. Специалисты ГЦ РАН посетили магнитную обсерваторию и ознакомились со сферой деятельности различных подразделений SANSA, расположенных в Хермануce.

14 мая 2025 года заведующий сектором геофизического мониторинга ГЦ РАН к.т.н. Д. В. Кудин выступил с докладом на VIII Международной геолого-геофизической конференции и выставке «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес» на тему «Актуализация модели магнитного поля и магнитовариационное обеспечение в прикладных задачах».

12–16 мая 2025 года в Майкопе состоялась VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Сопредседателем программного комитета выступил научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани. Среди членов программного комитета – сотрудники ГЦ РАН: заместитель директора по науке д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев, главный научный сотрудник д.ф.-м.н. С. А. Лебедев и ведущий научный сотрудник д.ф.-м.н. А. Г. Костяной. С. А. Лебедев выступил с докладом «Спутниковая океанология. Современное состояние и перспективы развития», возглавил секцию «Изменения климата и его последствия» и представил сообщения: «Волновой климат Баренцева моря по данным спутниковой альтиметрии» (в соавторстве с д.ф.-м.н. А. Г. Костяным, ведущим инженером ГЦ РАН Е. А. Костяной и к.г.н. А. В. Бочаровым) и «Продвижение паводка реки Волга по акватории Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии» (соавтор – А. Г. Костяной). С. А. Лебедев и А. Г. Костяной также стали соавторами докладов, с которыми выступил А. В. Бочаров: «Межсезонные вариации точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным спутников Landsat Level-2» и «Анализ сценарных оценок температуры воздуха в регионе Каспийского моря по данным модели CNRM-CM6-1-HR». С докладами на конференции также выступили сотрудники ГЦ РАН К. А. Кочубей и А. А. Камаев.

10–11 июня в Астане (Республика Казахстан) состоялась международная конференция «Методы и модели системного анализа для изучения, прогнозирования и оценки рисков наводнений и других стихийных бедствий». Был представлен доклад научного руководителя ГЦ РАН академика РАН А. Д. Гвишиани и заместителя директора по науке ГЦ РАН д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоева «Методы системного анализа для оценки рисков стихийных бедствий». В докладе были освещены математические методы системного анализа, развиваемые в ГЦ РАН научной школой академика РАН А. Д. Гвишиани.

Директор ГЦ РАН член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв выступил с докладом «Математические методы оценки опасного воздействия космической погоды на промышленные системы». Конференция была организована при поддержке IIASA, РАН, AIU и ISCA.

11 июля 2025 года директор ГЦ РАН член-корреспондент РАН А. А. Соловьев принял участие в совещании по вопросу формирования научно-исследовательской программы международной арктической станции «Снежинка». Была представлена программа ведущих научных исследований и инновационных разработок для арктического региона и проведения их испытаний на базе Арктической станции «Снежинка» на Ямале (2025–2030 гг.).

29 сентября – 2 октября 35-я международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения «ГрафиКон-2025» состоялась в Поволжском государственном технологическом университете (Йошкар-Ола). Научный сотрудник ГЦ РАН Г. С. Бояршинов выступил с докладом об унифицированной обработке данных в системе класса интерактивной сферической визуализации и рассазал о работе над усовершенствованием платформы ORBUS-PRO, которая позволяет визуализировать данные о Земле и других планетах на сферических проекционных экранах, светодиодных дисплеях, а также в веб-приложении типа виртуальный глобус.

30 октября 2025 года в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» прошло 14-е заседание Совместной Российско-Южноафриканской комиссии по научно-техническому сотрудничеству. Ученый секретарь ГЦ РАН к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров выступил на заседании с докладом о перспективных направлениях сотрудничества между ГЦ РАН и Южноафриканским национальным космическим агентством в области геофизических исследований. Особое внимание в докладах было уделено подготовке научных кадров. Российская сторона подтвердила готовность расширять прием аспирантов и магистрантов из ЮАР. Стороны также высоко оценили плодотворное взаимодействие по линии БРИКС.

9 ноября 2025 г. состоялся Научный семинар ГЦ РАН. На нем был представлен доклад главного научного сотрудника лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН д.ф.-м.н. М. К. Кабана на тему «Инициатива по новому международному проекту TopoAsia».

С 19 по 26 октября 2025 года в Шанхае прошла учредительная конференция по новому проекту TopoAsia. Основной целью проекта является углубление нашего понимания эволюции рельефа Азии как результата взаимодействия различных процессов от мантийной конвекции до поверхностных факторов, связанных, например, с эрозией и влиянием климатических изменений. Это предполагается сделать с помощью междисциплинарного подхода, объединяющего геофизику, геологию, геохимию и геодинамическое моделирование.

10 декабря состоялась Международная научная сессия, посвященная 95-летнему юбилею Геологического института РАН, в которой приняли участие заместитель академика-секретаря ОНЗ РАН, научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани и директор ГЦ РАН член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв.

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.

В 2025 г. прошли научные ассамблеи ассоциаций IUGG, в работе которых приняли участие ученые и специалисты из России:

- Научная ассамблея Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (IAVCEI), Женева, Швейцария, 29 июня – 4 июля 2025 г.;
- Совместная научная ассамблея Международных ассоциаций: криосферных наук, метеорологии и атмосферных наук и физических наук об океане (IACS/IAMAS/IAPSO), Пусан, Республика Корея, 20–25 июля 2025 г.;
- Совместная научная ассамблея Международных ассоциаций: геомагнетизма и аэрономии и сейсмологии и физики недр Земли (IAGA/IASPEI), Лиссабон, Португалия, 31 августа – 6 сентября 2025 г.;
- Научная ассамблея Международной ассоциации геодезии (IAG), Римини, Италия, 1–5 сентября 2025 г.;
- Научная ассамблея Международной ассоциации гидрологических наук (IAHS), Рурки, Индия, 5–10 октября 2025 г.

С 31 августа по 5 сентября в г. Лиссабоне, Португалия, проходила Совместная научная ассамблея Международных ассоциаций: геомагнетизма и аэрономии и сейсмологии и физики недр Земли (IAGA/IASPEI). Научные сессии проводились в кампусе Лиссабонской школе инженерии (The Lisbon School of Engineering – ISEL). В работе ассамблеи приняли участие 1262 зарегистрированных участников, которые представили 959 презентации и более 400 постеров. Было организовано 35 сессий IAGA, 22 сессий IASPEI и 11 объединенных сессий (Joint Sessions). В качестве аккредитованного национального делегата от России в заседаниях IAGA принял участие заведующий сектором геофизического мониторинга ГЦ РАН к.т.н. Д. В. Кудин:

- Заседание Working Group V-DAT: Geomagnetic Data and Indices (Д. В. Кудин выступил с кратким сообщением о работе МЦД СЗФ Москва);
- Заседание Working Group V-MOD: Geomagnetic Field Modeling (утверждена модель IGRF-14);
- Заседание Working Group V-OBS: Geomagnetic Observation (USGS с июля 2025 перестают готовить окончательные данные своих обсерваторий из-за недостатка финансирования);
- Заседание Division V: Geomagnetic observatories, surveys and analyses;
- Конференция национальных делегатов IAGA (присутствовало 12 национальных делегатов из 64).

Список основных научных публикаций за 2025 год

Монографии

1. Кудрявцев Н.Г., Фролов И.Н., Сафонова В.Ю., Кудин Д.В. О программно-аппаратном обеспечении инфразвукового мониторинга на территории Республики Алтай. – Горно-Алтайск: БИЦ ГАГУ, 2025. – 240 с. ISBN 978-5-91425-216-5
2. Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Шевалдышева О.О., Фадеев А.А. Магнитная и плотностная модель метеоритного кратера озера Смердячье. В кн. «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов» (г. Пермь, 27–31 января 2025 г.). - Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. – С. 151–156. EDN: HWXERN
3. Ростовцева Ю.В. Экзолит – 2025: Собрание (научные чтения), посвященные 220-летию основания Московского общества испытателей природы; Москва, 13–14 ноября 2025 г.: Сборник научных материалов / Секция «Литология» МОИП, Геофизический центр РАН; под ред. Ю. В. Ростовцевой. – Москва: МАКС Пресс, 2025. – 222 с.

Статьи в журналах

1. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н., Камаев Д.А. (2025). К вопросу о дискретной гладкости. Чебышевский сборник, 26(5), 6–16. DOI: 10.22405/2226-8383-2025-26-5-6-16
2. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Камаев Д.А., Дзебоев Б.А., Добровольский М.Н. (2025). Распознавание аномалий на записях с помощью нечеткой логики. Чебышевский сборник, 26(3), 6–43. DOI: 10.22405/2226-8383-2025-26-3-6-43
3. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. (2025). Нечеткие линейные системы. Чебышевский сборник, 26(5), 17–41. DOI: 10.22405/2226-8383-2025-26-5-17-41
4. Агаян С.М., Соловьев А.А., Богоутдинов Ш.Р., Дзебоев Б.А., Дзеранов Б.В., Добровольский М.Н. (2025). Методы нечеткой математики для комплексного анализа геофизической информации. Физика Земли, -(5), 3–26. DOI: 10.7868/S3034645225050013
5. Алёшин И.М., Соловьёв А.А., Холодков К.И., Передерин Ф.В., Таран Я.В. (2025). Вертикальный градиент геомагнитного поля по результатам повысотной аэромагнитной съемки. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 520(1), 124–128. DOI: 10.31857/S2686739725010136
6. Бочаров А.В., Гречушникова М.Г., Биденко С.И., Лебедев С.А., Григорьева И.Л. (2025). Уточнение площади водного зеркала Иваньковского водохранилища по данным дистанционного зондирования Земли. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 80(4), 28–39. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.4.3
7. Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петров В.Г., Кудин Д.В., Виноградова А.А. (2025). Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин. Маркшейдерия и недропользование, 25(4), 71–82. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-4-71-82
8. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. (2025). Геоинформационная система для мониторинга продольных токов по данным низкоорбитальных спутников. Геодезия и картография, 86(7), 55–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1021-7-55-64
9. Воробьев А.В., Лапин А.Н., Воробьева Г.Р. (2025). Подход к автоматической классификации полярных сияний по данным наблюдений камер всего неба. Геомагнетизм и аэрономия, 65(5), 728–738. DOI: 10.7868/S3034502225050153
10. Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Орлов Г.О. (2025). Модель хранения пространственных данных тензорных геофизических полей. Научно-технический вестник информационных

технологий, механики и оптики, 25(3), 565–573. DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-565-573

11. Воробьева И.А., Шебалин П.Н., Малютин П.А., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А. (2025). Объединенный каталог землетрясений российской Арктики, 1962–2024 гг. Вулканология и сейсмология, -(6), 3–17. DOI: 10.7868/S3034513825060014
12. Докукин П.А., Кафтан В.И. (2025). Рождение вулкана или Санторин пробуждается? Вестник ОНЗ РАН.
13. Кафтан В.И. (2025). Исследована пятилетняя эволюция тектоники в связи с мегаземлетрясением на Камчатке. Вестник ОНЗ РАН.
14. Кафтан В.И. (2025). Японский архипелаг: ожидание катастрофы. Фатум или гнозис? Вестник ОНЗ РАН.
15. Кафтан В.И., Маневич А.И., Габсатаров Ю.В., Карапетян Дж.К., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Саяпина А.А. (2025). Влияние серии катастрофических землетрясений Караманмараш (6 февраля 2023 г.) на режим современных движений земной коры Кавказа. Физика Земли, -(5), 126–138. DOI: 10.7868/S3034645225050082
16. Кафтан В.И., Мельников А.Ю., Докукин П.А. (2025). Эволюция дефицита внутренних смещений земной коры по данным GPS в связи с сейсмичностью 2014–2024 гг. и землетрясением Хуалянь, Тайвань (Mw=7.4). Геодинамика и тектонофизика, 16(1), 1–14. DOI: 10.5800/GT-2025-16-1-0812
17. Кафтан В.И., Миронов И.К., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. (2025). Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана (п-ов Камчатка) с 2015 по 2023 гг. Физика Земли, -(3), 115–128. DOI: 10.31857/S0002333725030093
18. Ковалев Д.В., Воробьев А.В., Вальчук А.С., Воробьева Г.Р., Ханнанов Н.К. (2025). Оценка эффектов воздействия космической погоды на достоверность показаний магнитных инклинометров. Космические исследования, 63(6), 590–600. DOI: 10.7868/S3034550225060024
19. Коликов К.С., Маневич А.И., Ледяев Н.В., Комиссаров И.А. (2025). Повышение эффективности дегазации угольного пласта при его подготовке к безопасной отработке на основе использования эффекта сорбционных деформаций. Горная промышленность, -(2), 92–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-92-96
20. Кочубей К.А., Маневич А.И., Татаринова Т.А. (2025). Выявление зон неотектонической активизации в пределах Центрального Кавказа (Республика Северная Осетия – Алания). Устойчивое развитие горных территорий, 17(3), 1311–1319. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1311-1319
21. Кудрявцева Т.М. (2025). Научные доклады на заседаниях Бюро Отделения наук о Земле РАН в 2024 году. Вестник ОНЗ РАН, 17(-), 1–13. DOI: 10.2205/2025NZ000376
22. Лебедев С.А., Гусев И.В., Сакович А.В., Слободянюк А.О. (2025). Расчёт коэффициентов параметрической модели поправки на состояние подстилающей поверхности по альтиметрическим измерениям космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 22(2), 53–67. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-53-67
23. Ледяев Н.В., Черухин А.А., Коликов К.С., Маневич А.И. (2025). Оценка моделей проницаемости углепородного массива с учётом напряженно-деформированного состояния. Горная промышленность, -(6), 194–198. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-194-198

24. Лисенков И.А., Соловьев А.А., Кузнецов В.А., Ю.И. Николова (2025). Обобщенный массив геолого-геофизической информации восточного сектора российской Арктики для проведения анализа методами машинного обучения. Геология и геофизика, 66(2), 232–246. DOI: 10.15372/GiG2024148

25. Лосев И.В., Евсеев А.В., Камаев А.А., Жукова И.А. (2025). Перспективы нейросетевого моделирования для оценки опасности затопления рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Горный журнал, -(1), 154–158. DOI: 10.17580/gzh.2025.01.22

26. Лыгин И.В., Соловьёв А.А., Алёшин И.М. (2025). Параметры аномального магнитного поля земли в окрестности геомагнитной обсерватории «Климовская» по данным многоуровневой магнитной съемки. Гелиогеофизические исследования, –(50), 19–30.

27. Лыгин И.В., Соловьёв А.А., Алёшин И.М., Шевалдышева О.О. (2025). Обзор методов восстановления пространственной структуры аномального магнитного поля Земли в окрестностях геомагнитных обсерваторий. Геомагнетизм и аэрономия, 65(6), 909–924. DOI: 10.7868/S3034502225060121

28. Лыков Н.А., Ростовцева Ю.В., Закирьянов И.Г., Тимохин А.В., Дронов А.В., Гонта Т.В., Постникова О.В. (2025). Известковые цианобактерии в биогермах и пелециподовых банках конца среднего Ордовика разреза р. Мойеро (север Сибирской платформы). Геология и геофизика, 66(11), 1434–1446. DOI: 10.15372/GiG2025144

29. Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Дзеранов Б.В. (2025). Разработка региональной карты ориентациисей действующих напряжений для территории Республики Северная Осетия-Алания. Горный журнал, -(1), 48–53. DOI: 10.17580/gzh.2025.01.07

30. Маневич А.И., Лосев И.В., Шевчук Р.В., Акматов Д.Ж. (2025). Нейросетевое моделирование полей современных движений земной поверхности в районе подземной исследовательской лаборатории по данным ГНСС-наблюдений. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 70(4), 816-839. DOI: 10.21638/spbu07.2025.408

31. Морозов А.Н., Дзебоев Б.А., Алешин И.М., Ваганова Н.В. (2025). Инструментальные сейсмические наблюдения на Кавказе в первой половине XX в. Сейсмические приборы, 61(2), 5–22. DOI: 10.21455/si2025.2-1

32. Парфенов К.В., Оборин А.В., Шевчук С.В., Маневич А.И., Лосев И.В., Гурбаннепесов Д.А. (2025). Геоинформационное моделирование деформаций на основе линеаментного анализа как дополнительный фактор обеспечения промышленной безопасности размещения объектов нефтегазового комплекса. Газовая промышленность, -(5), 20–27.

33. Пилипенко В.А. (2025). Что такое космическая погода и какое нам до нее дело? Динамические процессы в геосферах, 17(3), 28–47. DOI: 10.26006/29490995_2025_17_3_28

34. Сергеева Н.А., Забаринская Л.П. (2025). Глубинное строение и очаги землетрясений по субширотному профилю Северный Сихотэ-Алинь – Сахалин. Вулканология и сейсмология, -(5), 48–57. DOI: 10.7868/S3034513825050043

35. Сидоров Р.В., Кудин Д.В., Хомутов С.Ю., Анисимов С.В., Соловьев А.А., Насыртдинов Б.М., Муравьёв Л.А., Прикоп М.В., Вертипрахова А.В., Хохлова В.В., Егошин А.А. (2025). Всероссийская сверка обсерваторских магнитометров в Геофизической обсерватории «Борок». Геомагнетизм и аэрономия, 65(6), 925–942. DOI: 10.7868/S3034502225060137

36. Соловьева Е.Н., Никитина И.М. (2025). История исследований Геофизического центра РАН. 2018 год. Смена руководителя. Вестник ОНЗ РАН, 17(-), 1–50. DOI: 10.2205/2025NZ000377

37. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Малютин П.А., Греков Е.М., Антипова А.О., Воробьева И.А., Дзебоев Б.А., Дзеранов Б.В. (2025). Синтетический каталог землетрясений восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации. Вулканология и сейсмология, -(2), 3–19. DOI: 10.7868/S3034513825010012

38. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Лосев И.В., Камаев А.А. (2025). Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности. Горная промышленность, -(6), 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-97-104

39. Шеремет И.А., Матвеев С.А. (2025). Оценка перспектив развёртывания орбитальной группировки спутниковой системы Starlink. Вестник Российской академии наук, –(5), 26–32. DOI: 10.31857/S0869587325050039

40. Alekseev A.D., Nemova V.D., Sapogova E.E., Rostovtseva Yu.V. (2025). Study of Natural Reservoirs in the Volcanogenic-Sedimentary to Pre-Jurassic Complex of the West Siberian Oil-Gas Basin. Russian Journal of Earth Sciences, 25(4), 1–16. DOI: 10.2205/2025es001043

41. Badulin S., Kostianoy A., Lebedev S., Popov A. (2025). The Caspian Sea as a full-scale experimental facility supported by altimetry measurements of wind-driven waves. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 110(-), 1–24. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2025.101554

42. Bocharov A.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A. (2025). Interseasonal changes in the accuracy of retrieval of sea surface temperature of the Caspian Sea based on LANDSAT-5, -7 satellite data. Pure and Applied Geophysics, (), 1–12. DOI: 10.1007/s00024-025-03770-7

43. Bocharov A.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Grebenikov D.A., Kravchenko P.N. (2025). Assessment of the accuracy of retrieval of the Caspian Sea surface temperature from the MODIS data based on SVPB drifter measurements. Ecologica Montenegrina, 85(-), 107–118. DOI: 10.37828/em.2025.85.6

44. Bocharov A.V., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kolomeets L.I., Kravchenko P.N. (2025). What SSP global climate change scenario is the Caspian Sea region following? Part 1: Air temperature analysis. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–12. DOI: 10.2205/2025ES001075

45. Dzeranov B., Gvishiani A., Dzeboev B., Zaalishvili V., Sayapina A., Mel'kov D., Gabaraev A., Fomenko N. (2025). Seismicity and seismic hazard assessments of the Ossetian sector of the Greater Caucasus. Review. Russian Journal of Earth Sciences, 25(1), 1–22. DOI: 10.2205/2025ES000959

46. Gabyshev D.N. (2025). Condensational growth of spherical water droplets altered under external electric fields. Journal of Aerosol Science, 186(-), 1–9. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2025.106554

47. Gabyshev D.N. (2025). Semi-analytical refinement of submicron droplet growth by condensation. Russian Journal of Earth Sciences, 25(2), 1–8. DOI: 10.2205/2025ES000974

48. Getmanov V.G., Gvishiani A.D., Pilipenko V.A., Stukov D.A. (2025). Estimation of parameters of non-stationary geophysical signals based on two-stage approximations using local models. Russian Journal of Earth Sciences, 25(2), 1–6. DOI: 10.2205/2025ES000979

49. Jeon J., Lykov N., Dronov A., Rostovtseva Yu., Toom U., Li Q.-J. (2025). Calcimicrobe-stromatoporoid bioherms from the upper Darriwilian of the Moyero River, Siberia: Implications for reef development during the Great Ordovician Biodiversification Event. Palaeoworld, 34(4), 1–13. DOI: 10.1016/j.palwor.2024.200907

50. Kaban M.K., Petrunin A.G., Sidorov R.V., Shevaldysheva O.O. (2025). Lithospheric thickness in northeastern Eurasia. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–8. DOI: 10.2205/2025es001095

51. Kamaev A.A. (2025). Analysis of spectral remote sensing data for geological mapping of rare earth elements (case study of the Kola Peninsula). Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–7. DOI: 10.2205/2025ES001077

52. Kostianoy A.G., Gvishiani A.D., Lebedev S.A., Rozenberg I.N., Krasnoperov R.I., Dubchak I.A., Gvozdik S.A., Shevaldysheva O.O., Sergeev V.N., Nikolova J.I. (2025). Projection of regional climate change for 2023–2064 in the northern part of the Western Russian Arctic: A support for Russian Railways. Geography, Environment, Sustainability, 18(4), 61–79. DOI: 10.24057/2071-9388-2025-4179

53. Kostianoy A.G., Gvishiani A.D., Rozenberg I.N., Krasnoperov R.I., Gvozdik S.A., Lebedev S.A., Nikitina I.M., Dubchak I.A., Shevaldysheva O.O., Sergeev V.N., Gvozdik G.A. (2025). Geoinformation analysis of regional climatic changes in the Central and Western Russian Arctic for railway development. Russian Journal of Earth Sciences, 25(1), 1–34. DOI: 10.2205/2025es000956

54. Le Mau, Vlasova G., Lebedev S., Pham Hoan, Nguyen Dung, Nguyen Tuan, Ho The (2025). Activity of Typhoons in Spratly Archipelago (The South China Sea). Russian Journal of Earth Sciences, 25(1), 1–13. DOI: 10.2205/2025ES000986

55. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Kostianaia E.A., Bocharov A.V., Slobodyanyuk A.O. (2026). Wave climate of the Barents Sea based on satellite altimetry data. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–14. DOI: 10.2205/2025ES001076

56. Liang S., Wang X., Zhao G., Kaban M., Dai Y., Xu Z., Yang J., Zhang L. (2025). East-West Asymmetry of the Deep Lithosphere beneath the Northern Tibet Revealed by a 3D Gravity Inversion. Gondwana Research, 144(-), 239–251. DOI: 10.1016/j.gr.2025.04.009

57. Losev I.V., Baryakh A.A., Evseev A.V., Kamaev A.A., Zhukova I.A., Manevich A.I., Shevchuk R.V., Akmatov D.Zh. (2025). On an approach to zoning risks of groundwater protective layer failure based on a set of geophysical and geotechnical characteristics. Russian Journal of Earth Sciences, 25(4), 1–11. DOI: 10.2205/2025ES001015

58. Maksimenko V.V., Lushnikov A.A., Zagaynov V.A., Agranovski I.E. (2025). Plasmon mechanism of sonoluminescence in water. Russian Journal of Physical Chemistry A, 99(12), 3150–3158. DOI: 10.1134/S0036024425702619

59. Minaev V.A., Ustinov S.A., Petrov V.A., Svecherevsky A.D., Nafigin I.O., Manevich A.I., Akmatov D.Zh. Regional remote sensing analysis of fault tectonics in the northwestern part of the Verkhoyan-Kolyma orogenic region and assessment of its role in ore formation. Russian Journal of Earth Sciences, 25(4), 1–14. DOI: 10.2205/2025es001039

60. Morozov A.N., Filippova A.I., Asming V.E., Radziminovich Y.B., Vaganova N.V. (2025). Method for probabilistic location of early instrumental earthquakes based on their macroseismic and instrumental data: evaluation of effectiveness and application for the Baikal region. Natural Hazards, 121(18), 21665–21682. DOI: 10.1007/s11069-025-07659-5

61. Morozov V.N., Manevich A.I. (2025). Prediction of the Location and Intensity of Strong Continental Earthquakes (Based on Mathematical Modeling Results). Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–16. DOI: 10.2205/2025es001086

62. Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E. (2025). Earthquakes in the Eastern Sector of the Russian Arctic in the First Half of the 20th Century. Geodynamics and Tectonophysics, 16(5), 1–14. DOI: 10.5800/GT-2025-16-5-0853

63. Morozov A.N., Vaganova N.V., Asming V.E., Fedorov I.S., Peretokin S.A., Altynbek uulu T. (2025). Seismicity of the eastern sector of the Russian Arctic during the instrumental period of observations. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–22. DOI: 10.2205/2025es001067

64. Rostovtseva Yu.V., Nemova V.D., Nemchenko N.V., Tomasenko S.V., Pustylnikova V.V. (2025). Petrogenetic typing of volcanics from the top of the oil-bearing pre-Jurassic complex in the Elizarovsky trough of the West Siberian Plate. Russian Journal of Earth Sciences, 25(4), 1–18. DOI: 10.2205/2025es001042

65. Shevchuk R.V., Manevich A.I., Losev I.V., Aleshin I.M., Akmatov D.Zh., Tatarinova T.A. (2025). Estimation of anomalous deformations of the Earth's surface at the Nizhne-Kansk geodynamic site with regard to their spatial scalability. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 61(12), 1611–1622. DOI: 10.1134/S0001433826700453

66. Sidorov R.V., Kaban M.K. (2025). Improved sedimentary thickness model for Central-Northern Eurasia derived from decompensative gravity anomalies. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–11. DOI: 10.2205/2025ES001066

67. Sidorov R., Soloviev A., Bogoutdinov Sh. (2025). A 6-year quasi-periodicity in the geomagnetic secular acceleration pulses over 1932-2022. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 361(-), 1–11. DOI: 10.1016/j.pepi.2025.107330

68. Soloviev A.A., Gvishiani A.D. (2025). 70 years of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences: history and current state. Russian Journal of Earth Sciences, 25(2), 1–14. DOI: 10.2205/2025ES000999

69. Taran Y.V., Aleshin I.M. (2025). Petrophysical properties of rocks of the Northern Ladoga. Russian Journal of Earth Sciences, 25(4), 1–5. DOI: 10.2205/2025ES001022

70. Taran Y.V., Aleshin I.M., Bolshakov E.M., Sokolova E.Y., Tikhotskiy S.A. (2025). UAV aeromagnetic survey of the Valimyaki complex (northern Ladoga area): first estimates of the buried intrusion structure. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–10. DOI: 10.2205/2025ES001099

71. Taran Ya.V., Aleshin I.M., Matveev M.A., Mokrov D.K., Morozov Yu.A., Perederin F.V., Rosenberg N.K., Kholodkov K.I., Shcherbakov V.M. (2025). Preliminary results of field geological and geophysical studies of the Vyalimyaki massif (Northern Ladoga region). Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 61(7), 824–833. DOI: 10.1134/S0001433825701117

72. Vorobev A.V., Soloviev A.A., Vorobeva G.R. (2025). Approach to hardwareless assessment of the geoinduced currents level in high-latitude power electric systems. Russian Journal of Earth Sciences, 25(5), 1–7. DOI: 10.2205/2025ES000997

73. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. (2025). Application of Convolutional Neural Networks for Upper Ionosphere Remote Sensing Using All-Sky Camera Data. Moscow University Physics Bulletin, 80(Suppl 3), S1198–S1207. DOI: 10.3103/S0027134925702911

74. Vorobev A.V., Vorobeva G.R. (2025). Problems of Implementing Web GIS Technologies for Processing, Analysis and Visualization of Geophysical Data. Russian Journal of Earth Sciences, 25(2), 1–7. DOI: 10.2205/2025ES000973

75. Vorobeva G.R., Vorobev A.V., Orlov G.O. (2025). Glyph-based approach to web rendering of geophysical fields in geoinformation systems. Scientific Visualization, 17(3), 88–102. DOI: 10.26583/sv.17.3.09

76. Vorobiev A.V., Pilipenko V.A., Dobrovolsky M.N., Kozyreva O.V., Evdokimova M.A., Kudin D.V. (2025). New regional geomagnetic indices for the Russian Sector of the geomagnetic observation network. Russian Journal of Earth Sciences, 25(6), 1–15. DOI: 10.2205/2025ES001089

77. Zebrowski P., Boyarshinov G., Odintsova A., Rovenskaya E. (2025). Explaining COVID-19 dynamics through user activity data from digital platforms with Yandex's self-isolation index as a case study. Scientific Reports, 15(40709), 1–14. DOI: 10.1038/s41598-025-24240-z

Конференции

1. Акматов Д.Ж., Татаринова Т.А., Маневич А.И., Дзебоев Б.А. Исследования напряженно-деформированного состояния земной коры Большого Кавказа на основе геомеханического моделирования // XIX Международная сейсмологическая школа ФИЦ ЕГС РАН (г. Махачкала, сентябрь 2025 г.), 2025.

2. Бадулин С.И., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Попов А.П. Каспийское море как природная лаборатория для исследований морского волнения // Тринадцатая международная Школа-

семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.), 2025.

3. Бочаров А.В., Гречушникова М.Г., Биденко С.И., Лебедев С.А., Григорьева И.Л. Оценка площади водного зеркала Иваньковского водохранилища на основе данных Sentinel-2 // Тринадцатая международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.), 2025.
4. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А. Межсезонные вариации точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным спутников Landsat Level-2 // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.
5. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А. Сезонная изменчивость точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным Landsat // Тринадцатая международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.), 2025.
6. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Гребеников Д.А., Кравченко П.Н. Оценка точности определения температуры поверхности Каспийского моря по данным MODIS на основе in situ измерений // 23-я международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (г. Москва, 10–14 ноября 2025 г.), 2025.
7. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Коломеец Л.И. Анализ сценарных оценок температуры воздуха в регионе Каспийского моря по данным модели CNRM-CM6-1-HR // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.
8. Бояршинов Г.С. Унифицированная обработка данных в системе класса интерактивной сферической визуализации // 35-я международная конференция ГрафиКон 2025 (г. Москва, 30 сентября – 2 октября 2025 г.), 2025.
9. Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А. Методы системного анализа для оценки рисков стихийных бедствий // Международная конференция «Методы и модели системного анализа для изучения, прогнозирования и оценки рисков наводнений и других стихийных бедствий» (г. Астана, Казахстан, 10–11 июня 2025 г.), 2025.
10. Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А. Распознавание местовозможных землетрясений в Восточной Арктике // Третья конференция «Геофизика и Математика» (г. Екатеринбург, 6–8 ноября 2025 г.), 2025.
11. Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения скважин с привлечением технологий Больших Данных // Всероссийская научная конференция «Перспективы геофизики и геологии первой половины XXI века», посвященная 75-летию академика М.И. Эпова (г. Новосибирск, 21 марта 2025 г.), 2025.
12. Дзебоев Б.А. О концепции комплексной междисциплинарной арктической научной экспедиции РАН и Якутии (до 2032 года) // VI Северный Форум по устойчивому развитию «Север и Арктика – партнерство в меняющемся мире» (г. Якутск, 26–28 ноября 2025 г.), 2025.
13. Докукин П.А., Гёк Э., Кафтан В.И., Кафтан И., Шевчук Р.В. Современные движения и деформации земной коры в регионе Эгейского моря в связи с сейсмичностью и вулканизмом // Всероссийская конференция «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (г. Санкт-Петербург, 5–6 июня 2025 г.), 2025.

14. Докукин П.А., Кафтан В.И. Анализ непрерывных спутниковых геодезических наблюдений для прогноза мест сильных сейсмических событий // Всероссийская конференция «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (г. Санкт-Петербург, 5–6 июня 2025 г.), 2025.
15. Докукин П.А., Кафтан В.И. Применение синоптических анимаций для прогноза мест сильных землетрясений по данным ГНСС наблюдений // IV Всероссийская научная конференция «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, 22–23 октября 2025 г.), 2025.
16. Докукин П.А., Кафтан В.И., Мельников А.Ю. Эволюция ДВС земной коры в районе острова Тайвань в связи с сейсмичностью 2014–2024 гг. (по данным ГНСС-наблюдений) // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2025. LVI (56) Тектоническое совещание (г. Москва, 27 января – 1 февраля 2025 г.), 2025.
17. Кафтан В.И., Мельников А.Ю., Докукин П.А. Оценка опасности возникновения мега-землетрясения в районе желоба Нанкай (Япония) по данным ГНСС-наблюдений // IV Всероссийская научная конференция «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, 22–23 октября 2025 г.), 2025.
18. Комитов Б., Кафтан В.И. Космическая погода, климат и геотектоника // Двадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (г. Москва, 10–14 февраля 2025 г.), 2025.
19. Камаев А.А. Перспективы использования спектральных данных дистанционного зондирования для геологического картирования редкоземельных элементов // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.
20. Кочубей К.А. Идентификация геодинамически активных зон Центрального Кавказа с применением ГИС-технологий // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.
21. Кочубей К.А. Асимметрия дренажной сети и её связь с активными разломами Центрального Кавказа (Республика Северная Осетия – Алания) // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН – 2025 (г. Москва, 5–7 ноября 2025 г.), 2025.
22. Кудин Д.В. Актуализация модели магнитного поля и магнитовариационное обеспечение в прикладных задачах // VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес» (г. Москва, 14–16 мая 2025 г.), 2025.
23. Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Шевалдышева О.О., Фадеев А.А. Магнитная и плотностная модель метеоритного кратера озера Смердячье // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов (г. Пермь, 27–31 января 2025 г.), 2025.
24. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия – основы метода и приложения в науках о Земле // Тринадцатая международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.), 2025.
25. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Продвижение паводка реки Волга по акватории Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.

26. Лебедев С.А., Костяной А.Г., Костяная Е.А., Бочаров А.В. Волновой климат Баренцева моря по данным спутниковой альтиметрии // VIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.), 2025.
27. Лыков Н.А., Ростовцева Ю.В., Дронов А.В., Закирьянов И.Г., Постникова О.В. Позднедарривильское биогермообразование в ордовике Сибирской платформы (опорный разрез реки Мойеро) // Всероссийская научная конференция «Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (Литол 2025)» (г. Москва, 1–5 апреля 2025 г.), 2025.
28. Миронов И.К., Кафтан В.И., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. Деформации в окрестности Авачинского вулкана по данным ГНСС с 2015 по 2025 гг. // 10 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (г. Петропавловск-Камчатский, 28 сентября – 04 октября 2025 г.), 2025.
29. Миронов И.К., Кафтан В.И., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана с 2015 по 2023 гг. // XXVIII Ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога. Вулканизм и связанные с ним процессы (г. Петропавловск-Камчатский, 24–29 марта 2025 г.), 2025.
30. Морозов А.Н., Асминг В.Э., Фёдоров И.С. Сейсмичность восточного сектора Российской Арктики за инструментальный периоднаблюдений // IV Всероссийская научная конференция «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, 22–23 октября 2025 г.), 2025.
31. Побединский Г.Г., Кафтан В.И., Еруков С.В. Метрологическое обеспечение средств и методов измерения больших расстояний на основе пунктов ФАГС и эталонных геодезических полигонов // XII международный симпозиум «Метрология времени и пространства» (г. Нижний Новгород, 24–26 сентября 2025 г.), 2025.
32. Ростовцева Ю.В. Миоценовые органогенные постройки Средиземноморья и Восточного Паратетиса: общий обзор // Всероссийское литологическое совещание «ГЕОЛОГИЯ РИФОВ – 2025» (г. Сыктывкар, 23–25 июня 2025 г.), 2025.
33. Сальная Н.В., Ростовцева Ю.В., Коиава К.П., Кудашин А.С. Магнитостратиграфические исследования среднемиоценовых пород разреза Уджарма (Восточная Грузия): предварительные результаты // Всероссийская школа-конференция «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» (г. Казань, 31 марта – 4 апреля 2025 г.), 2025.
34. Сальная Н.В., Ростовцева Ю.В., Пилипенко О.В. Проблемы датирования миоценовых пород Восточного Паратетиса с помощью палеомагнитного метода: к вопросу первичности естественной остаточной намагниченности // Всероссийская научная конференция «Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (Литол 2025)» (г. Москва, 1–5 апреля 2025 г.), 2025.
35. Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Крылова Т.А., Книппер Н.И. Накопление геофизических данных и формирование баз данных в российских мировых центрах данных // Всероссийская конференция «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (г. Санкт-Петербург, 5–6 июня 2025 г.), 2025.
36. Слободянюк А.О., Лебедев С.А. Моделирование влияния ориентации доминантной волны на параметры отраженного альтиметрического импульса // 23-я международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (г. Москва, 10–14 ноября 2025 г.), 2025.

37. Соловьев А.А. Математические методы оценки опасного воздействия космической погоды на промышленные системы // Международная конференция «Методы и модели системного анализа для изучения, прогнозирования и оценки рисков наводнений и других стихийных бедствий» (г. Астана, Казахстан, 10–11 июня 2025 г.), 2025.
38. Соловьев А.А. О мировом опыте и практике в ликвидации последствий крушения судов с наличием нефти и/или нефтепродуктов на борту // Заседание Научно-технического совета Минтранса России по вопросам научно-технологического развития транспортной отрасли (г. Москва, 30 января 2025 г.), 2025.
39. Соловьев А.А. Современные математические методы в решении некоторых задач геомагнетизма с использованием наземных и спутниковых наблюдений // Третья конференция «Геофизика и Математика» (г. Екатеринбург, 6–8 ноября 2025 г.), 2025.
40. Татаринов В.Н. Захоронение высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях: проблемы и пути решения // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2025. LVI (56) Тектоническое совещание (г. Москва, 27 января – 1 февраля 2025 г.), 2025.
41. Kaban M., Chen B., Gvishiani A., Soloviev A., Sidorov R. Variations of the effective elastic thickness of the lithosphere suggest a broad diffusive boundary between the North American and Eurasian plates in Siberia // EGU General Assembly 2025, Vienna, AustriaEGU General Assembly 2025 (Vienna, Austria, 27 April – 2 May 2025), 2025.
42. Kaban M.K., Sidorov R.V., Tesauro M., Soloviev A.A., Gvishiani A.D. An integrative model of the lithosphere of Northeastern Eurasia // IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly 2025 (Lisbon, Portugal, 31 August – 5 September 2025), 2025.
43. Kaban M.K., Tesauro M., Soloviev A.A., Gvishiani A.D. An integrative 3D model of the lithosphere and upper mantle of Asia // TopoAsia International Workshop (Shanghai, China, 19–26 October, 2025), 2025.
44. Krasnoperov R.I. Geomagnetic observatory network in Russia and near-abroad countries // Workshop of SANSA Space Science Division (Hermanus, South Africa, 12–13 February, 2025), 2025.
45. Kudin D.V. Geomagnetic data analysis // Workshop of SANSA Space Science Division (Hermanus, South Africa, 12–13 February, 2025), 2025.
46. Lisenkov I.A., Soloviev A.A. Analysis of Geological and Geophysical Data in the Eastern Russian Arctic Using Machine Learning Techniques // EGU General Assembly 2025, Vienna, AustriaEGU General Assembly 2025 (Vienna, Austria, 27 April – 2 May 2025), 2025.
47. Sheremet I.A. AI for Natural Sciences: Multiset-Based Modelling of Complex Chemical Reactions // 2025 World Digital Education Conference (Wuhan, China, 14–17 May 2025), 2025.
48. Sidorov R., Soloviev A., Bogoutdinov S. A 6-year quasi-periodicity in the Earth's core magnetic field dynamics from 1932 to 2022 // EGU General Assembly 2025, Vienna, AustriaEGU General Assembly 2025 (Vienna, Austria, 27 April – 2 May 2025), 2025.
49. Soloviev A.A. GC RAS activities in geomagnetism // Workshop of SANSA Space Science Division (Hermanus, South Africa, 12–13 February, 2025), 2025.
50. Soloviev A., Kudin D., Vorobev A. Identification of geomagnetic disturbances in near-Earth space from satellite observations during the magnetic storm on March 8–9, 1970 // IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly 2025 (Lisbon, Portugal, 31 August – 5 September 2025), 2025.
51. Tesauro M., Kaban M.K., Youssof M. Unraveling the upper mantle heterogeneities of the South African Cratonic Region using Seismic and Gravity data // IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly 2025 (Lisbon, Portugal, 31 August – 5 September 2025), 2025.

Статьи в сборниках трудов конференций

1. Бадулин С.И., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Попов А.П. Каспийское море как природная лаборатория для исследований морского волнения. // Сборник материалов Тринадцатой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.). - М.: ИКИ РАН, 2025 - С. 40. EDN: KZUOPF
2. Бочаров А.В., Гречушникова М.Г., Биденко С.И., Лебедев С.А., Григорьева И.Л. Оценка площади водного зеркала Иваньковского водохранилища на основе данных Sentinel-2. // Сборник материалов Тринадцатой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.). - М.: ИКИ РАН, 2025 - С. 37-39. EDN: IOQGLB
3. Бочаров А.В., Гречушникова М.Г., Биденко С.И., Лебедев С.А., Григорьева И.Л. Установление фактической площади Иваньковского Водохранилища. // Труды XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)» (г. Тверь, 28 октября – 01 ноября 2024). – Тверь: ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», 2025. – С. 134–137. EDN: JSALNH
4. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А. Межсезонные вариации точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным спутников Landsat Level-2. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 50–52. EDN: DRUPNX
5. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А. Сезонная изменчивость точности определения температуры поверхности воды Каспийского моря по данным Landsat. // Сборник материалов Тринадцатой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.). – М.: ИКИ РАН, 2025 – С. 35–36. EDN: SAAZBC
6. Бочаров А.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Коломеец Л.И. Анализ сценарных оценок температуры воздуха в регионе Каспийского моря по данным модели CNRM-CM6-1-HR. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 53–56. EDN: DRUPNX
7. Докукин П.А., Кафтан В.И. Применение синоптических анимаций для прогноза мест сильных землетрясений по данным ГНСС наблюдений. // Сборник трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, 22–23 октября 2025 г.). - М.: ИТПЗ РАН, 2025. – С. 64–65.
8. Докукин П.А., Кафтан В.И., Мельников А.Ю. Эволюция ДВС земной коры в районе острова Тайвань в связи с сейсмичностью 2014–2024 гг. (по данным ГНСС-наблюдений). // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2025. Материалы LVI Тектонического совещания. - М.: ГЕОС, 2025. - С. 169-176. DOI: 10.34756/GEOS.2025.17.39149. EDN: HVQQVN
9. Камаев А.А. Перспективы использования спектральных данных дистанционного зондирования для геологического картирования редкоземельных элементов. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 154–158. EDN: DRUPNX

10. Кочубей К.А. Идентификация геодинамически активных зон Центрального Кавказа с применением ГИС-технологий. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 219–221. EDN: DRUPNX
11. Кафтан В.И., Маневич А.И. Влияние катастрофических землетрясений Караманмараш (Турция, февраль 2023 г.) на скорости движения станций ГНСС кавказского региона. // «Геофорум. Нижний Новгород». Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Н. Новгород: Межрегиональная общественная организация «Российское общество геодезии, картографии и землеустройства». – 2025. – С. 27–32. EDN: BEYHBZ
12. Кафтан В.И., Мельников А.Ю., Докукин П.А. Оценка опасности возникновения мега-землетрясения в районе желоба Нанкай (Япония) по данным ГНСС-наблюдений. // Сборник трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, 22–23 октября 2025 г.). – М.: ИТПЗ РАН, 2025. – С. 74–75.
13. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия – основы метода и приложения в науках о Земле. // Сборник материалов Тринадцатой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли» ИКИ РАН (г. Таруса, 23–27 мая 2025 г.). - М.: ИКИ РАН, 2025 - С. 19. EDN: OGSYDC
14. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Продвижение паводка реки Волга по акватории Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 246–249. EDN: DRUPNX
15. Лебедев С.А., Костяной А.Г., Костяная Е.А., Бочаров А.В. Волновой климат Баренцева моря по данным спутниковой альтиметрии. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (г. Майкоп, Республика Адыгея, 12–16 мая 2025 г.). – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2025. – С. 243–245. EDN: DRUPNX
16. Лыков Н.А., Ростовцева Ю.В., Дронов А.В., Закирьянов И.Г., Постникова О.В. Позднедарривильское биогермообразование в ордовике Сибирской платформы (опорный разрез реки Мойеро). // Материалы Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов (Литол 2025)». – М.: ГЕОС, 2025. – С. 155–159. DOI: 10.34756/GEOS.2025.17.39204. EDN: IUJBZH
17. Миронов И.К., Кафтан В.И., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Магуськин В.М. Современные движения и деформации земной коры в окрестности Авачинского вулкана с 2015 по 2023 гг. // Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Вулканизм и связанные с ним процессы (г. Петропавловск-Камчатский, 24–29 марта 2025 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2025. – С. 203–206. EDN: PSLWKJ
18. Сальная Н.В., Ростовцева Ю.В., Пилипенко О.В. Проблемы датирования миоценовых пород Восточного Паратетиса с помощью палеомагнитного метода: к вопросу первичности естественной остаточной намагниченности. // Материалы Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и

карбонатных комплексов (Литол 2025)». – М.: ГЕОС, 2025. – С. 230-232. DOI: 10.34756/GEOS.2025.17.39204. EDN: SBFHHZ

19. Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Крылова Т.А., Книппер Н.И. Накопление геофизических данных и формирование баз данных в российских Мировых центрах данных // Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита: коллективная монография / под ред. В.Г. Бондура, Г.И. Долгих, А.А. Родионова. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2025. – С. 46–48.
20. Kudryavtsev N., Safonova V., Frolov I., Kudin D. On the use of Modern IoT and AI Technologies in the «Smart Forest» System. // Materials of 2025 IEEE 26 th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (Altai, 27 June 2025 – 01 July 2025). – USA: IEEE, 2025.
21. Rostovtseva Y., Koiava K., Odintsova A., Rybkina A. (2025) Secondary Alterations in Upper Miocene Tuffs of Eastern Georgia. // Çiner, A., et al. Recent Research on Sedimentology, Stratigraphy, Paleontology, Tectonics, Geochemistry, Volcanology and Petroleum Geology. MedGU 2023. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-87558-8_26
22. Sapunov V.A., Muravyev L.A., Denisov A.Y., Sergeev A.V., Narkhov E.D., Fedorov A.L., Soloviev A.A., Khomutov S.Y., Borodin P.B., Nasyrtdinov B.M., Belyakov D.I., Turbin Y.G., Bondarev E.I. Pos-4 vector Overhauser magnetometer: results at magnetic observatories and development prospects as an alternative to DI-Flux // Proceedings of the XXth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing (Vassouras, Brazil, 31 October – 6 November, 2024). – Rio de Janeiro, Brazil: Obs. Nacional, 2025. P. 115–120. DOI: 10.29327/1737054

Данные

1. Dokukin P.A., Kaftan V.I., Titkov N.N., Chebrov D.V. Five-year evolution of regional seismicity and deficit of internal crustal displacements according to GNSS data in connection with the Kamchatka megathrust earthquake of 2025 // Earth Science DataBase, 2025.
2. Dokukin P.A., Kaftan V.I., Titkov N.N., Chebrov D.V. Five-year evolution of regional seismicity and horizontal dilatation according to GNSS data in connection with the Kamchatka megathrust earthquake of 2025 // Earth Science DataBase, 2025.
3. Dokukin P.A., Kaftan V.I., Titkov N.N., Chebrov D.V. Five-year evolution of regional seismicity and total shear strain to GNSS data in connection with the Kamchatka megathrust earthquake of 2025 // Earth Science DataBase, 2025.

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

Программы для ЭВМ

1. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Полиномиальный градиентный спуск для решения СЛАУ с учетом дополнительнойнечетко формализованной информации / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694515 от 5 декабря 2025 г.
2. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Полиномиальный покоординатный спуск для решения СЛАУ с учетом дополнительной нечетко формализованной информации / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694665 от 8 декабря 2025 г.
3. Акматов Д.Ж., Татаринов В.Н., Габышев Д.Н. Программа для вычисления градиента потенциальной энергии деформаций и напряжений геологической среды / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680484 от 6 августа 2025 г.
4. Гаврилова А.А., Маневич А.И. Веб-сервис мониторинга выбросов эмитентов метана в среде Google Earth Engine / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025680386 от 5 августа 2025 г.
5. Гетманов В.Г., Добровольский М.Н. Программа вычисления аномалий в наблюдениях мюонного годоскопа УРАГАН, нейтронных мониторов и функций Dst-индекса для диагностики геомагнитных бурь / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694020 от 3 декабря 2025 г.
6. Кочубей К.А., Камаев А.А., Лосев И.В., Нанов М.И. Программа для вычисления и визуализации градиентных морфометрических параметров рельефа в среде Google Earth Engine / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025681633 от 15 августа 2025 г.
7. Кудин Д.В., Катков В.Ю. Программа расчета распределения геомагнитных бурь / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693987 от 3 декабря 2025 г.
8. Маневич А.И., Кочубей К.А., Камаев А.А., Лосев И.В. Программа для расчета и визуализации градиентов геополей растровых данных GeoTIFF / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025681636 от 15 августа 2025 г.
9. Нанов М.И., Кудин Д.В. Веб-сервис доступа к историческим данным Мирового центра данных по солнечно-земной физике 2.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693667 от 1 декабря 2025 г.
10. Нанов М.И., Кудин Д.В. Программа для конвертации данных исторических магнитных наблюдений / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693666 от 1 декабря 2025 г.
11. Нанов М.И., Кудин Д.В. Программа для определения компонент аномального магнитного поля Земли. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693664 от 1 декабря 2025 г.
12. Нанов М.И., Кудин Д.В. Программа для оценки точности карт и моделей аномального магнитного поля Земли. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693172 от 26 ноября 2025 г.
13. Нанов М.И., Кудин Д.В. Программа для получения выборки из базы данных исторических магнитных наблюдений / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693104 от 26 ноября 2025 г.

14. Николова Ю.И., Соловьев А.А., Красноперов Р.И. Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695203 от 10 декабря 2025 г.
15. Сидоров Р.В., Сергеев В.Н. Конвертер данных магнитных измерений в формат, совместимый с программнымобеспечением GEMLink / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693886 от 2 декабря 2025 г.
16. Федоров Н.Н., Вейс Д., Лосев И.В. Программа автоматизированного определения параметров ветровой нагрузки и построения розы ветров при проектировании горных предприятий / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683225 от 2 сентября 2025 г.
17. Федоров Н.Н., Маневич А.И. Программа построения профиля взрывной воронки выемочного блока горных пород / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683173 от 2 сентября 2025 г.
18. Шевалдышева О.О., Кабан М.К. Программа расчета гравитационного эффекта сферического слоя / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695319 от 10 декабря 2025 г.
19. Шевалдышева О.О., Кабан М.К. Программа расчета температуры и плотности по скоростям сейсмических волн / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695237 от 10 декабря 2025 г.

Базы данных

1. Самохина О.О., Бояршинов Г.С., Боровская Т.Е. База сферических визуализаций: Антропосфера. Техносфера / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625683 от 3 декабря 2025 г.
2. Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Книппер Н.И., Крылова Т.А. Землетрясения в Дальневосточной сейсмоактивной зоне, 1957–1961 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623438 от 21 августа 2025 г.
3. Соловьев А.А., Кудин Д.В., Красноперов Р.И. База данных коэффициентов разложения полного магнитного поля Земли на эпоху 2025 / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621128 от 13 марта 2025 г.