

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 института за 2020 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 2020  
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 2020. 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) and the Russian Foundation for Basic Research (RFBR). 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 2020.

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 16.04.2021

Layout Production:

E. O. Kedrov

<https://doi.org/10.2205/2021BS055>

<http://ebooks.wdcb.ru/2021/2021BS055/2021BS055.pdf>

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2021), Report of Geophysical Center RAS for 2020. Results of Scientific Research and International Projects, Geoinf. Res. Papers, Vol. 9, No. 1, BS9001, <https://doi.org/10.2205/2021BS055>

M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 2021, 169 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2021 Geophysical Center RAS



В настоящем издании содержатся сведения о научной деятельности Геофизического центра Российской академии наук в 2020 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) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). 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 2020 г.

Ответственные редакторы:

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

Р. И. Краснощёков, учёный секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

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

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Утверждено к печати 16.04.2021 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

<https://doi.org/10.2205/2021BS055>

<http://ebooks.wdcb.ru/2021/2021BS055/2021BS055.pdf>

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснощёков (ред.) (2021) Отчет о деятельности института за 2020 год. Результаты научных исследований и международных проектов. М.: Исследования по геоинформатике, т. 8, №1 (BS9001), <https://doi.org/10.2205/2021BS055>

М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 2020, 169 с.

ISSN 2308-5983

© ГЦ РАН, 2021



## Содержание

Содержание .....	5
1 Научная деятельность ГЦ РАН.....	6
2 Разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии.....	19
3 Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства.....	34
4 Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных.....	50
5 Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений .....	70
6 Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы .....	85
7 Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа .....	98
8 Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов .....	108
9 Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса .....	120
10 Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности.....	129
11 Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС .....	138
12 Международная деятельность ГЦ РАН в 2020 году .....	151
13 Деятельность Национального геофизического комитета РАН.....	154
Список основных научных публикаций за 2020 г.....	158
Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН.....	168



## 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 2020 г. была сосредоточена на выполнении государственного задания № 075-01077-20-01, утвержденного 17 февраля 2020 г.

Исследования проводились по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ «6. Рациональное природопользование» в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.:

Раздел IX. «Науки о Земле»:

– Подраздел 138 «Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии)».

Согласно государственному заданию в ГЦ РАН проводились фундаментальные исследования по 4 темам НИР:

- 1 Тема НИР: «Разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии»

Системный №	0145-2019-0001
РН НИОКТР №	AAAA-A19-119032090069-8
Структурное подразделение:	Лаборатория геодинамики
Руководитель:	д.т.н. Татаринов В. Н.

- 2 Тема НИР: «Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства»

Системный №	0145-2019-0003
РН НИОКТР №	AAAA-A19-119032090070-4
Структурное подразделение:	Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований
Руководитель:	чл.-корр. РАН Соловьёв А. А.



- 3 Тема НИР: «Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных»
- Системный № 0145-2019-0004  
РН НИОКТР № АААА-А19-119032090068-1  
Структурное подразделение: Лаборатория геофизических данных;  
Лаборатория электронных публикаций;  
Лаборатория инновационных проектов  
Руководитель: к.ф.-м.н. Дзедобов Б. А.
- 4 Тема НИР: «Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений»
- Системный № 0124-2019-0006  
РН НИОКТР № АААА-А19-119101590122-8  
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Лаборатория геодинамики  
Руководитель: к.ф.-м.н. Сидоров Р. В.

## 1.2 Проекты научных фондов

В 2020 г. в ГЦ РАН выполнялись работы по **2** грантам РФФИ и **5** грантам РНФ:

- 1 Грант РФФИ № 19-55-80021 БРИКС\_т: «Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС»
- РН НИОКТР № АААА-А20-120061690061-2  
Руководитель: академик Бондур В. Г.
- 2 Грант РФФИ № 20-35-70054: «Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности»
- РН НИОКТР № АААА-А20-120012090122-8  
Руководитель: к.ф.-м.н. Дзедобов Б. А.
- 3 Грант РНФ № 16-17-00121-П: «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»
- РН НИОКТР № АААА-А16-116030110009-6  
Руководитель: д.ф.-м.н. Пилипенко В. А.
- 4 Грант РНФ № 17-17-01215: «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа»
- РН НИОКТР № АААА-А18-118021990128-8  
Руководитель: чл.-корр. РАН Соловьёв А. А.



- 5 Грант РФФИ № 17-77-20034: «Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации»  
РНИОКТР № АААА-А18-118021990123-3  
Руководитель: к.ф.-м.н. Краснопёров Р. И.
- 6 Грант РФФИ № 18-17-00241: «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»  
РНИОКТР № АААА-А18-118091090066-5  
Руководитель: академик Гвишиани А. Д.
- 7 Грант РФФИ № 19-77-10075: «Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса»  
РНИОКТР № АААА-А19-119082190032-6  
Руководитель: к.г.-м.н. Рыбкина А. И.

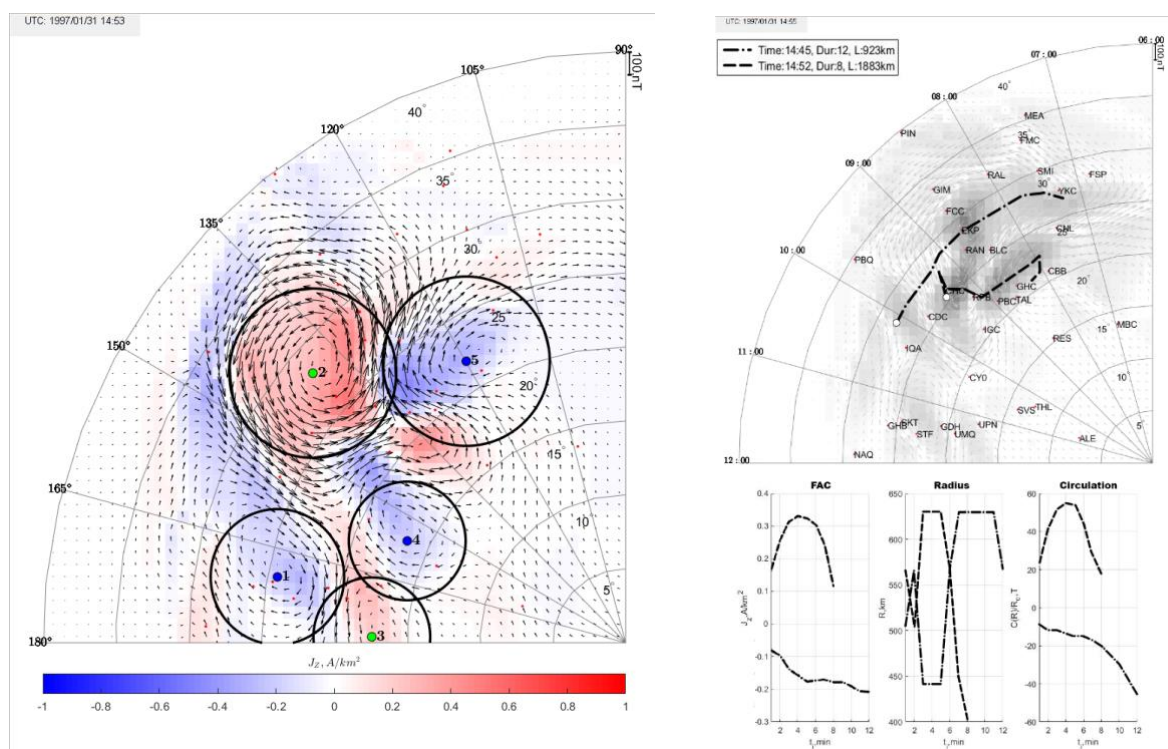
### 1.3 Важнейшие результаты фундаментальных научных исследований

#### **Выделение вихревых токовых структур в полярной ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным**

*Чинкин В. Е., чл.-корр. РАН Соловьёв А. А., д.ф.-м.н. Пилипенко В. А.*

*(Тема НИР «Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства»)*

Была предложена автоматизированная система обнаружения вихревых токовых структур в полярной ионосфере по данным высокоширотной сети геомагнитных станций. Реконструируемое при этом магнитное векторное поле является потенциальным, а векторное поле эквивалентного ионосферного тока – бездивергентным. Разработанный подход не только дает возможность автоматически находить несколько вихревых структур, но и численно определять текущие значения их динамических параметров: пространственную структуру продольных токов (положение центра и размер вихревого образования), траекторию и групповую скорость горизонтального распространения вихря вдоль ионосферы, а также направление, интенсивность продольного тока и циркуляцию тока по радиусу вихря. Предложенные алгоритмы могут быть широко использованы исследователями в области солнечно-земной физики и геофизики для автоматического выделения локальных экстремальных возмущений геомагнитного поля, которые могут быть ответственны за всплески геоиндуцированных токов в энергетических системах (рис. 1.1).



**Рисунок 1.1 – Пример выделения дневных конвективных вихревых структур 31 января 1997 г. 14:53 UT: отображение плоского скорректированного векторного поля эквивалентного ионосферного тока  $J$  и величины плотности продольного тока  $J_z$  (отмечена цветом). Направлению вихря по часовой стрелке соответствует втекающий ток  $j_z < 0$ , направлению против часовой стрелки – вытекающий ток  $j_z > 0$ ; направление на Солнце – слева. Справа – траектории движения центров двух вихрей и их динамические характеристики: плотность продольного тока, радиус и циркуляция**

Чинкин В. Е., Соловьёв А. А., Пилипенко В. А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным // Геомагнетизм и аэрономия, 2020, Т.60, №5, С.588–599, DOI: 10.31857/S001679402005003X

Chinkin V. E., Soloviev A. A., Pilipenko V. A. et al., Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2021, Vol.212, 105514, DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105514

## Новая модель осадочного чехла территории юга Восточно-Европейской платформы и Предкавказья по данным декомпенсационных аномалий силы тяжести

Академик Гвишиани А. Д., д.ф.-м.н. Кабан М. К., к.ф.-м.н. Краснощёв Р. И., к.ф.-м.н. Сидоров Р. В., Оценко А. А.

(Тема НИР «Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений»)

Разработана новая модель плотности и мощности осадочного чехла в обширном регионе на стыке южной части Восточно-Европейской платформы, Предкавказья и некоторых прилегающих к югу структур, которые ограничены Альпийско-Средиземноморским складчатым поясом. В этом регионе исследовались строение и плотность осадочных бассейнов. Для исследования применен подход, основанный на декомпенсационных аномалиях силы тяжести. В отличие от обычных изостатических аномалий или аномалий Буге, декомпенсационная коррекция снижает влияние глубоких гравитирующих масс, обеспечивая компенсацию приповерхностных аномалий плотности. На основе новой уточненной модели (рис. 1.2) осадочного чехла возможно указать потенциальные области для дальнейших детальных исследований не только в фундаментальных целях, но и для поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.

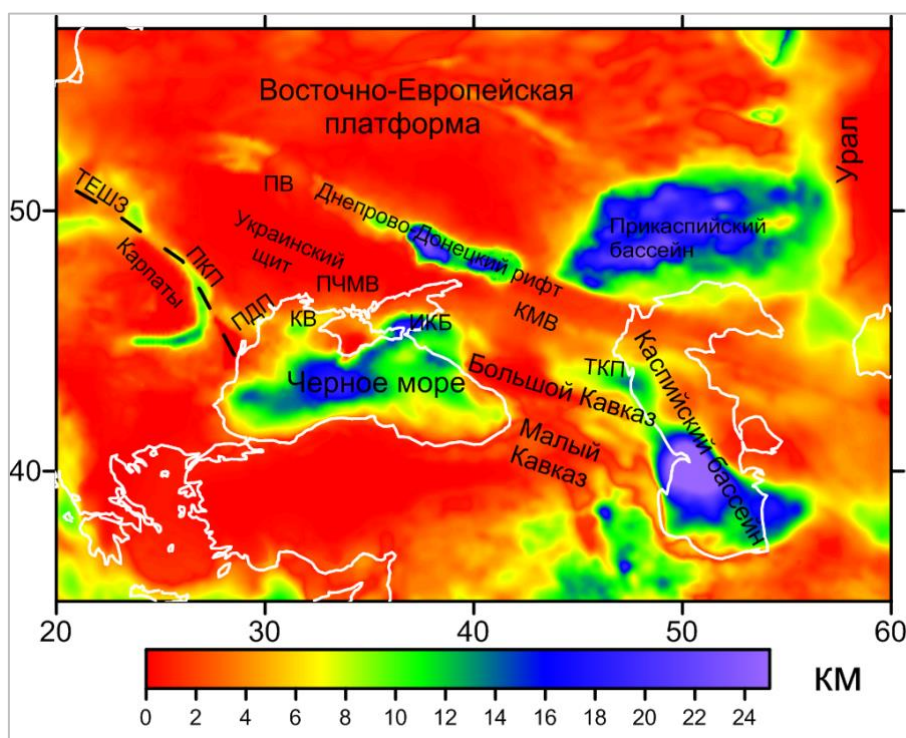


Рисунок 1.2 – Модель мощности осадочного чехла



*Kaban M., Gvishiani A., Sidorov R., Oshchenko A., Krasnoperov R. Structure and density of sedimentary basins in the southern part of the East-European platform and surrounding area // Applied Sciences, 2021, Vol. 11, No. 2, PP. 1–16, DOI: 10.3390/app11020512*

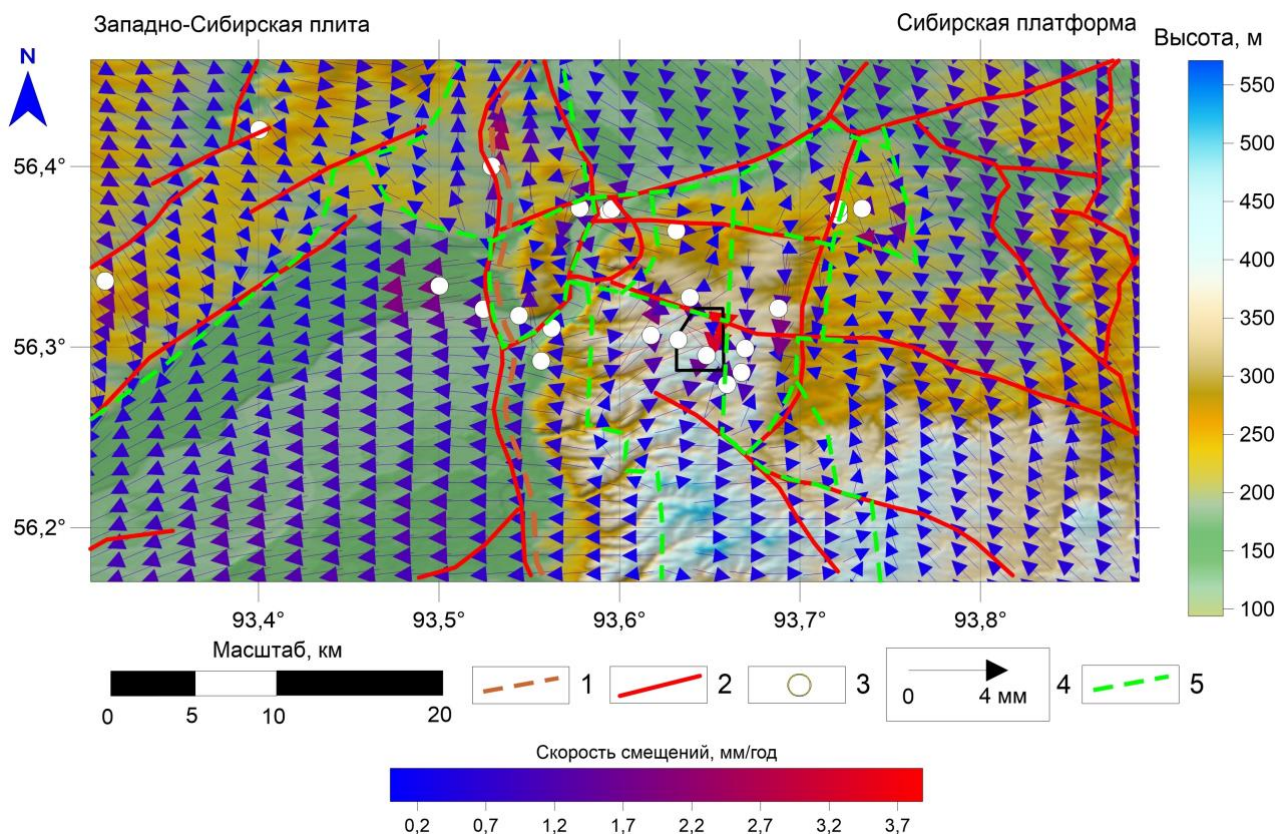
**Структурно-кинематическая модель блоковых движений в южной части  
Енисейского кряжа по результатам ГНСС-наблюдений**

*Академик Гвишиани А. Д., д.т.н. Кафтан В. И., д.т.н. Татаринов В. Н., к.ф.-м.н.  
Дзедобов Б. А., н.с. Маневич А. И., м.н.с. Лосев И. В.*

*(Грант РНФ № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на  
основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной  
подземной изоляции радиоактивных отходов»)*

На основе системного анализа данных ГНСС-наблюдений выполнен расчет средних скоростей современных горизонтальных движений земной коры и построена структурно-кинематическая модель блоковых движений в южной части Енисейского кряжа на контакте Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы. Основой для обработки данных ГНСС-измерений и их интерпретации стали векторы базовых линий и их корреляционные матрицы, полученные в результате статической обработки и диагностического уравнивания многолетних наблюдений с 2010 по 2020 гг., включая две экспедиции, выполненные в рамках проекта РНФ в 2019–2020 гг. Модель использована при разработке рекомендаций по оценке геодинамической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива (рис. 1.3).

*Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзедобов Б. А., Лосев И. В.  
Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части  
Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Академии наук. Науки о  
Земле. 2020, Т. 493, №1, с.73–77. DOI: 10.31857/S2686739720070075*



**Рисунок 1.3 – Поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы; 3 – ГНСС-пункты; 4 – векторы скоростей СДЗК ГНСС-пунктов, мм/год; 5 – активные геодинамические зоны и разломы**

#### **Формирование коллекции уникальных данных измерений магнитного поля, выполненных ранними советскими спутниковыми миссиями**

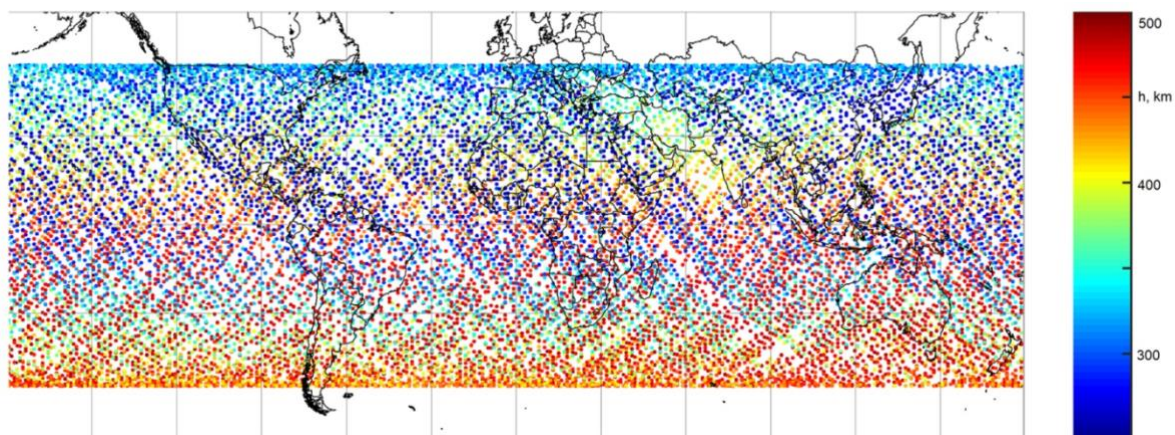
Чл.-корр. РАН Соловьёв А. А., к.ф.-м.н. Краснощёков Р. И., к.ф.-м.н. Дзедобов Б. А., к.ф.-м.н. Сергеева Н. А., к.ф.-м.н. Перегудов Д. В., Книппер Н. И., к.т.н. Кудин Д. В.

(Тема НИР «Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных»)

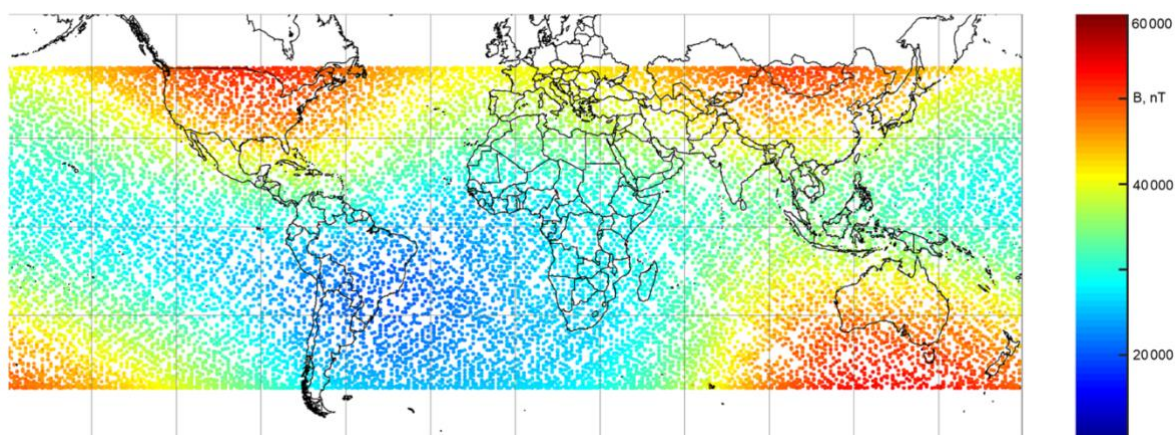
Воспроизведена и опубликована коллекция абсолютных измерений магнитного поля, выполненных ранними советскими геофизическими спутниками «Космос-49» (1964 г.) и «Космос-321» (1970 г.). Всего для миссии «Космос-49» доступно 17 300 измеренных значений, которые равномерно покрывают 75% поверхности Земли между 49° северной и южной широты (рис. 1.4). Для «Космос-321» доступно около 5 000 измеренных значений, которые равномерно покрывают 94% поверхности Земли между 71° северной и южной широты. Полеты космических аппаратов «Космос-49» и «Космос-321» позволили получить уникальные данные о пространственном распределении



напряженности магнитного поля Земли практически на всей поверхности планеты (рис. 1.5). Сравнение полученных данных позволило с высокой точностью определить вековой ход магнитного поля Земли за период 1965–1970 гг. Уникальность воспроизведенных данных подчеркивается тем, что практически отсутствуют более старые и общедоступные глобальные спутниковые данные о магнитном поле Земли.



**Рисунок 1.4 – Положения измерений спутника «Космос-49». Цветом показана высота в км**



**Рисунок 1.5 – Карта распределения напряженности магнитного поля, измеренной космическим аппаратом «Космос-49»**

*Krasnoperov R., Peregoudov D., Lukianova R., Soloviev A., Dzeboev B. Early Soviet satellite magnetic field measurements in the years 1964 and 1970 // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. Is. 1. P. 555–561. DOI: 10.5194/essd-12-555-2020. (Q1 WoS / Q1 Scopus)*

*Krasnoperov R., Peregoudov D., Lukianova R., Soloviev A., Dzeboev B. Early soviet satellite magnetic field measurements from 1964 and 1970. PANGAEA. 2020. DOI: 10.1594/PANGAEA.907927.*



**Усовершенствованная методика анализа современных движений и деформаций земной поверхности в зоне активных тектонических нарушений по данным ГНСС-наблюдений**

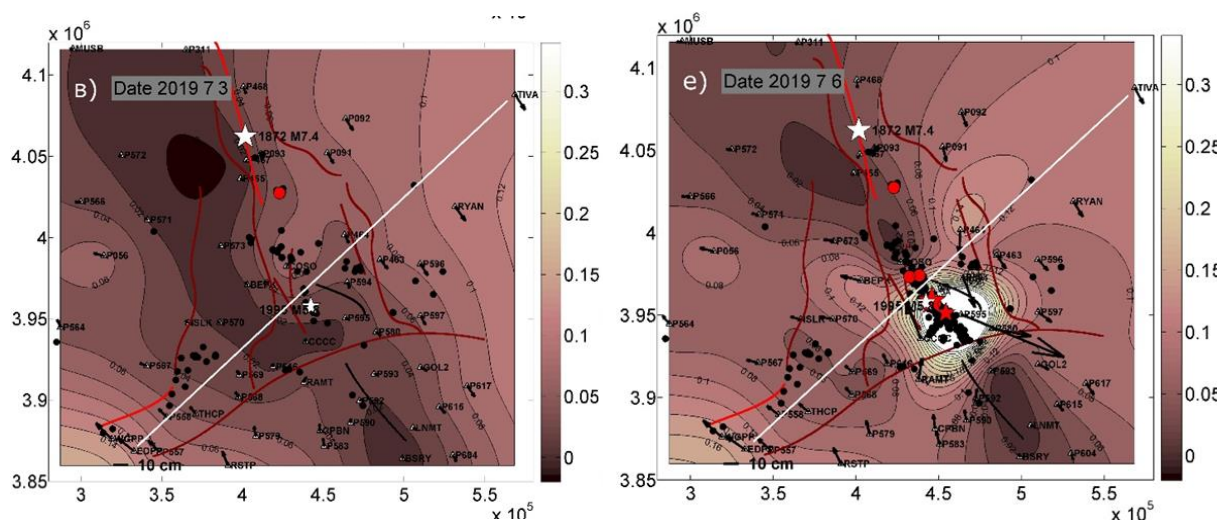
*Д.т.н. Кафтан В. И.*

*(Тема НИР «Разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии»)*

Представлена новая методика анализа современных движений и деформаций земной поверхности в зоне активных тектонических нарушений по данным ГНСС-наблюдений. Методика используется для выявления аномальных зон перед землетрясениями. Анализируя скорость и направления разнонаправленных движений в сейсмически опасных районах, исследователи могут изучать особенности их накопления перед сильными сейсмическими событиями, а также во время и после.

Эффективность применения нефиксированной локальной координатной системы отсчета доказана в нескольких опубликованных примерах развития деформационного процесса в районах, где произошли сильные сейсмические события. На рисунке показан один из примеров – вытянутая зона минимальных относительных смещений земной поверхности в области подготовки серии землетрясений Риджкрест 2019 г. (Калифорния) (рис. 1.6). Результаты демонстрируют возможности методики более четко выявлять важные особенности движений земной поверхности в местах сильных землетрясений и прогнозировать их наиболее вероятные места. Одним из важных ее прогностических преимуществ перед глобальными и региональными решениями – возможность обнаружения запертых неподвижных зон, образующихся перед сильными землетрясениями и являющимися прогнозным признаком таковых.

*Кафтан В. И. Миграция деформации земной поверхности, как триггер серии землетрясений Риджкрест (июль 2019 г.) // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5–9 октября 2020 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2020. С. 439–445.*



**Рисунок 1.6 – Эволюция зоны минимальных смещений в процессе подготовки и разрядки серии Риджкрест 2019 г. Область минимальных смещений показана темно-коричневым цветом, максимальных – белым. Красные окружности и звезды – эпицентры умеренных и сильных сейсмических событий. Белые звезды – эпицентры исторических крупных и сильных сейсмических событий**

#### **1.4 Защита диссертаций. Аспирантура. Академические достижения сотрудников**

24 сентября 2020 г. в ИФЗ РАН состоялась предварительная защита диссертационной работы заведующего лабораторией геофизических данных ГЦ РАН к.ф.-м.н. Б. А. Дзедоева на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Тема диссертации: «Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений». Научным консультантом работы выступил научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани. Работа принята к защите на диссертационном совете ИФЗ РАН в 2021 г.

С 1 февраля по 18 марта 2020 м.н.с. И. А. Фирсов прошел стажировку в Датском техническом университете (DTU). С ноября 2020 г. является аспирантом Университета Гренобля в Альпах (ISTerre, UGA). Обучение проводится при финансовой поддержке французского Национального центра космических исследований (CNES).

М.н.с. В. Е. Чинкин был награжден Дипломом лауреата II степени за научный доклад на молодёжной конференции школы-семинара ИФЗ РАН и Университета «Сириус» «Аппроксимационные подходы и анализ геофизических данных» (13–18 июля 2020 г.) и занял I место на конкурсе научных докладов на конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (28–29 октября 2020 г.).



### 1.5 Договорная деятельность

- 1 Договор на выполнение НИР: «Изучение геодинамического режима района расположения подземной исследовательской лаборатории для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО» (Заказчик: *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН*).
- 2 Договор на выполнение НИР: «Разработка предложений по включению средств геомагнитных наблюдений в перспективную глобальную систему мониторинга геодезических параметров Земли» (Заказчик: *АО «ЦНИИмаш» ГК «Роскосмос»*).
- 3 Договор на выполнение ОКР: «Разработка АПК со сферическим демонстрационным экраном для визуализации геопространственных данных с диаметром экрана не менее 1 метра» (Заказчик: *Казанский (Приволжский) федеральный университет*).
- 4 Договор оказания услуг: «Разработка АПК со сферическим демонстрационным экраном для визуализации геопространственных данных с диаметром экрана 100 см под управлением ПО ORBUS 2.0» (Заказчик: *Казанское суворовское военное училище*).

### 1.6 Экспедиции и полевые работы

Несмотря на ограничения, вызванные пандемией COVID-19, в 2020 г. сотрудники ГЦ РАН приняли участие в целом ряде экспедиций и выезжали на научные полевые работы. Среди прочих следует выделить:

- Магнитная обсерватория «Климовская», Архангельская обл. (январь) (вед. инж. А. А. Груднев, с.н.с. Д. В. Кудин, н.с. А. И. Маневич, с.н.с. Р. В. Сидоров). Технические работы. Перезапуск ГНСС-приемника. Эвакуация дублирующего вариометра FGE.
- Магнитная обсерватория «Гюлагарак», Республика Армения (февраль–апрель) (вед. инж. А. А. Груднев, с.н.с. Д. В. Кудин, н.с. М. В. Нисилевич, с.н.с. Р. В. Сидоров). Технические работы. Установка вариометра FGE. Организация передачи данных в ГЦ РАН. Проведение абсолютных наблюдений. Обучение персонала проведению магнитных наблюдений.
- Магнитная обсерватория «Казань», Республика Татарстан (февраль) (вед. инж. А. А. Груднев). Площадная магнитная съемка территории обсерватории с помощью БПЛА.





- Таманский и Керченский п-ова, Краснодарский край и Республика Крым (август–сентябрь) (с.н.с. А. С. Кудашин, техник С. М. Меркулов, н.с. А. А. Одинцова, н.с. О. В. Пилипенко, в.н.с. Ю. В. Ростовцева, зам. дир., в.н.с. А. И. Рыбкина, инж. А. Ю. Рылова, м.н.с. Н. В. Сальная). Геологическая экспедиция по исследованию процессов осадконакопления Восточного и Центрального Паратетиса.
- Железногорск, Красноярский край (сентябрь) (м.н.с. И. В. Лосев, н.с. А. И. Маневич). Экспедиция на железнорогский геодинамический полигон для проведения геодезических и геодинамических изысканий.
- Магнитная обсерватория «Белое море», Республика Карелия (октябрь) (вед. инж. А. А. Груднев, в.н.с. Р. И. Краснопоёров, с.н.с. Д. В. Кудин). Технические работы. Площадная магнитная съёмка территории обсерватории для определения мест, пригодных для возведения новых павильонов.

### 1.7 Популяризация науки

В 2020 г. ГЦ РАН вел активную работу в сфере популяризации и широкого распространения научного знания.

- Весной 2020 г. в «Вестнике ОНЗ РАН» была опубликована серия интервью с известными российскими учёными, которая была посвящена аспектам влияния пандемии COVID-19 на жизнь общества (<https://onznews.wdcb.ru/covid-19.html>). В серии интервью приняли участие: академики РАН Э. М. Галимов, А. Д. Гвишиани, Л. А. Вайсберг, М. В. Флинт, Р. И. Нигматулин, К. Е. Дегтярёв, А. О. Глико и член-корреспонденты РАН П. Н. Шебалин, Ан. А. Соловьёв, Ю. М. Батурин, И. Е. Фролов и Ф. В. Каминский.
- Директор ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв, научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани и научный сотрудник А. А. Одинцова приняли участие в документальном фильме «7 главных тайн огня» проекта «Засекреченные списки» телеканала «РЕН ТВ» (фрагменты: <https://youtu.be/aS6vjnKO9do>).
- В ходе визита в Сахалинский государственный институт (СахГУ) в составе делегации РАН научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани выступил с интервью порталу «Научная Россия». (<https://scientificrussia.ru/articles/zachem-nablyudat-za-magnitnym-polem-zemli-akademik-ran-a-gvishiani>).
- Зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев дал комментарии для документального фильма «Подземная угроза» из цикла «Угрозы современного мира» телеканала



«Наука 2.0» (<https://youtu.be/Q7Y2TtvoRJE>), а также телеканалу «5-TV» по поводу землетрясения в Чечне 14 декабря 2020 г. (<https://www.5-tv.ru/player/323802>).

- 9 октября 2020 г. в рамках всероссийского фестиваля науки НАУКА 0+ ГЦ РАН в формате видеоконференции была организована научно-популярная лекция «Путешествие к планетам Солнечной системы».

## 2 Разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии

Номер темы в ИСГЗ: 0145-2019-0001

Номер регистрации: АААА-А19-119032090069-8

Руководитель: зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринов

Ответственные исполнители: д.т.н. В. Н. Морозов, д.т.н. В. И. Кафтан,  
д.ф.-м.н. И. Ю. Колесников, н.с. А. И. Маневич

### 2.1 Совершенствование методики измерения современных движений и деформаций земной поверхности в зоне активных тектонических нарушений

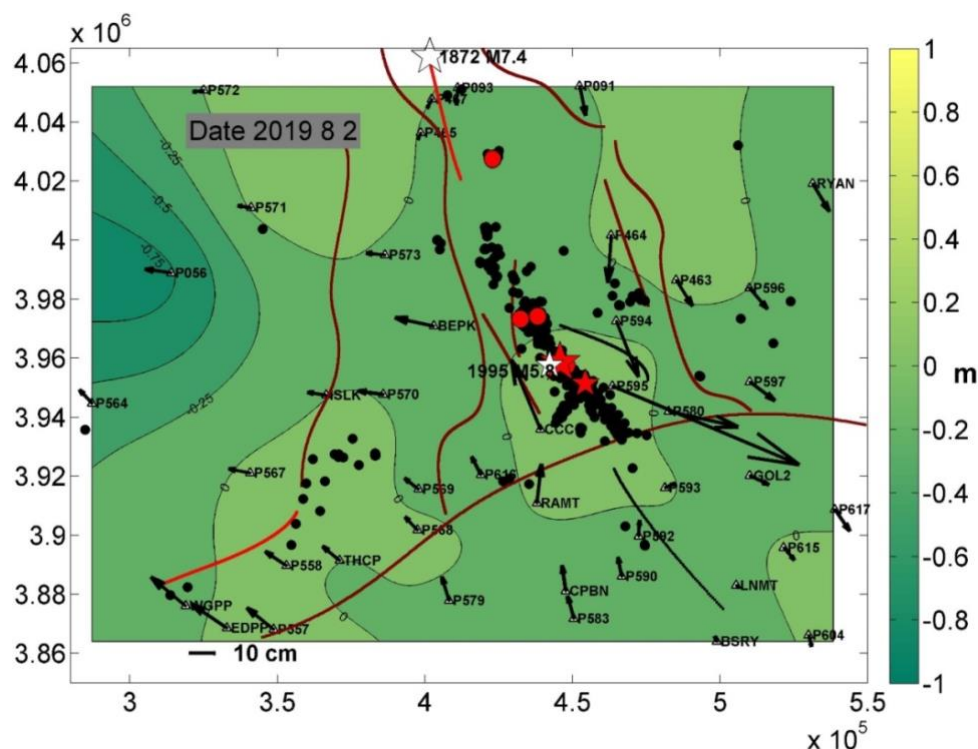
Важнейшим элементом обработки ГНСС-измерений является выбор и пространственная *фиксация координатной системы отсчета*. Для определения координат и скоростей движений в этой системе отчета достаточно привязать ГНСС-сеть к станциям, входящим в глобальную реализацию этой системы отсчета International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Но такой подход не оправдан для локальных полигонов объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Локальные ГНСС-измерения всегда точнее глобальных. Глобальные решения также содержат в себе геофизические модели, например, параметры движения полюса, земного и океанического приливов, которые вносят ошибки, неоправданно отягощающие локальные решения. При использовании глобального решения мы рискуем пропустить важные геодинамические события низкого ранга, маскируемые перемещениями тектонических плит. Устранение этого недостатка явилось предметом совершенствования методики определения движений и деформаций в районах локальных тектонических нарушений, включая районы ОИАЭ.

Определение смещений пунктов локальных геодинамических сетей осуществляется по методике обработки разностей повторных ГНСС-измерений [Кафтан и др., 2019]. Для определения компонент движений геодезических пунктов из уравнивания геодезических сетей широко применяется аппарат обобщенно обратных матриц  $A^+$ , иначе именуемых g-обратными [Разумов, 1981]. В этой связи методика была модифицирована путем введения в алгоритм решения обобщенно обратной матрицы. Векторы пространственных смещений  $dx$  с оценкой их точности получают из решения

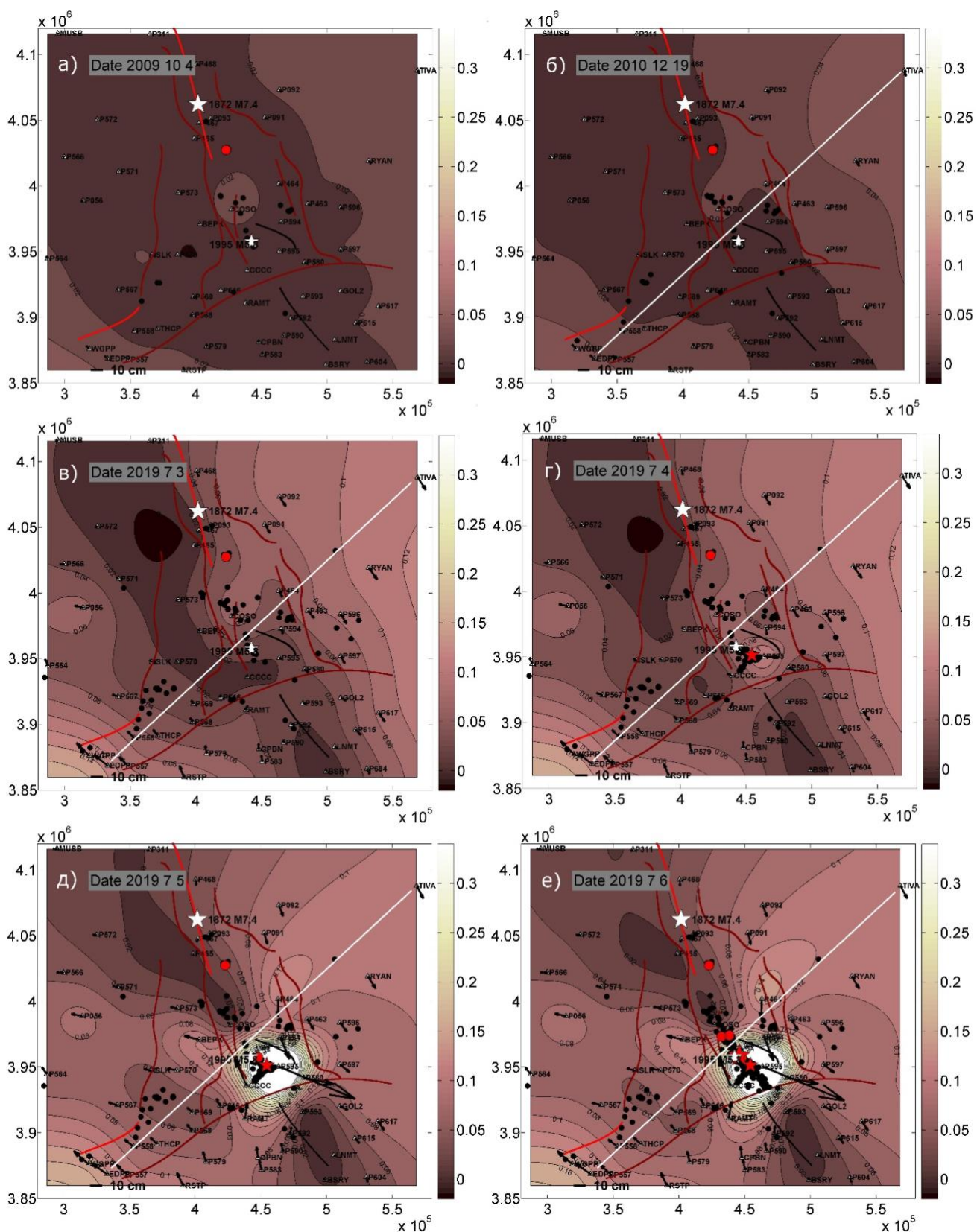
$$dx = -(A^T Q_l^{-1} A)^+ A^T Q^{-1} l = -Q_{dx}^+ L \quad (2.1)$$

Заметим, что на определение тензора горизонтальной деформации, дилатации и сдвига, псевдообращение не влияет, так как эти характеристики являются инвариантными по отношению к выбору конкретной прямоугольной координатной системы отсчета.

С использованием методики были обработаны ГНСС-данные по ряду тектонически активных районов, например в работе [Кафтан и др., 2020] представлены результаты ее использования для землетрясения Риджкrest в Калифорнии. Рис. 2.1 демонстрирует взаимные перемещения бортов разломных зон Калифорнии, в связи с этим землетрясением. Разнонаправленный характер движений обеспечивает важную информацию для изучения механизма образования сейсморазрывов в зоне контакта глобальных тектонических плит.







**Рисунок 2.2 – Эволюция зоны минимальных смещений в процессе подготовки и разрядки серии Риджкрест 2019 г. Область минимальных смещений показана тёмно-коричневым цветом, максимальных – белым. Красные окружности и звезды – эпицентры умеренных и сильных сейсмических событий. Белые звезды – эпицентры исторических крупных и сильных сейсмических событий**



На рис. 2.2 приведена зона минимальных относительных смещений земной поверхности в области подготовки серии землетрясений Риджкрест в 2019 г. Из рис. 2.2 б видно, что за сутки до главного толчка в будущей эпицентральной и афтершоковой зоне сформировалась область минимальной подвижности земной поверхности.

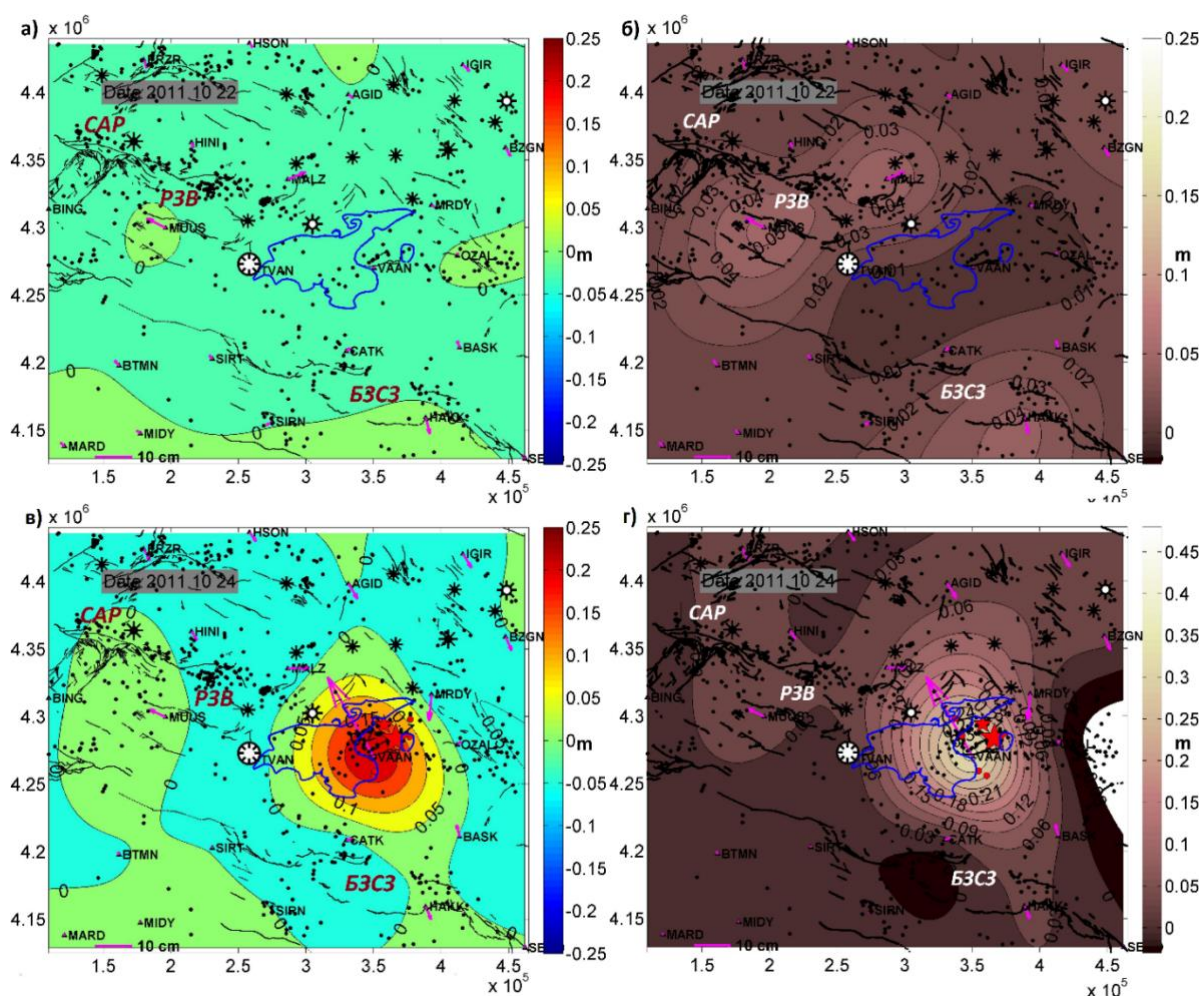
Подобная запертая область, соответствующая области длительного сейсмического затишья, обнаружена также и перед землетрясением Ван (Турция, 2011 г.) (рис. 2.3).

При выборе мест для размещения ОИАЭ необходима оценка геодинамической и сейсмической опасности. Разломная тектоника, тектонические напряжения и сейсмичность района являются определяющими факторами, которые обуславливают устойчивость геологической среды на разных масштабных уровнях. Поэтому методика представляется полезной, как с позиции понимания развития сейсмотектонического процесса, так и для проведения микросейсмического районирования участков подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов, в частности в приложении к Нижнеканскому массиву. Ограничиваясь этими выводами, ее практической проверкой полученных результатов могла бы стать постановка детальных ГНСС-наблюдений на территории Нижнеканского массива.

## **2.2 Исследование развития тектонического процесса в зонах активного орогенеза, включая сейсмически активные районы и площадки размещения ОИАЭ**

Разломная тектоника, тектонические напряжения и сейсмичность района являются определяющими факторами, которые обуславливают устойчивость геологической среды на разных масштабных уровнях в районах расположения ОИАЭ. В 2020 г. были продолжены исследования по разработке методологии математического моделирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) в районах эпицентральных зон неглубоких ( $H \sim 10\text{--}20$  км) коровых землетрясений с  $M > 6$ . Было исследовано землетрясение, которое произошло 17 августа 1999 года в Турции с  $M_w 7,4$ . Эпицентр находился в районе г. Измит ( $40^\circ 42'$  с. ш.  $29^\circ 59'$  в. д., глубина очага 13–18 км). Методика моделирования НДС блочных гетерогенных массивов, нарушенных тектоническими разломами изложена в наших работах [Morozov, 2016; 2018].

Ранее была выявлена тенденция локализации эпицентров коровых землетрясений  $M 6\text{--}6,8$  в зонах аномально высокой интенсивности напряжений. При этом эпицентр главного толчка находился в области аномального высокого отношения главного напряжения к напряжению отпора, как правило  $\sigma_{\max}/\sigma_{\min} > 6$  при фоновом значении равного 3.



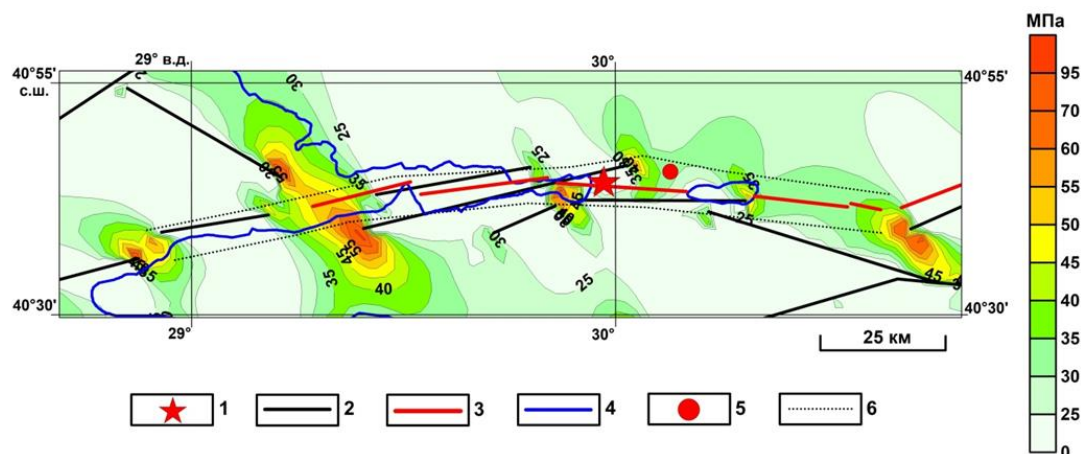
**Рисунок 2.3 – Векторы горизонтальных и изолинии вертикальных движений землетрясения Ван (Турция, 2011 г., (левая колонка). Зоны минимальных смещений (правая колонка)**

На рис. 2.4 приведена карта интенсивности напряжений («вековых» тектонических напряжений) в районе до момента образования разрыва. Можно видеть, что в локальных областях, как правило, в окончании разломов возникают зоны аномально высокой интенсивности напряжений  $\sigma_i$  ( $\sigma_i^2$  пропорциональна накопленной потенциальной энергии деформации). В эпицентре напряжения  $\sigma_{xx}$  меняют знак, переходя в положительные напряжения растяжения. Можно предположить возможность более высокой вероятности образования разрыва в этой зоне в рамках модели Кулона-Мора. На рис. 2.5 приведена карта отношения  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$ , где отрицательные значения отношения соответствуют реализации положительных напряжений растяжения  $\sigma_{xx}$ .

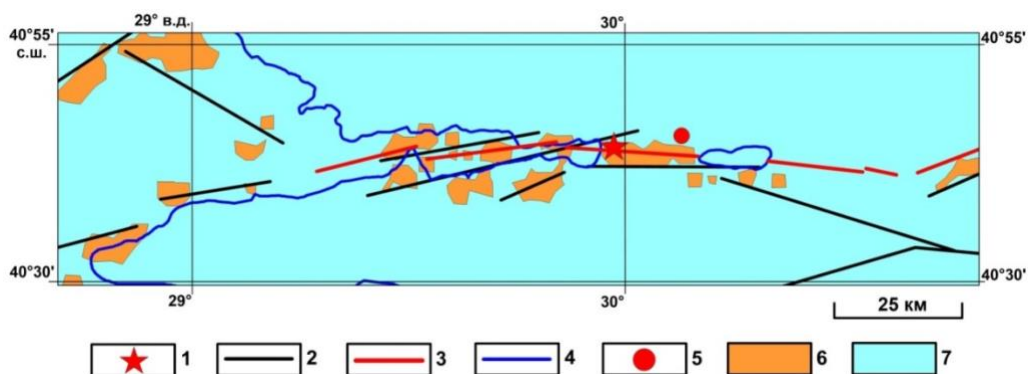




В эпицентре интенсивность напряжений достигает  $\sim 70$  МПа, при этом  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$  меняет знак, т.е. положительные напряжения  $\sigma_{xx}$  образуют цепочку аномальных зон, вытянутых в широтном направлении. Тогда в рамках ретроспективного прогноза можно было бы ожидать возникновения разрыва именно в этой области и его распространения на запад и восток в зоны аномально высокой интенсивности напряжений.

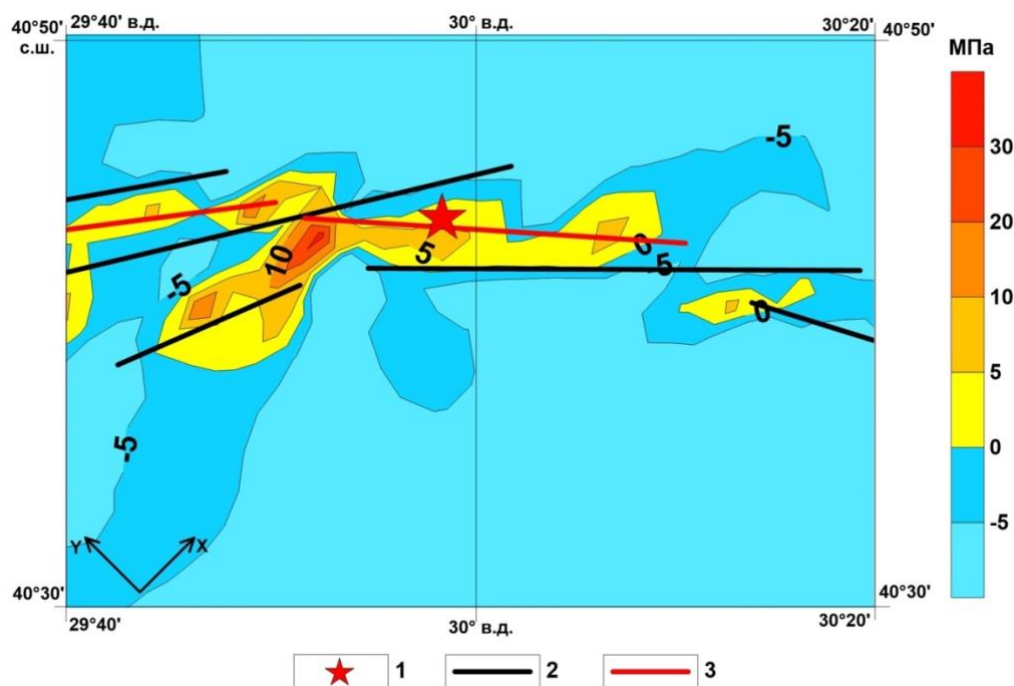


**Рисунок 2.4 – Карта интенсивности  $\sigma_i$  напряжений в эпицентральной зоне Измитского землетрясения до момента главного толчка: 1 – эпицентр; 2 – тектонические разломы; 3 – положение нового разрыва; 4 – границы водных поверхностей (залив и озера); 5 – сильный афтершок землетрясения, М 6,2; 6 – зона ретроспективного прогноза возможного распространения разрыва**



**Рисунок 2.5 – Карта локализации положительных напряжений  $\sigma_{xx}$  (напряжений растяжения) до момента образования разрыва: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – тектонические разломы; 3 – положение нового разрыва; 4 – границы водных поверхностей; 5 – сильный афтершок Измитского землетрясения, М 6,2; 6 – области положительных напряжений  $\sigma_{xx}$ ; 7 – области отрицательных напряжений  $\sigma_{xx}$**

На рис. 2.6 показана детализация положительных напряжений растяжения  $\sigma_{xx}$  в области эпицентра главного толчка. Видно, что эпицентр попадает в область положительных напряжений  $\sigma_{xx}$  и из этой области распространяется новый разрыв.



**Рисунок 2.6 – Карта напряжений  $\sigma_{xx}$  в эпицентральной области до момента главного толчка: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – тектонические разломы; 3 – положение нового разрыва на поверхности**

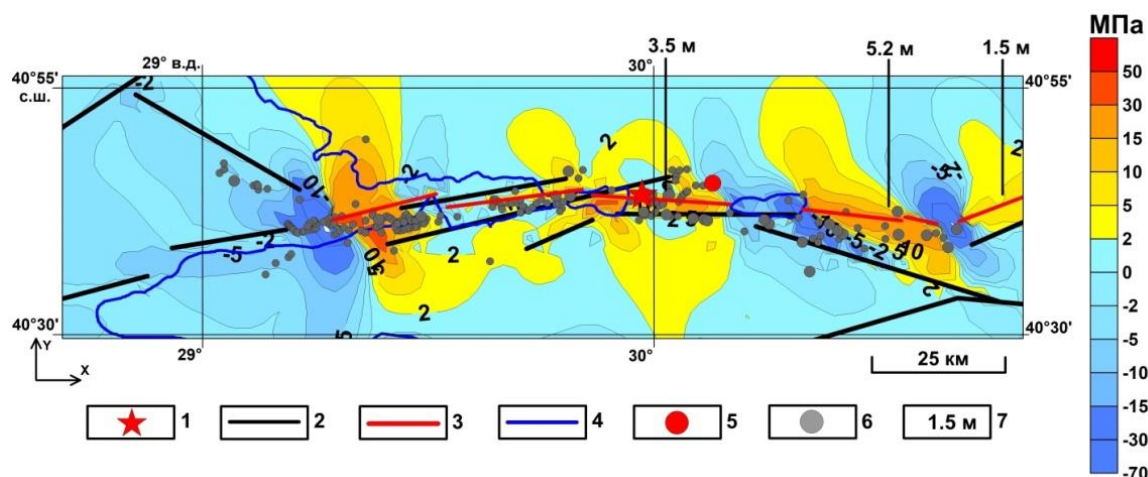
Результаты дают основание предположить, что разрыв из области гипоцентра распространяется на запад и на восток, пересекая области высокой интенсивности напряжений, коррелируя и с аномально высокими значениями отношения  $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} > 4-6$ , переходящие в напряжения растяжения. Частичный сброс напряжений в области нового разрыва запускает афтершоковый процесс в зонах ранее накопленных «вековых» (статических) тектонических напряжений. Он захватывает протяженную зону длиной порядка 170 км с локализацией гипоцентров афтершоков в интервале глубин 5–20 км от поверхности. Логично предположить, что разрыв, стартуя из гипоцентра на глубине 18 км, реализуется в собственной зоне высокой концентрации напряжений (в реальных условиях устремляясь к поверхности), стимулируя дальнейший автомодельный процесс соединения зон аномально высокой интенсивности напряжений в направлении его распространения по латерали. В то же время просматривается тенденция локализации кластеров афтершоков в зонах, где  $\sigma_{xx}/\sigma_{yy}$  превышает фоновые значения, достигая 6 и выше. Это значит, что в гипоцентрах афтершоков разрыв возникает при относительно высоких напряжениях  $\sigma_{yy}$  и низких значениях напряжений отпора, переходящих в напряжения растяжения, т.е. в условиях оптимальных для формирования разрыва в виде сдвига.

Образовавшийся разрыв протяженностью порядка  $\sim 170$  км снимает накопленные «вековые» статические напряжения в зоне своего влияния. Наиболее интенсивен этот

процесс в локальных зонах высокой интенсивности напряжений, предшествующих землетрясению, т.е. в кластерах с высокой плотностью афтершоков. На рис. 2.7 показана карта разности интенсивности напряжений, рассчитанная по формуле:

$$\Delta\sigma_i = |\sigma_i|_I - |\sigma_i|_{II}, \quad (2.2)$$

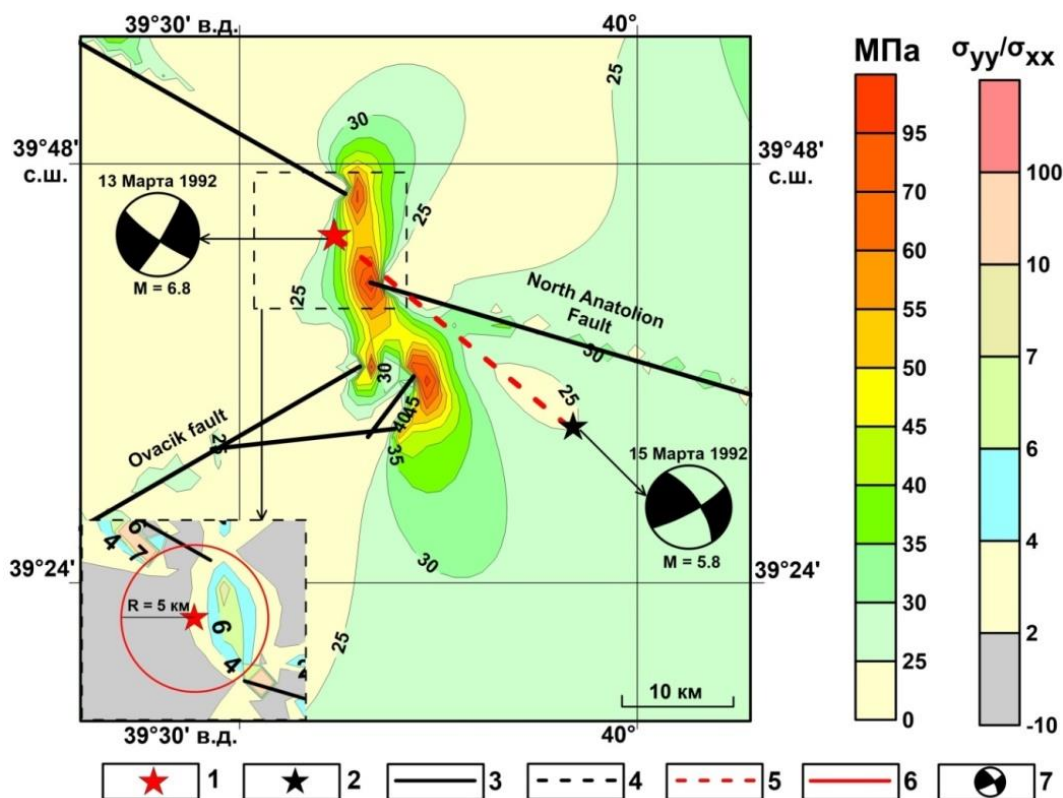
где  $\langle\sigma_i\rangle_I$  и  $\langle\sigma_i\rangle_{II}$  – интенсивность напряжений в произвольной точке до и после образования разрыва соответственно.



**Рисунок 2.7 – Карта разности интенсивности напряжений  $\Delta\sigma_i$  до и после Измитского землетрясения, с использованием данных: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – тектонические разломы; 3 – положение нового разрыва; 4 – границы водных поверхностей (залив и озера); 5 – сильный афтершок землетрясения, М 6,2; 6 – афтершоки, зарегистрированные в первые 12 часов после землетрясения; 7 – максимальные смещения земной поверхности**

Выделяются 4 зоны сброшенной интенсивности напряжений, и две зоны западнее от него соответствуют зонам обнаруженных трещин и поверхностных разрывов по разлому до 5 м.

Обратим внимание на аналогичную ситуацию, предшествующую Эрзиканскому землетрясению 13.03.1992 М 6,9 на востоке Северо-Анатолийского разлома. На рис. 2.8 приведена карта интенсивности напряжений в эпицентральной зоне момента землетрясения и приведены новые результаты расчета отношения главных действующих напряжений. Можно видеть, что эпицентр главного толчка локализован в зоне высокой интенсивности и аномального отношения главных действующих напряжений (учитывая возможные ошибки в определении как координат эпицентра  $\pm 2-5$  км, так и положение окончаний тектонических разломов).



**Рисунок 2.8 – Карта интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и отношения главных напряжений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$  в зоне Эрзиканского землетрясения до главного толчка):**  
**1 – эпицентр землетрясения 13.03.1992 М 6,9; 2 – сильный афтершок, М 5,8;**  
**3 – тектонические разломы; 4 – область, для которой приведены отношения главных напряжений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$ ; 5 – новый разрыв; 6 – область расположения эпицентра очага; 7 – механизмы очагов землетрясения и его сильного афтершока**

Результаты моделирования являются подтверждением предположения М. В. Гзовского, что разрыв при землетрясении распространяется через области «первоначально повышенных напряжений участков земной коры». В рамках дилатантно-диффузионной модели разрыв зарождается в области концентрации упругих напряжений там, где разность главных тектонических напряжений (девиаторная часть тензора напряжений) возрастает, а, следовательно, возрастает отношение главных напряжений сжатия при последующей трансформации напряжений отпора в напряжения растяжения.

### **2.3 Нейросетевое моделирование поля скоростей горизонтальных движений в местах расположения ОИАЭ по данным ГНСС-наблюдений (на примере Нижнеканского массива)**

Современные движения земной коры (СДЗК) являются одним из видов опасности, которая может привести к негативным геоэкологическим последствиям для окружающей среды в районах расположения ОИАЭ. В 2018 году в Красноярском крае начато



строительство первого на территории РФ пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (ПГЗРО). Для наблюдения за СДЗК были заложены геодезические пункты, предназначенные для проведения измерений ГНСС-методами [Татаринов, 2018].

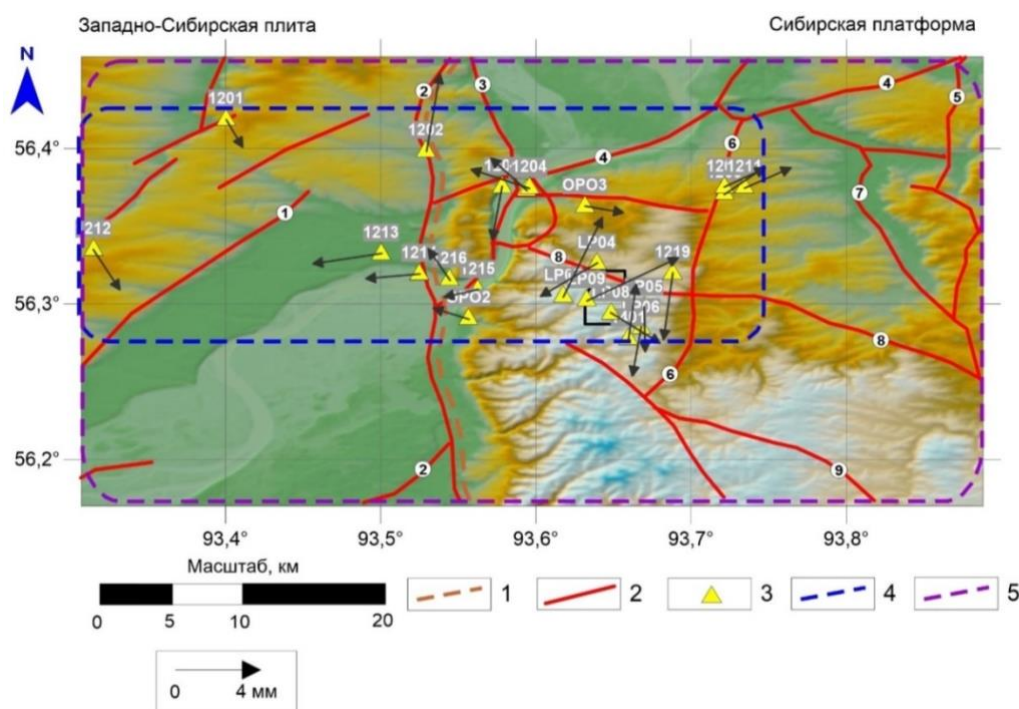
На рис. 2.8 приведена схема точек пунктов сети наблюдений в 2020 году, выделена область контура используемой геодезической сети (фиолетовая линия) и область, на площади которой необходима оценка движений и деформаций земной коры (синяя линия). Из-за сложных местных физико-географических условий около 2/3 всей территории находится вне контура измерительной сети, и соответственно для этой области невозможно получить значения движений и деформаций земной поверхности. В связи с этим перед деформационным анализом данных необходимо получить значения скоростей и смещений в узлы регулярной сети. Для этого необходимо экстраполировать исходные данные для получения регулярных сеточных данных.

Для пространственной экстраполяции данных были применены искусственные нейронные сети. Данный алгоритм представляет собой слоевую систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (нейронов). Каждый нейрон сети имеет дело только с сигналами, которые он получает, и сигналами, которые он посылает другим нейронам. Будучи соединёнными в достаточно большую сеть такие по отдельности простые нейроны вместе способны выполнять довольно сложные задачи. У сети имеются взаимосвязи между нейронами, и сила этих взаимосвязей выражена определёнными весовыми коэффициентами. Полная матрица таких весовых коэффициентов и входных и выходных сигналов нейронов, по сути, и является решающим аппаратом этого метода.

Структура нейронной сети была выбрана следующая – 5 нейронов в скрытом слое (2 скрытых слоя), 1 нейрон выходного слоя (рис. 2.10). Т.к. смещение может принимать и положительные и отрицательные значения, в качестве функции активации был выбран гиперболический тангенс.

Метрики для оценки качества результатов прогнозов алгоритма были выбраны следующие. Средний модуль отклонения (MAE – Mean Absolute Error) показывает среднее абсолютное отклонение прогнозируемых смещений от истинных. Применение именно абсолютного отклонения обусловлено тем, что значения смещений могут быть как положительными, так и отрицательными. MAE определяется по формуле 2.3:





**Рисунок 2.9 – Схема геодинамического полигона. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные разломы; 3 – ГНСС-пункты; 4 – контур сети; 5 – область, где требуется прогноз. Основные тектонические разломы: 1 – Первый Красноярский разлом; 2 – Муратовский разлом; 3 – Атамановский разлом; 4 – Канско-Атамановский разлом; 5 – Малотельский разлом; 6 – Правобережный разлом; 7 – Большетельский разлом; 8 – Шумихинский разлом; 9 – Байкальский разлом**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i - a_i| \quad (2.3)$$

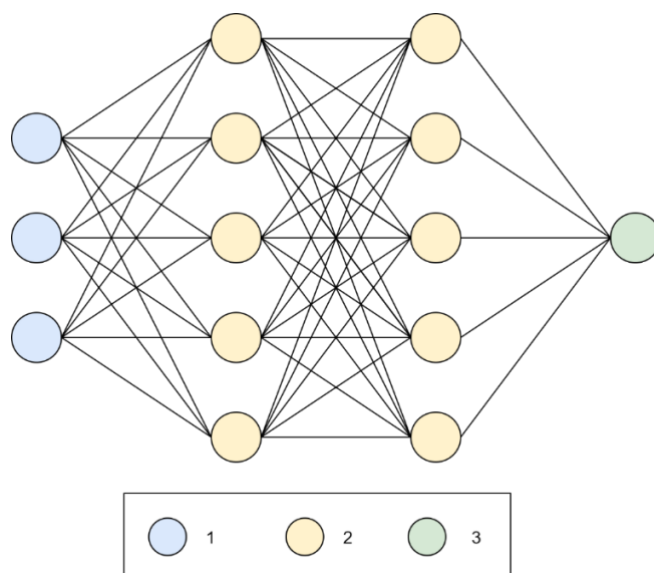
где  $n$  – количество точек в используемой выборке (обучающей, тестовой, контрольной);

$U_i$  – значение измеренного смещения;  $a_i$  – значение спрогнозированного смещения.

Сумма модулей отклонения (SAE – Sum Absolute Error) показывает суммарное абсолютное отклонение прогнозируемых смещений от истинных. Дает возможность оценить интегральную накапливаемую ошибку прогноза для всех точек измерений. SAE определяется по формуле 2.4:

$$SAE = \sum_{i=1}^n |U_i - a_i| \quad (2.4)$$

где  $U_i$  – значение измеренного смещения;  $a_i$  – значение спрогнозированного смещения.



**Рисунок 2.10 – Структура искусственной нейронной сети. 1 – нейроны входного слоя; 2 – нейроны скрытых слоев; 3 – нейрон выходного слоя**

Кроме количественной оценки смещений алгоритму крайне важно точно распознавать знак смещения (отрицательный или положительный). Для оценки качества данного аспекта используются метрики точности (ассигасу) определяемая по формуле 2.5. Данная оценка строится на основе матриц ошибок (табл. 2.1).

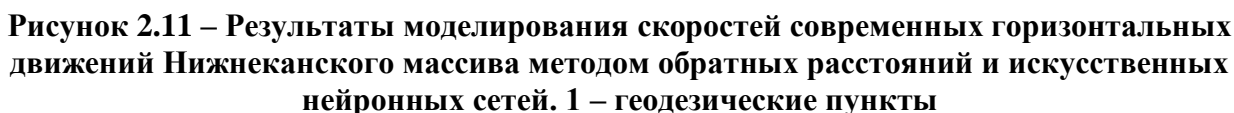
$$accuracy = \frac{TP+FN}{TP+FP+FN+TN} \quad (2.5)$$

Таблица 2.1 – Матрица ошибок

	$a = 1$	$a = 0$
$\hat{a} = 1$	True Positive (TP)	False Positive (FP)
$\hat{a} = 0$	False Negative (FN)	True Negative (TN)

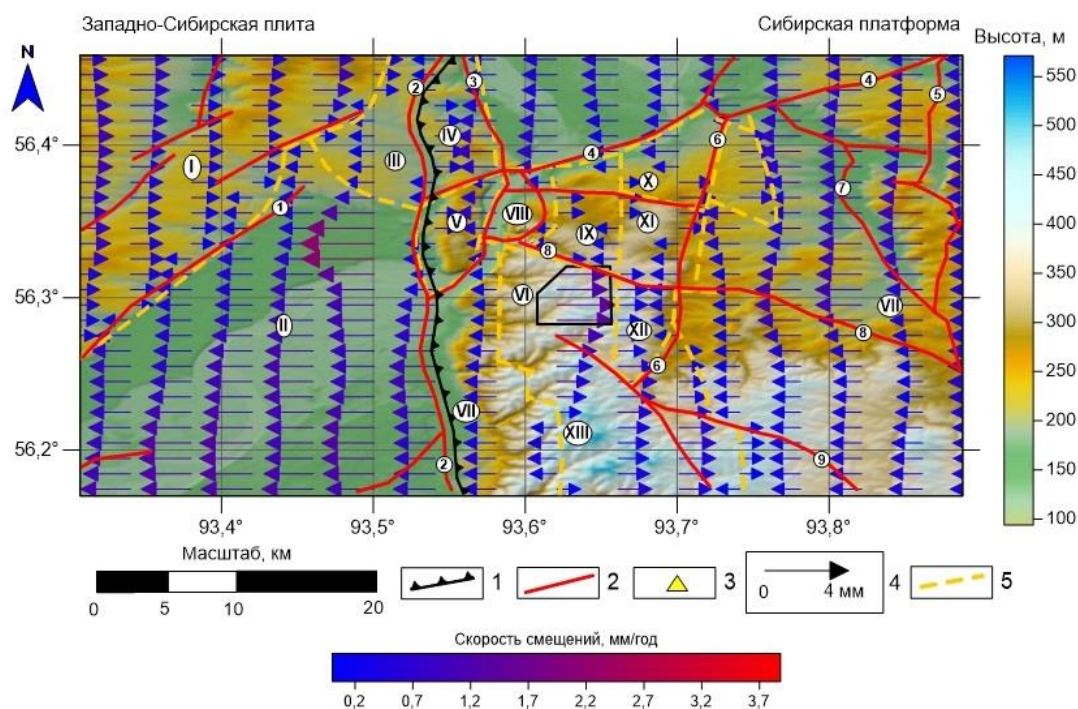
$a$  – истинная метка знака смещения,  $\hat{a}$  – прогнозируемое значение

На рис. 2.11 приведена иллюстрация интерполяции и экстраполяции исходных данных скоростей горизонтальных движений  $V_e$ . Интерполяция выполнялась методом обратных расстояний, экстраполяция методом искусственных нейронных сетей. На рисунке наглядно видна разница в количестве получаемых данных. Нейросетевая экстраполяция позволяет получать данные для южной части изучаемой территории, где находится большое количество местных и крупных региональных тектонических структур.

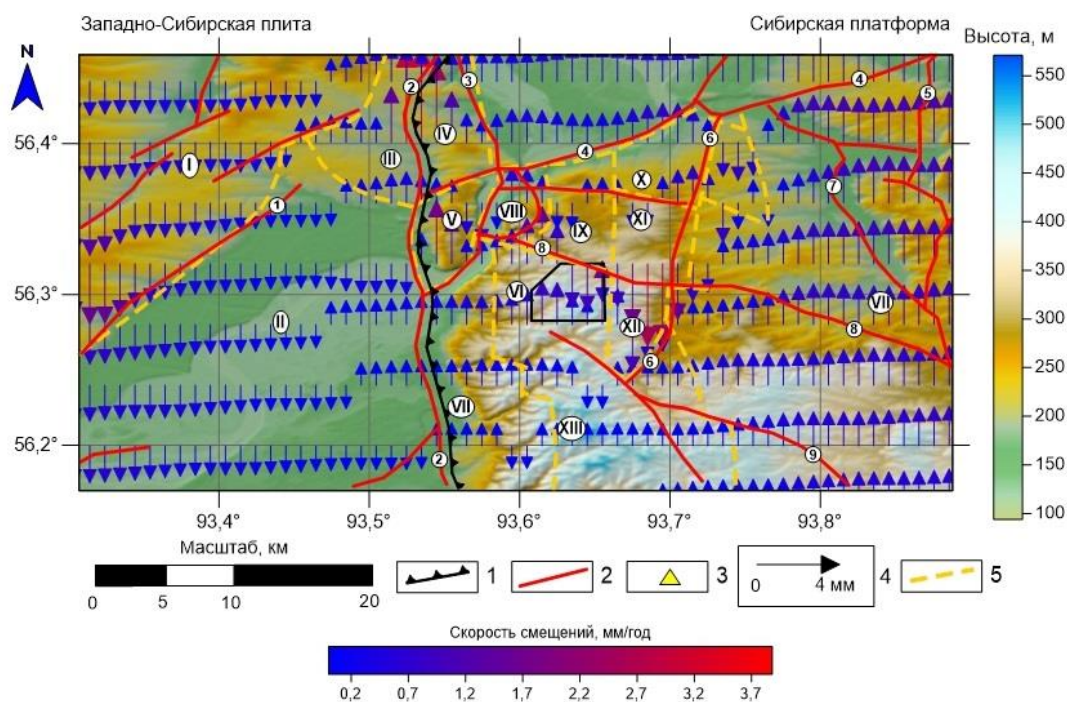


Полученные данные о современных движениях земной коры можно использовать для геодинамического районирования исследуемых территорий. Можно выделять качественные показатели – зоны растяжения и сжатия, вычислять тектоническую составляющую напряжений в горном массиве, определять зоны высокоградиентных смещений и т.д. Пространственная экстраполяция на основе нейросетевого подхода позволяет охватить всю необходимую площадь полигона и более детально исследовать современную активность местных тектонических структур.





**Рисунок 2.12 – Поле средних скоростей современных горизонтальных движений земной коры в направлении на запад. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы; 3 – ГНСС-пункты геодинамического полигона; 4 – векторы скоростей СДЗК ГНСС-пунктов, мм/год; 5 – активные геодинамические зоны, соответствующие границам структурных блоков с различными кинематическими характеристиками**



**Рисунок 2.13 – Поле средних скоростей современных горизонтальных движений земной коры в направлении на север в южной части Енисейского кряжа**

### Список использованных источников

Кафтан В. И. Миграция деформации земной поверхности, как триггер серии землетрясений Риджквест (июль 2019 г.) // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5–9 октября 2020 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2020. с. 439–445.

Кафтан В. И., Гвишиани А. Д., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижнеканском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т.16. №1. – с.83–94. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94.

Разумов О. С. О некоторых свойствах псевдообратной матрицы  $N^+$  нормальных уравнений свободных геодезических сетей // Известия Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1981. – №6. – с. 3–7.

Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. – 2018. – Т. 19. – № 4. – с. 64 – 79. – DOI: 10.21455/gr2018.4-5.

Morozov V. N., Manevich A. I. Modeling stress-strain state in the epicentral zone of the earthquake 26.01.2001,  $M=6,9$  (India) // Geophysical Research. – 2016. – Vol. 17(4). – p. 23–36. – DOI: 10.21455/gr2016.4-2.

Morozov V. N., Manevich A. I. Modeling stress-strain state in the epicentral zone of the earthquake 13.03.1992  $M_s = 6,8$  (Turkey) // Geophysical Research. – 2018. – Vol. 19(1). – p. 17–29. – DOI:10.21455/gr2018.1-2.



### **3 Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства**

Номер темы в ИСГЗ: 0145-2019-0003

Номер регистрации: АААА-А19-119032090070-4

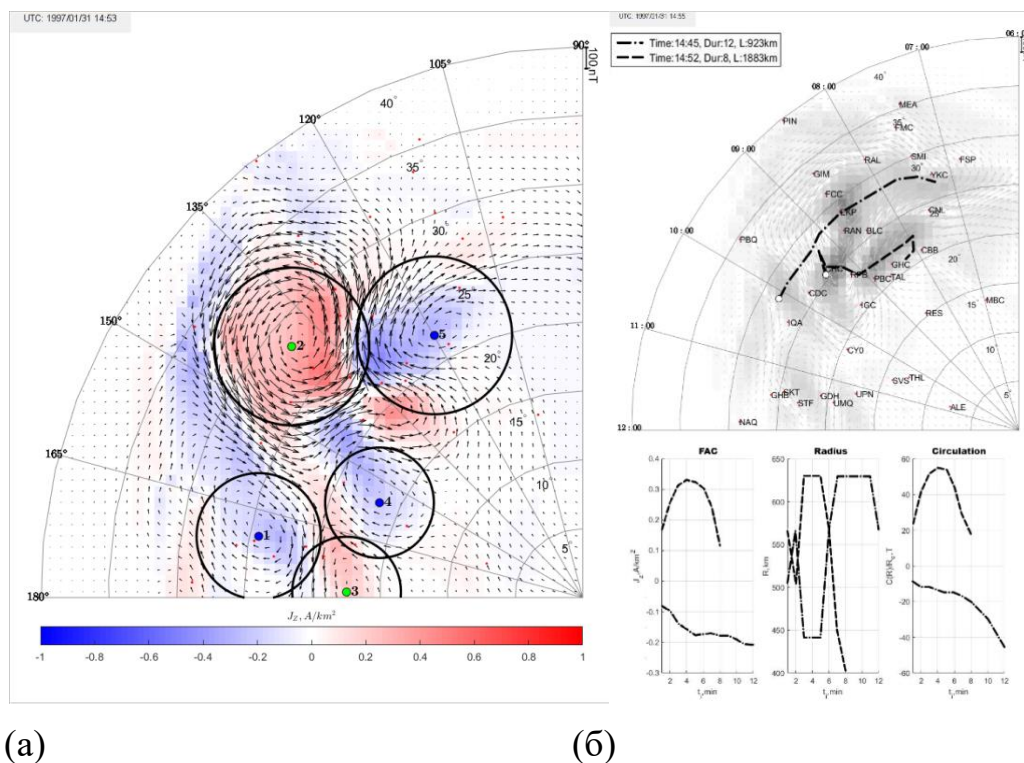
Руководитель: директор чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв

#### **3.1 Изучение высокоширотных экстремальных событий космической погоды по данным геомагнитного и ионосферного мониторинга**

##### **3.1.1 Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным**

Вихревые ионосферные токовые структуры могут иметь самые различные масштабы, в зависимости от типа магнитосферного возмущения: от планетарных масштабов при воздействии межпланетной ударной волны до малых кинетических масштабов в авроральных структурах. В локализованных структурах сосредоточена основная энергия нестационарных магнитосферно-ионосферных возмущений. Именно они ответственны за всплески интенсивных геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяженных линиях электропередачи. Для апробации новых методов автоматического выделения таких вихревых структур рассмотрены конвективные холловские вихри. Наземным отражением подобных событий служат изолированные импульсные возмущения магнитного поля Земли (МПЗ) с характерными временными масштабами ~ 10 мин и амплитудами до первых сотен нТл. Нами предложен метод автоматического обнаружения подобных вихрей по наземным данным геомагнитных наблюдений. Он не только дает возможность автоматически находить несколько вихревых структур, но и определять текущие значения их характерных динамических параметров: пространственную структуру продольных токов и групповую скорость горизонтального распространения вихря вдоль ионосферы. Реконструируемое при этом магнитное векторное поле является потенциальным, а векторное поле эквивалентного ионосферного тока – бездивергентным. Представленный набор алгоритмов выполняет целостную автоматическую обработку данных, начиная с анализа исходных измерений магнитного поля Земли до конечного результата вычислений ряда динамических характеристик искомых структур. К последним относится численное определение положения центра и размер вихревого образования, траектории и скорости движения, а также направления и интенсивности продольного тока. Работа всей системы продемонстрирована на примере

изучения движущегося ионосферного вихря, зарегистрированного 31.01.1997 на 2D-сети станций на арктических широтах (рис. 3.1). Предложенные алгоритмы могут быть широко использованы исследователями в области солнечно-земной физики и геофизики для автоматического выделения локальных экстремальных возмущений геомагнитного поля, которые могут быть ответственны за всплески ГИТ в энергетических системах. Предлагаемая методика позволяет выделять иерархии вихрей с различными пространственными масштабами.



**Рисунок 3.1 – (а) Пример выделения дневных конвективных вихревых структур 31 января 1997 г. 14:53 UT: отображение плоского скорректированного векторного поля эквивалентного ионосферного тока  $J$  и величины плотности продольного тока  $J_z$  (отмечена цветом). Направлению вихря по часовой стрелке соответствует втекающий ток  $j_z < 0$ , направлению против часовой стрелки – вытекающий ток  $j_z > 0$ . Длина стрелок зависит от интенсивности магнитного возмущения, направление на Солнце – слева. (б) Траектории движения центров двух вихрей (сверху) и их динамические характеристики: плотность продольного тока, радиус и циркуляция (снизу)**

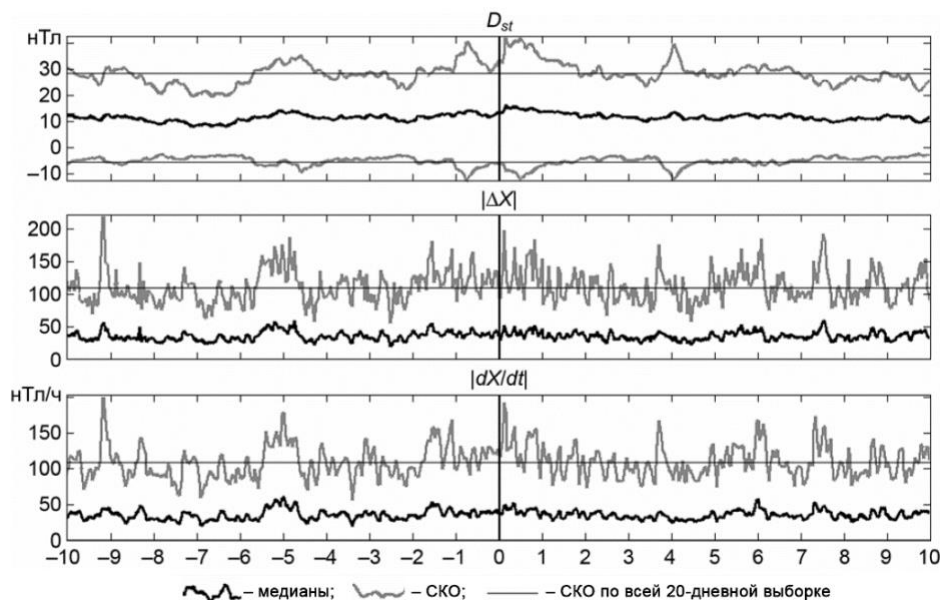
### 3.1.2 О взаимосвязи геомагнитной возмущенности и сейсмической активности

В геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды (магнитные бури) на сейсмичность Земли. Предполагаемые механизмы воздействия основаны на представлениях о возбуждении при магнитных бурях теллурических полей





и токов, текущих вдоль разломов, воздействуя на динамику поровой жидкости. При поисках триггерного воздействия сильных вариаций естественного геомагнитного поля на сейсмичность утверждалось, что магнитные бури и порождающие их солнечные вспышки вызывают заметные изменения сейсмичности, и выдвинуто предположение о триггерном механизме этого явления. Нами была проверена гипотеза о магнитной буре как триггере землетрясений для региона с высокой сейсмичностью – Аляски, где магнитная активность значительно мощнее, чем на низких широтах. Методом наложенных эпох (МНЭ) для медианных значений магнитной возмущенности относительно момента землетрясения рассмотрена статистика геомагнитных вариаций на магнитной обсерватории «Колледж» до и после поверхностных землетрясений 2014–2016 гг. Всего были рассмотрены 25 сильных ( $M > 5$ ) и 774 умеренных ( $3 < M < 5$ ) землетрясения. В отличие от предшествующих работ, в качестве нулевой (реперной) точки использовался не момент внезапного начала бури, а момент землетрясения. В качестве характеристик геомагнитной возмущенности использованы абсолютные значения возмущения поля  $|\Delta X|$  и производной поля во времени  $|dX/dt|$ . Статистически значимых отклонений кривых МНЭ за 10 дней до землетрясения не обнаружено, что ставит под сомнение гипотезу о магнитной буре как возможном триггере землетрясений (рис. 3.2).

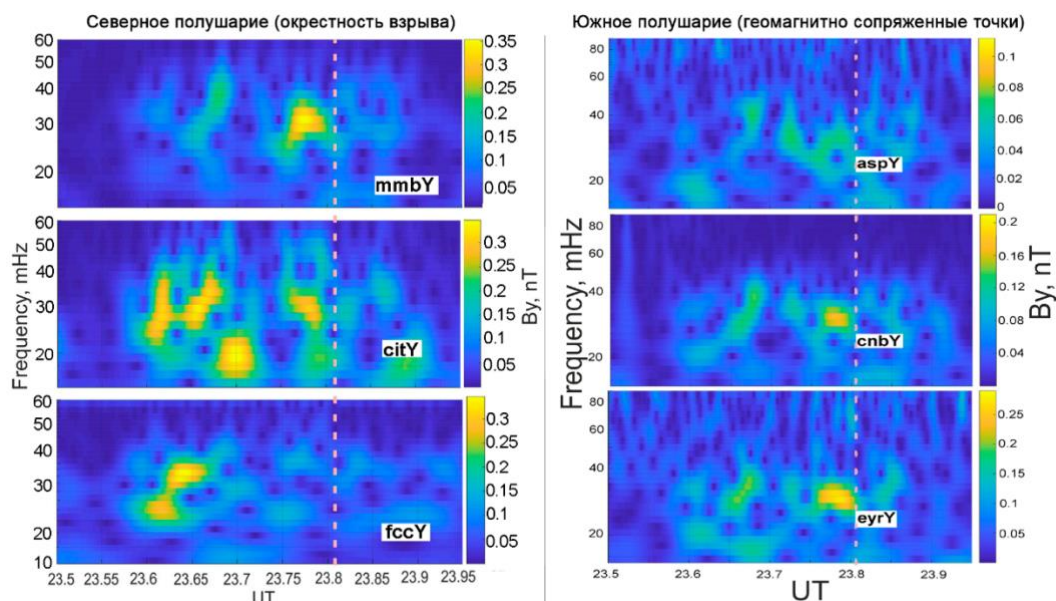


**Рисунок 3.2 – Полученные МНЭ графики часовых медианных значений  $D_{st}$  индекса (вверху),  $|\Delta X|$  (по центру) и  $|dX/dt|$  (внизу) относительно моментов землетрясений, выбранных случайным образом среди произошедших в регионе Аляски в 2014–2016 гг. На горизонтальной оси: 0 – реперная точка (момент землетрясения), относительно которой отсчитываются анализируемые интервалы времени (дни до и после толчка)**

### 3.1.3 Геомагнитный отклик на падение метеоритов



Взаимодействие проводящего тела с плазмой сопровождается возбуждением различных электромагнитных возмущений и излучений. В земной ионосфере эти эффекты проявляются в виде генерации геомагнитных импульсов и шумов при взлете ракет, разлете газов из ракетного двигателя, движения крупномасштабных космических систем в верхней ионосфере. Этот класс явлений также включает геомагнитные эффекты, вызванные падением крупных космических тел, метеоритными ливнями и болидами. В то время как космические тела с небольшими размерами (даже диаметром порядка 1 м) вторгаются в атмосферу довольно часто, космический объект, соизмеримый с Тунгусским метеоритом, падает на Землю в среднем раз в 100–200 лет. В этой связи затруднительно изучение геомагнитных эффектов, возникающих при взаимодействии таких тел с системой магнитосфера – ионосфера – атмосфера. 18 декабря 2018 г. космическое тело вошло в атмосферу Земли и взорвалось на высоте  $\sim 25$  км. Позже оно стало известно, как Камчатский метеор или Берингоморский болид. Взрыв, который был оценен в  $\sim 10$  раз мощнее взрыва атомной бомбы в Хиросиме ( $\sim 21$  кт ТНТ), был обнаружен только в результате постобработки фотографий, сделанных спутниками НАСА. Нами были проанализированы геомагнитные наблюдения на массиве магнитометров во время падения Берингоморского болида, когда космическое тело вошло в атмосферу Земли и взорвалось недалеко от Камчатки. Было обнаружено, что кратковременный электромагнитный сигнал возник до взрыва и, следовательно, был вызван прохождением метеороида через внутреннюю магнитосферу Земли. Сигнал представлял собой низкочастотные геомагнитные вариации, сходные с Pс3 пульсациями (рис. 3.3). Эти наблюдения можно условно интерпретировать как триггерное возбуждение колебаний резонансных силовых линий (альвеновских резонансов) во внутренней магнитосфере быстро движущимся проводящим метеороидом. Магнитный сигнал, вызванный самим взрывом, не обнаружен.



**Рисунок 3.3 – Результат частотно-временного анализа сигнала для Y-компоненты магнитного поля на обсерваториях MMB (Япония), SIT (Аляска, США) и FCC (Канада), вертикальная пунктирная линия отмечает момент взрыва (слева); спектрограммы осцилляций магнитного поля на обсерваториях ASP, CNB (Австралия) и EYR (Новая Зеландия), расположенных в геомагнитно-сопряженных точках (справа)**

### 3.2 Развитие ДМА для решения задач геофизики

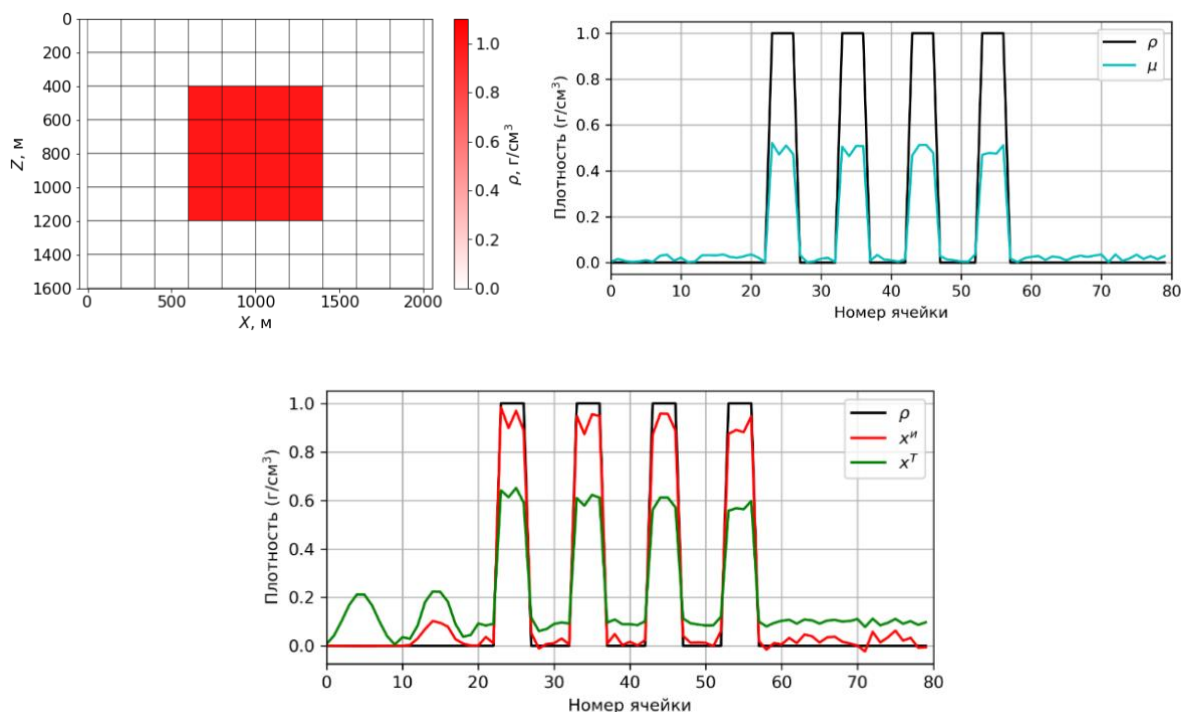
#### 3.2.1 Проекционный метод решения СЛАУ

В 2020 г. получил развитие проекционный метод решения систем линейных уравнений. Конструктивное описание многообразия решений  $\Phi(A, b)$  линейной системы  $Ax = b$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $E$  позволяет учесть априорную информацию о свойствах искомого решения  $x^f$  путем его поиска на многообразии  $\Phi(A, b)$  [Агаян и др., 2020]. Технически это выглядит следующим образом: точка зрения на искомое решение  $x^f$  формализуется неотрицательным функционалом  $F$  на  $\Phi(A, b)$  и решение  $x^f$  его минимизирует. Если точек зрения на  $x^f$  несколько и за них отвечает система функционалов  $\mathcal{F} = (F_1, \dots, F_k)$ , то поиск  $x^f$  сводится к многокритериальному выбору  $B(\mathcal{F}, \Phi(A, b))$  относительно  $\mathcal{F}$  на  $\Phi(A, b)$ . Сказанное выше графически передает схема

$$Ax = b \rightarrow \Phi(A, b) \rightarrow \mathcal{F} \rightarrow B(\mathcal{F}, \Phi(A, b)) \rightarrow x^f.$$

Первый переход полностью относится к линейной алгебре и состоит в эффективном построении ортогонального дополнения к любому подпространству в  $E$ . Второй переход формализует априорную информацию об искомом решении  $x^f$  в систему функционалов  $\mathcal{F}$  на многообразии  $\Phi(A, b)$  и потому требует широкого спектра методов (анализ данных, нечеткая математика, искусственный интеллект). Третий переход

представляет собой в широком смысле оптимизацию  $\mathcal{F}$  на  $\Phi(A, b)$ , включающую в себя как классические непрерывные методы (градиент, штрафные функции и т.д.), так и дискретные (теория выбора, нейронные сети и т.д.). Конструктивное описание  $\Phi(A, b)$  также получается в рамках теории ABS-алгоритмов, но, к сожалению, его компьютерная реализация сильно ограничена в реальности. Поэтому на первом этапе мы предлагаем более простую и устойчивую на практике параметризацию  $\Phi(A, b)$ . На втором этапе обсуждаются возможности конструктивного описания многообразия решений  $\Phi(A, b)$  линейной системы  $Ax = b$ , которые дает проекционный метод. Рассмотрены две формализации априорной информации вида «исккомое решение  $x^f$  похоже на известный вектор  $\mu \in E$ » и приведены соответствующие примеры. На третьем этапе приводятся два примера, демонстрирующие преимущества предлагаемого подхода над методом регуляризации Тихонова с использованием априорной информации. Второй пример связан с обратной задачей гравirazведки на двумерной модели с заданной сеткой плотностей  $\rho$  (рис. 3.4). Из рисунка видно, что, в то время как метод регуляризации Тихонова с  $\alpha = 0,1$  добавляет к априорной модели неинформативные фоновые значения, исследуемый метод использует априорную информацию с целью найти подобное решение на многообразии. Таким образом получается, что основная информация сконцентрирована там, где хотел бы её видеть интерпретатор.



**Рисунок 3.4 – Двумерная сетка рассматриваемых плотностей; плотность исходной модели ( $\rho$ ) и априорная информация ( $\mu$ ); сравнение решений методом регуляризации Тихонова ( $x^T$ ) и предложенным методом ( $x^H$ ) с исходной моделью ( $\rho$ )**



### 3.2.2 Тренды через производные

Формализация трендов для дискретных функций состоит в последовательности ответов на следующие вопросы: 1. Что такое тренд функций в точке? 2. Какие фрагменты функций мы безусловно считаем трендовыми? 3. Как из этих фрагментов складывается тренд? В рамках ДМА имеется несколько вариантов ответов на эти вопросы. В 2020 г. мы остановились на одном из них, основанном на новой математической конструкции регрессионной производной дискретной функции. В классическом случае конструкция одномерной производной дает возможность получить частные производные в многомерном случае и определить важнейшее понятие критической точки в многомерном математическом анализе, изучение которых во многом составляет его суть. Одно из направлений ДМА связано с реализацией сценариев непрерывной математики в дискретной обстановке. Цель работы в этом направлении – используя регрессионную производную, определенную в [Агаян и др., 2019а, 2019б] для одномерных временных рядов, повторить приведенный выше сценарий в дискретной обстановке, заложив, тем самым, начало многомерного ДМА. Техника реализации, как это принято в ДМА, является нечеткой. Итог – построение для двумерной дискретной функции нечетких структур «вырожденная критическая точка» и «невыврожденная критическая точка» через формализованные частные производные, градиент и гессиан. Их эффективность продемонстрирована на ряде классических примеров: «обезьянье седло», «желоб» и т.д. Некоторые из них приведены на рис. 3.5.

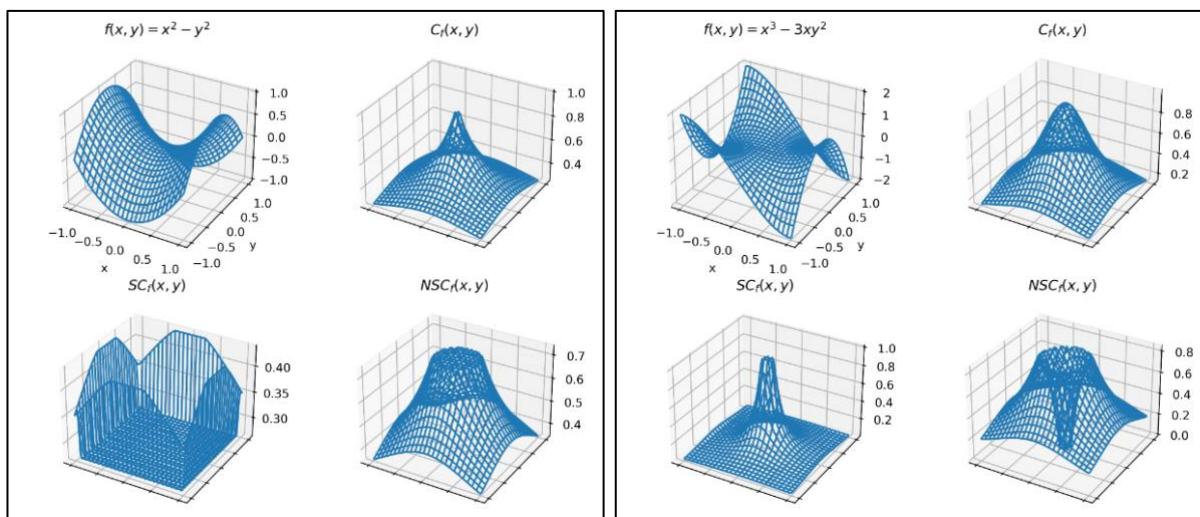


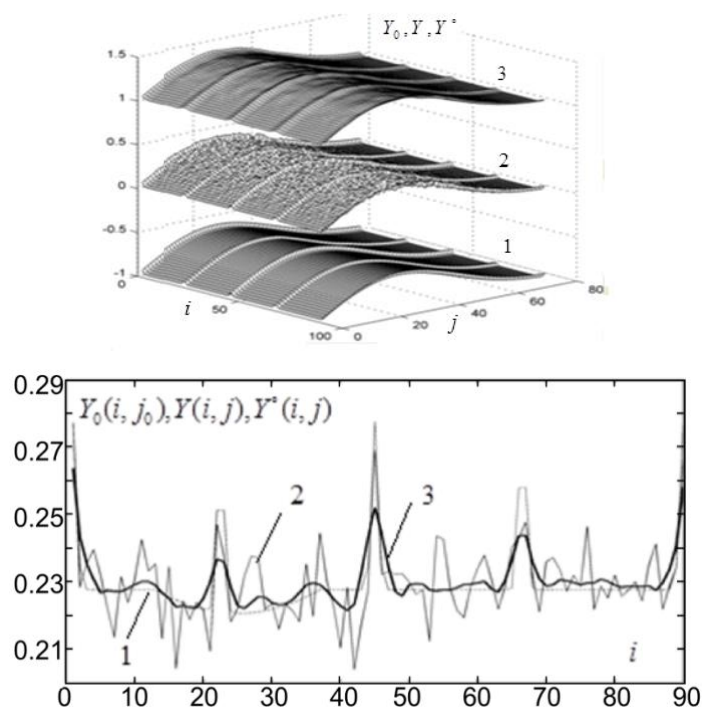
Рисунок 3.5 – Функция  $f(x, y) = x^2 - y^2$ , точка  $(0, 0)$  невырождена (слева); функция  $f(x, y) = x^3 - 3xy^2$ , точка  $(0, 0)$  вырождена (справа)

### **3.3 Разработка метода фильтрации с использованием систем локальных моделей и взвешенного усреднения для задач цифровой обработки двумерных функций наблюдений**

Предложен метод двумерной фильтрации, базирующийся на построении систем аппроксимационных скользящих двумерных локальных модельных функций с последующим их взвешенным усреднением. Разработан алгоритм двумерной фильтрации, основанный на суммировании скользящих двумерных кусочно-линейных модельных функций с весами. Метод ориентирован на реализацию двумерной фильтрации, учитывающей особенности наблюдений, связанные с малыми размерами двумерных областей, на которых они определены, неравномерными уровнями шумовых погрешностей, возможными резкими перепадами или малыми амплитудами колебаний в исходных двумерных функциях. Двумерная фильтрация представляет собой достаточно хорошо разработанную область прикладной математики. Существует целый ряд различных методов и алгоритмов двумерной фильтрации, базирующихся на традиционных двумерных рекуррентных разностных уравнениях и двумерном дискретном преобразовании Фурье, нелинейных аппроксимационных функциях, вейвлет-функциях, медианных преобразованиях и т.д. Однако для наблюдений, по причинам отмеченного перечня особенностей, главным образом, из-за малых размеров двумерных областей, на которых они определены, и возможных значительных перепадов в исходных функциях, существующие методы в ряде случаев могут работать в недостаточной степени эффективно. Представленные здесь метод и алгоритм обеспечивают: 1. возможность фильтрации для двумерных областей с малыми размерами и возможными резкими перепадами исходных функций благодаря построению систем скользящих локальных модельных функций; 2. возможность обнаружения малых колебаний в исходных двумерных функциях благодаря реализации взвешенного усреднения, обеспечивающего значительное снижение уровня отфильтрованных шумов. Здесь рассматриваются подходы, основанные на аппроксимационных локальных модельных функциях, в которых рассматривается метод т.н. размножения локальных оценок. В рассматриваемом методе по аналогии с методом размножения реализуется взвешенное усреднение локальных модельных функций и обобщаются результаты по фильтрации одномерных наблюдений [Ivanov et al., 2017; Getmanov et al., 2015] на двумерный случай. Сформированная здесь двумерная фильтрация является актуальной составляющей техники цифровой обработки и анализа наблюдений интенсивностей излучений частиц для задач экспериментальной физики, включая технику космических лучей, имеющей целый ряд практических



приложений – обнаружении полостей в горных образованиях и строительных сооружениях, поисковых задачах геологоразведки, идентификации экстремальных событий в гелиосфере и т.д. Пример фильтрации на синтетических данных приведен на рис. 3.6. В данном примере оказалось возможным выделить понижения интенсивности на 3%.



**Рисунок 3.6 – 3D-графики исходного модельного распределения (1), модельной (2) и отфильтрованной модельной (3) двумерной функции (слева); модельные исходные  $Y_0(i, j_0)$  (1), зашумлённые  $Y_0(i, j_0)$  (2) и отфильтрованные  $Y_0(i, j_0)$  (3) функции для  $j_0 = 45$**

### **3.4 Развитие высокоточного мониторинга абсолютных значений магнитного поля Земли в РФ и ближнем зарубежье**

В 2020 г. продолжилась ручная регистрация абсолютных значений на геомагнитной обсерватории «Климовская» (IAGA-код KLI, Архангельская обл.). За 2020 г. получено 634 значения абсолютных склонения, наклонения и модуля магнитного поля. По абсолютным измерениям вычислялись значения базисной линии для обсерваторского векторного магнитометра. На магнитной обсерватории «Санкт-Петербург» (IAGA-код SPG, Ленинградская обл.), входящей в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ, было выполнено 94 абсолютных измерения.

В феврале 2020 г. в ходе экспедиции на геомагнитную обсерваторию «Гюлагарак» (Республика Армения), развиваемую ГЦ РАН совместно с ИГИС НАН РА, был установлен и введен в эксплуатацию векторный феррозондовый трехкомпонентный магнитометр

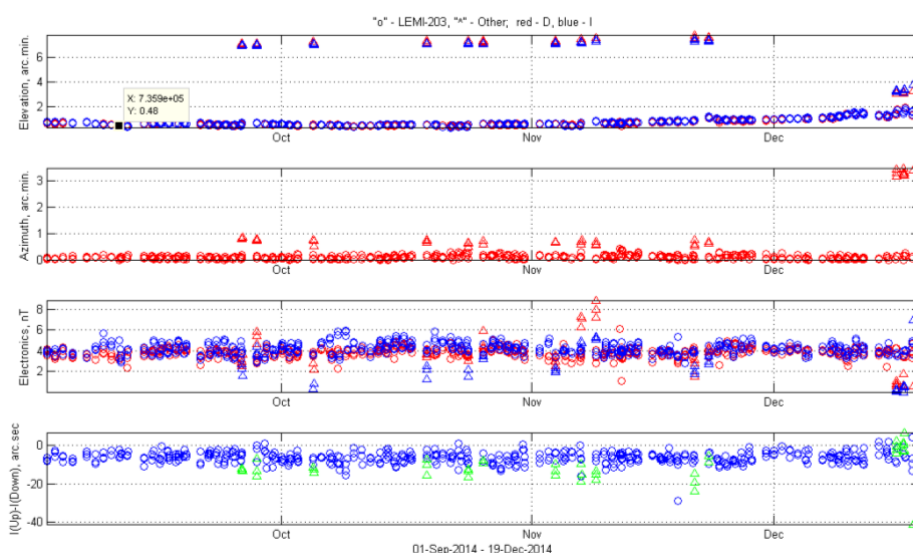
FGE. Таким образом, этот пункт наблюдений полностью укомплектован необходимым магнитометрическим оборудованием (ранее были установлены скалярный протонный магнитометр и феррозондовый деклинометр/инклинометр в абсолютном павильоне) и с февраля функционирует как полноценная магнитная обсерватория. С этого момента на обсерватории ежедневно производятся измерения абсолютных значений компонент МПЗ. Она является первым опытом ГЦ РАН в развертывании стационарных измерений в горной местности на значительном удалении от других магнитных обсерваторий. В период с 06/02 по 25/11 выполнено 802 измерения. Кроме того, был внедрен целый ряд технических усовершенствований на обсерватории и была выполнена магнитная съёмка павильонов обсерватории с целью оценки магнитной чистоты внутренних помещений. Детектированные источники помех были устранены. Данная обсерватория в настоящее время является единственным пунктом стационарных непрерывных геомагнитных наблюдений на обширной территории в составе региона Передней Азии, и ее развитие и поддержка представляется важной не только с точки зрения усовершенствования глобальных геомагнитных моделей, но и с точки зрения региональных исследований магнитного поля Земли. Все полученные абсолютные значения позволяют сделать вывод о правильном функционировании обсерваторий и могут быть использованы как самостоятельные наборы значений для изучения изменчивости МПЗ.

В ходе экспедиции на магнитную обсерваторию «Климовская» в январе 2020 г., помимо технических усовершенствований, был испытан новый феррозондовый деклинометр/инклинометр MinGeo (Венгрия) на немагнитном теодолите Theo 010 в беспроводном исполнении. Выявлены технические недочеты указанного прибора, связанные с необходимостью размещения беспроводного планшета на расстоянии более 3 м от самого прибора. Таким образом, данный беспроводной теодолит не подходит для абсолютных обсерваторских измерений, но может хорошо себя зарекомендовать при полевых работах.

Проведение периодической сверки обсерваторских магнитометров с контрольным магнитометром, имеющим свидетельство о метрологической поверке, является одним из основных способов достижения единства всех измерений. Сверка феррозондовых деклинометров/инклинометров заключается в сравнении отдельных измерений на сверяемом приборе с общей массой измерений, полученных на всех остальных приборах (обычно их несколько десятков со всего мира). Предложена конфигурация базы данных (БД) для хранения результатов сверок таких приборов средствами СУБД на основе БД, которая реализована в ГЦ РАН для унификации абсолютных измерений и их



структурированного хранения в рамках АПК МАГНУС [Соловьёв и др., 2017]. Подобный подход обеспечивает оперативный доступ не только к результатам сверок, но и к справочной информации о всех приборах, их характеристикам и датам последних метрологических поверок. Помимо абсолютных и базисных значений, по которым происходит сверка деklinометра/инклинометра с эталонным, необходим расчет ряда характеристик, связанных непосредственно с самим прибором, включая сведения о непараллельности оси феррозондового датчика и оси зрительной трубы теодолита. Эти и другие параметры также должны храниться в БД. Конфигурация соответствующей БД включает три таблицы для каждого прибора: справочную таблицу, таблицу для измерений и таблицу разностей между сверяемым и эталонным магнитометрами. На рис. 3.7 приведены графики некоторых результатов сверки различных феррозондовых деklinометров/инклинометров на геомагнитной обсерватории «Паратунка» (IAGA-код РЕТ, Камчатский край) за период 1 сентября – 19 декабря 2014 г.



**Рисунок 3.7 – Пример отображения различных результатов измерений феррозондовыми деklinометрами/инклинометрами, полученных в ходе сверок; представлен ряд измерений на магнитной обсерватории «Паратунка» с 1 сентября по 19 декабря 2014 г. Графики сверху вниз: отклонения склонения и наклонения, значения азимута визирной цели, погрешность электроники, величина вертикальной непараллельности осей датчика и зрительной трубы. Красным показаны результаты, полученные из измерений магнитного склонения, синим – из измерений магнитного наклонения**

Общий объём геомагнитных данных, поступивших в 2020 г. в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» ГЦ РАН, составил 155,47 Гб. Подробная информация приведена в таблице 3.1. Жёлтым выделены обсерватории, начавшие передачу данных в 2020 г.

Таблица 3.1 – Объёмы данных, поступивших в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных



данных» ГЦ РАН за период с 01.12.2019 по 01.12.2020.

Код обсерватории	Местоположение	Объём данных файлового хранилища, Гб	Объём данных БД, Гб	Примечание
AAA	г. Алма-Ата, Казахстан	1,52	0,7	В том числе 1,5 Гб секундных данных POS-1
AIA	Антарктида	0,04	0,3	
ARS	пос. Арти, Свердловская обл.	0,04	0,3	
BEY	о. Белый, Карское море	0,03	0,9	Переданы данные за 05.08.2016–11.11.2019
BOX	пос. Борок, Ярославская обл.	0,08	0,7	В том числе 46,3 Мб секундных данных
CPS	пос. Мыс Шмидта, Чукотская АО	0,04	0,3	
GLK	пос. Гюлагарак, Армения	1,20	0,7	Минутные и секундные
IRT	г. Иркутск	0,02	0,3	
KHB	г. Хабаровск	0,02	0,3	
KHS	Харасавей, п-ов Ямал, ЯНАО	0,18	1,65	Переданы данные за 25.06.2013–11.11.2019
KIV	г. Киев, Украина	0,02	0,3	
KLI	пос. Коноша, Архангельская обл.	1,43	0,7	Минутные и секундные
KZN	г. Казань	5,41	0,7	Минутные и секундные
LVV	г. Львов, Украина	0,003	0,3	
MGD	пос. Стекольный, Магаданская обл.	0,03	0,3	
MHV	пос. Михнево, Московская обл.	0,89	0,3	
MNK	г. Минск, Беларусь	0,02	0,3	
NAD	г. Надым, ЯНАО	2,83	1,2	Переданы данные за 31.10.2016–01.12.2020
NVS	г. Новосибирск	0,02	0,3	
ODE	г. Одесса, Украина	0,004	0,3	
PET	пос. Паратунка, Камчатский край	0,04	0,3	
SKD	г. Салехард, ЯНАО	0,01	0,4	Переданы данные за 12.02.2018–20.06.2019
SPG	г. Санкт-Петербург	1,48	0,7	Минутные и секундные
WSE	пос. Приморский, Респ. Карелия	0,74	0,3	
YAK	г. Якутск	0,03	0,3	
<i>Геомагнитные спутниковые данные миссии Swarm</i>				
		74,23	52	Начата загрузка данных о плотности ионосферных токов с 27.11.2013
<b>ИТОГО</b>		90,42	65,05	<b>155,47 Гб</b>



В 2020 г. был присвоен DOI набору окончательных данных магнитной обсерватории «Санкт-Петербург» за 2017 г., утвержденному ИНТЕРМАГНЕТ в качестве годового массива окончательных данных. Также присвоен DOI новым данным магнитной обсерватории «Гюлагарак». Геомагнитные данные, зарегистрированные векторным магнитометром обсерватории, частично скорректированы с учетом базисной линии, поэтому являются приближенными к абсолютным значениям МПЗ. Все данные доступны для загрузки на странице Межрегионального центра геомагнитных данных ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru/dataproduct-down.html>).

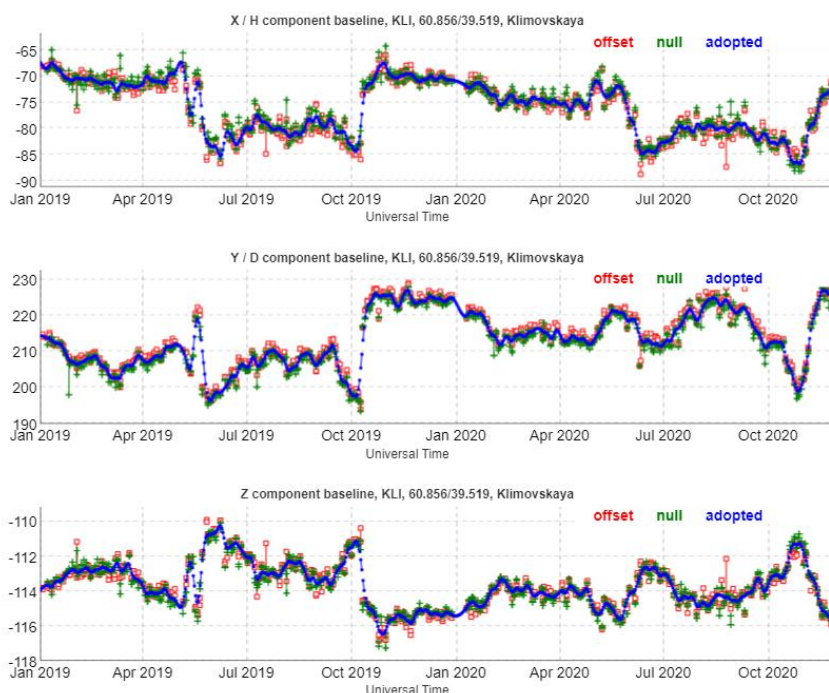
### 3.5 Развитие функционала АПК МАГНУС

Ключевым аспектом функционирования АПК МАГНУС, как системы подготовки данных высшего стандарта качества геомагнитных данных ИНТЕРМАГНЕТ, является обработка абсолютных наблюдений, проводимых на обсерваториях ГЦ РАН. Получаемые на их основе базисные значения позволяют судить о состоянии вариометра, визирной цели и в целом об обстановке в измерительных павильонах обсерватории [Хомутов, 2017]. В связи с этим, в 2020 г. была переработана архитектура подсистемы АПК МАГНУС, отвечающей за ввод и обработку абсолютных наблюдений. Наиболее важным компонентом новой подсистемы является разработанный в сервис ввода абсолютных измерений [Кудин и Сидоров, 2020]. Веб-сервис состоит из динамически генерируемых в зависимости от метода наблюдения форм ввода данных и двух серверных микросервисов, обеспечивающих расчет и сохранение результатов в БД МАГНУС. При его проектировании и реализации основной упор был сделан на повышение наблюдаемости работы алгоритмов расчета. На этапе проверки корректности ввода исходных данных алгоритм задействует все доступные в БД МАГНУС измерения и производит расчет в тестовом режиме, что позволяет оценить не только корректность введенных значений, но и геомагнитную обстановку в период проведения наблюдений. В случае, если тестовый расчет прошел успешно, оператор прикрепляет отсканированную копию ведомости к форме окончательного расчета, которая сохраняется на FTP-сервер с привязкой к исходным данным абсолютных наблюдений в БД МАГНУС. Похожий подход используется при обработке данных на обсерваториях сети ИНТЕРМАГНЕТ [Хомутов, 2017], однако АПК МАГНУС дает возможность обойтись без использования специализированных математических пакетов на стороне клиента, выполняя расчеты и проверку данных на сервере, реализованную на языке Golang. Еще одной важной особенностью веб-сервиса является сохранение исходных и промежуточных расчетных данных и последующая рассылка результатов по списку закрепленных за обсерваторией магнитологов. Новый веб-сервис реализован для удобной работы как на ПК, так и на мобильных устройствах. Опыт его эксплуатации показал удобство использования



и легкость освоения специалистами разной квалификации. Результатом внедрения системы явилось начало систематической отправки квазиокончатальных данных обсерватории «Санкт-Петербург» в ИНТЕРМАГНЕТ в 2020 г. Эти данные успешно проходят проверку и становятся доступными на сайте ИНТЕРМАГНЕТ с задержкой до 1 месяца.

В рамках повышения качества данных обсерватории «Климовская» в вариационном павильоне был развернут температурный градиентометр, состоящий из 5 отдельных температурных датчиков. Данные с этих датчиков регистрируются и отправляются в АПК МАГНУС в режиме квазиреального времени (задержка не более 10 минут). Использование температурного градиентометра позволило улучшить контроль температурного режима вариационного павильона. В частности, во время ежегодного процесса коррекции температурных режимов удалось минимизировать внутрисуточный температурный дрейф вариационного магнитометра. На рис. 3.8 приводятся базисные линии обсерватории «Климовская» за период с 1 января 2019 г. по 1 декабря 2020 г. Как видно из графиков, сезонные корректировки 2019 г. характеризуются скачкообразным изменением базисной линии (синие промежутки), что приводит к существенным искажениям квазиокончатальных и окончательных данных. Использование данных температурного градиентометра позволило избежать подобных вариаций в 2020 г. и, тем самым, повысить качество квазиокончатальных данных.



**Рисунок 3.8 – Базисные значения компонент МПЗ (X0, Y0, Z0) на обсерватории «Климовская», полученные офсетным методом (красный), нуль методом (зеленые) и рассчитанные с помощью интерполяции (синий)**



В 2020 г. была реализована автоматическая загрузка данных о плотности ионосферных токов, вычисляемых по данным геомагнитных измерений спутников Swarm, с сервера Европейского космического агентства в хранилище АПК МАГНУС. Секундные данные содержат в себе дату, всемирное время, широту, долготу и радиус в системе ITRF, плотность ионосферного радиального тока и плотность продольного тока. На сайте межрегионального центра геомагнитных данных ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru/>) размещен веб-сервис для доступа к этим данным (рис. 3.9).

**Рисунок 3.9 – Онлайн-доступ к данным о плотности продольных токов (FAC) по геомагнитным данным Swarm на сайте межрегионального центра геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru/dataproduct-sat.html>)**

**Список использованных источников**

Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Камаев Д. А., Добровольский М. Н. Стохастические тренды на основе нечеткой математики // Чебышевский сборник. 2019а. Т.20. № 3. С.25–39. DOI: 10.22405/2226-8383-2018-20-3-25-39

С. М. Агаян, А. А. Соловьёв, Ш. Р. Богоутдинов, Ю. И. Николова. Регрессионные производные и их применение в изучении геомагнитных джерков // Геомагнетизм и аэрномия, том 59, №3. 2019б. С. 383–392. doi: 10.1134/S0016794019030027

С. М. Агаян, Ш. Р. Богоутдинов, А. А. Булычев, А. А. Соловьёв, И. А. Фирсов. Проекционный метод решения систем линейных уравнений и его применение в гравиметрии. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2020, том 493, № 1, с. 58–62

Кудин Д. В., Сидоров Р. В. Веб-сервис расчета абсолютных измерений геомагнитных обсерваторий / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664365 от 12 ноября 2020 г.

Обработка магнитных данных на обсерваториях (описание специализированного программного пакета) С. Ю. Хомутов – с.Паратунка, Камчатский край.: ИКИР ДВО РАН, 2017 г., 114 с.

Соловьёв, А. А., Р. Ю. Лукьянова, М. Н. Добровольский, Р. В. Сидоров, Р. И. Краснощёков, Д. В. Кудин, А. А. Груднев. Сбор и систематизация информации для базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях // Исследования по геоинформатике. – 2017.– т.5. doi:10.2205/2017BS044.

Getmanov V. G., R.V. Sidorov, R.A. Dabagyan // Measurement Techniques. V. 58, № 9. P. 1029–1036. 2015.

Ivanov I. O., V.V. Borog, A.V. Kryanev, V.G. Getmanov, R.V. Sidorov. // Journal of Physics: Conference Series. V. 788. No. 1. 2017. DOI: 10.1088/1742-6596/788/1/012017



## 4 Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных

Номер темы в ИСГЗ: 0145-2019-0004

Номер госрегистрации: АААА-А19-119032090068-1

Руководитель: зав. лаб., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов

### 4.1 Совершенствование управления массивами геофизических данных.

#### Информационное обеспечение научных исследований

В 2020 году в Мировых центрах данных (МЦД) по солнечно-земной физике (СЗФ) и физике твердой Земли (ФТЗ) продолжалась работа по увеличению информационных ресурсов, переводу исторических данных в электронный вид, совершенствованию сложившейся системы хранения и распространения данных.

МЦД по СЗФ был сертифицирован Советом CoreTrustSeal (<http://www.coretrustseal.org>) как репозиторий, заслуживающий доверия, на основе международно-признанных стандартов (Core Trustworthy Data Repositories Requirements), и продлил членство в Мировой системе данных на 3 года.

В МЦД по СЗФ дополнены и размещены в свободном доступе на сайте Центра данные среднечасовых и минутных значений элементов магнитного поля Земли: [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic\\_hourly.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_hourly.ru.html), [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic\\_minute.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_minute.ru.html) (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Новые данные среднечасовых и минутных значений элементов геомагнитного поля, полученные в 2020 г. и размещенные на сайте МЦД по СЗФ

Код обсерватории	Название обсерватории	Среднечасовые данные, годы	Минутные данные, годы
AIA	Аргентинские о-ва	2017	2017
ARS	Арти	2018	2018
BOX	Борок	2019	2019
IRT	Иркутск		2019
KIV	Киев	2017–2018	2017–2018
LVV	Львов	2018	2018
MGD	Магадан	2018	2018
MNK	Минск	2019	2018
NVS	Новосибирск	2006, 2019	2019
PET	Петропавловск	2018	2019
VOS	Восток	2018	2018
YAK	Якутск	2018	2018

Дополнены новыми данными массивы значений геомагнитного  $K$ -индекса ряда обсерваторий. Проведена проверка всего электронного архива определений  $K$ -индекса ([http://www.wdcb.ru/stp/data/Catalog\\_K/](http://www.wdcb.ru/stp/data/Catalog_K/)) – данные 44 обсерваторий с 1957 г. по настоящее время (1335 файлов). Обновлено каталог наличия данных и описание формата данных на сайте МЦД по СЗФ на двух языках. Массив исторических данных  $K$ -индекса 42 обсерватории бывшего СССР за период с 1957 г. по 1992 г. был передан издателю данных по наукам о Земле и окружающей среде PANGAEA (<https://www.pangaea.de/>) и опубликован с присвоением идентификатора DOI [Sergeyeva et al., 2020].

Опубликованы на сайте Центра [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/magnetogr\\_list.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/magnetogr_list.ru.html) цифровые изображения магнитограмм обсерваторий «Мыс Челюскин» (1990, 1991, 1993 гг.), «Мыс Уэлен» (1990, 1991, 1993, 1994 гг.), «Диксон» (1979, 1981, 1982, 1984–1993 гг.), «Остров Хейса» (1979–1981, 1984–1987, 1990 гг.), «Аргентинские острова» (1957–1968 гг.). Предварительно данные в количестве более 11200 магнитограмм были проверены и систематизированы.

В разделе «Геомагнитные вариации» появился новый подраздел «Спутниковые данные» (<https://usd.wdcb.ru/>), где представлен цифровой архив магнитометрических измерений советских спутников «Космос-49», «Космос-321», «Космос-1809», «Прогноз» и «Вега» с краткими описаниями миссий космической программы СССР, связанных с исследованиями магнитосферы Земли и околоземного пространства.

Новые данные ионосферной станции «Москва» (ИЗМИРАН) за 2020 г., содержащие 18 ионосферных параметров, после проверки и анализа опубликованы на сайте [http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric\\_phenomena.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric_phenomena.ru.html).

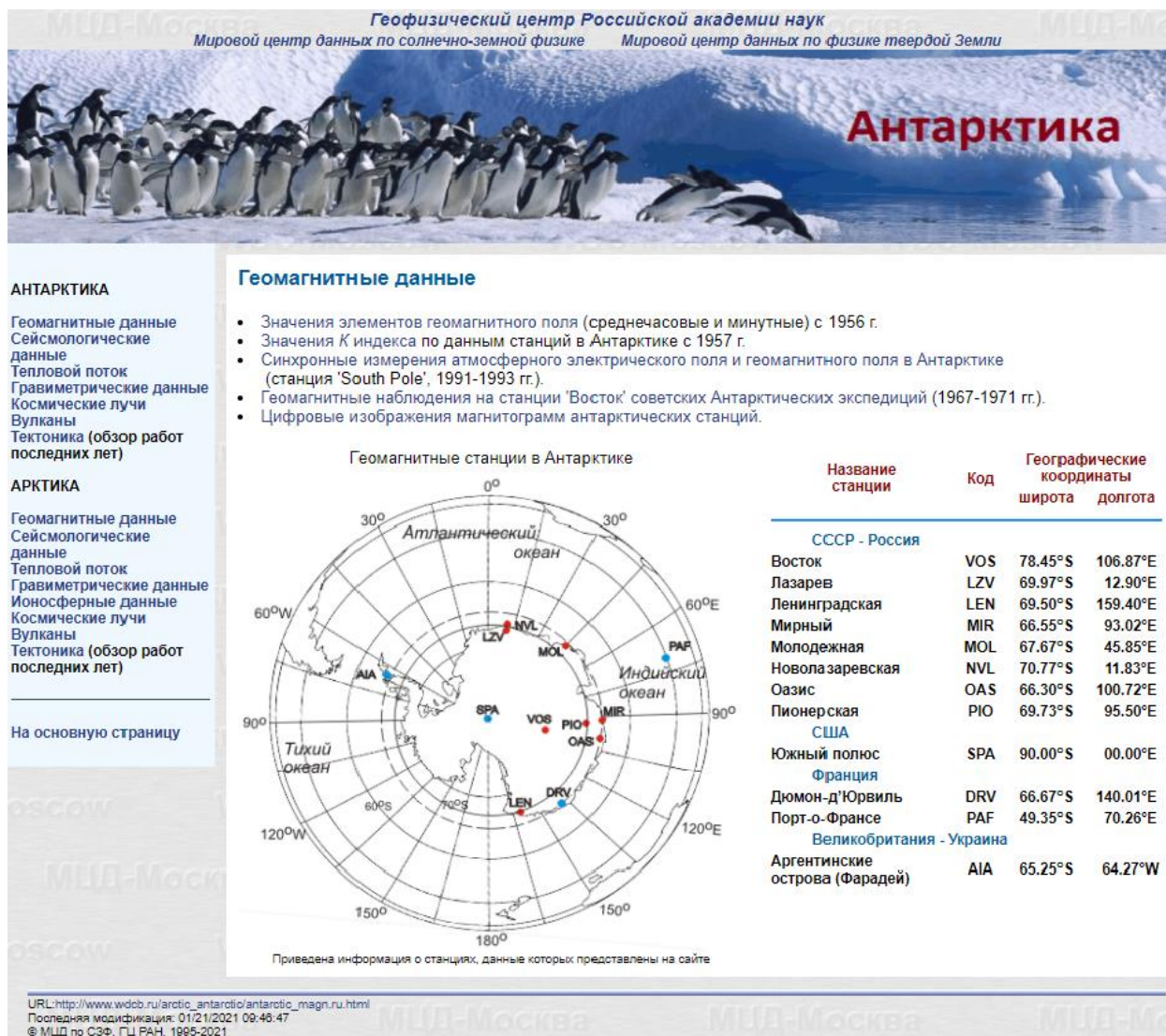
Проведена полная реорганизация и обновление интернет-страниц раздела «Космические лучи» [http://www.wdcb.ru/stp/cosmic\\_rays/cosmic\\_rays.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/cosmic_rays/cosmic_rays.ru.html) на русском и английском языках. Составлены подробные описания данных о наземных возрастаниях GLE интенсивности космических лучей и данных, получаемых на нейтронных мониторах и мюонных телескопах. Обновлено список станций космических лучей с подробной информацией и раздел ссылок на источники информации о космической погоде.

**В МЦД по ФТЗ** продолжена работа по формированию каталогов землетрясений сейсмически активных регионов Северной Евразии в виде текстовых файлов в кодах ASCII на основании данных, опубликованных в ежегодниках «Землетрясения в СССР» и «Землетрясения Северной Евразии». Для проверки качества данных и формирования файлов в нужном формате используется ПО, разработанное в Центре. Сформированы



каталоги регионов «Сахалин» за 1962–2012 гг. и «Приамурье и Приморье» за 2011–2012 гг.

Начата работа по формированию нового тематического сайта «Арктика – Антарктика» ([http://www.wdcb.ru/arctic\\_antarctic/index.ru.html](http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/index.ru.html)), в котором будут представлены геофизические данные, полученные в ходе изучения этих двух полярных регионов Земли. Создан раздел «Геомагнитные данные» для Антарктики (рис. 4.1) [http://www.wdcb.ru/arctic\\_antarctic/antarctic\\_magn.ru.html](http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/antarctic_magn.ru.html).



**Рисунок 4.1 – Страница сайта «Арктика – Антарктика» с геомагнитными данными. Приведен список станций, данные которых будут представлены на веб-сайте, на карте показано расположение станций**

В разделе размещены оцифрованные аналоговые магнитные записи советских Антарктических экспедиций на станцию «Восток» за 1966, 1968 и 1970–1971 гг. и синхронные измерения атмосферного электрического поля и геомагнитного поля в Антарктике на станции «South Pole» в 1991–1993 гг. Здесь же опубликованы

среднечасовые и минутные значения элементов геомагнитного поля и значения  $K$ -индекса, зарегистрированные станциями в Антарктике. Там же размещены цифровые изображения магнитограмм антарктических станций «South Pole» и «Аргентинские острова (Фарадей)».

В 2020 г. продолжалась работа по проекту «Сохранение старых данных» – преобразование данных, хранящихся в архивах МЦД в виде бумажных документов, в электронные документы (файлы в формате PDF). Выполнение этого проекта способствует увеличению информационных ресурсов в электронном виде, обеспечению удобного доступа к ним при публикации их в среде Интернет и сохранению исторических данных. Переведены в электронный вид данные 8 ионосферных станций (43500 документов) – результаты вертикального зондирования ионосферы (таблицы и графики среднечасовых значений параметров ионосферы), измерения поглощения, ионосферных ветров, атмосферных радиошумов, параметров профилей электронной плотности ионосферы (табл. 4.2). Часть проверенных и отредактированных данных опубликована на веб-сайте [http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere\\_3/](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/).

Таблица 4.2 – Ионосферные данные, переведенные в электронный вид (PDF файлы)



Обсерватория	Переведено в PDF формат, годы
Архангельск	1969–1974, 1977–1981
Киев	1979–1989
Магадан	1968–1999
Норильск	1968–1990
Петропавловск-Камчатский	1968–1974
Подкаменная Тунгуска	1968–1971, 1974–1980, 1984–1986, 1990–1992, 1995
Ташкент	1969–1981
Тбилиси	1959, 1961–1962, 1970

В 2020 г. продолжалась работа по **формированию базы данных (БД) «Геомагнетизм»** <http://stp.wdcb.ru/index.php>, совершенствовалось программное обеспечение. База данных реализована на платформе Apache. СУБД – клиент-серверная, она располагается на сервере вместе с БД и осуществляет доступ к БД непосредственно, в монопольном режиме. Все клиентские запросы на обработку данных обрабатываются клиент-серверной СУБД централизованно. Реализована возможность загрузки в БД трех текстовых файлов одновременно. Также на веб-странице, связанной с БД, на карте отображаются интервалы доступности данных для каждой выбранной обсерватории.



Сделан функционал выдачи данных запроса пользователю в zip-архиве, содержащем текстовый файл с данными.

Продолжалось выполнения проекта «База данных по наукам о Земле» – (Earth Science DataBase – ESDB) по созданию современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier). Осуществлена регистрация в Crossref двух баз данных и 5 наборов данных (рис. 4.2). Например, база данных новой геомагнитной обсерватории «Гюлагарак» (GLK) содержит результаты расчета значений элементов геомагнитного поля, зарегистрированных в обсерватории. Набор данных этой обсерватории – минутные значения компонент X, Y, Z и полной напряженности F магнитного поля Земли, начиная с февраля 2020 года.

 <b>Earth Science DataBase</b> GEOPHYSICAL CENTER RAS		Please enter the doi that you want to resolve: <input type="text" value="10.2205/KLI2011"/> <input type="button" value="SUBMIT"/>	
Title	Published Date		
Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG)	30 November 2020		
2017 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field	30 November 2020		
Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Gyulagarak (IAGA code: GLK)	30 November 2020		
Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Gyulagarak (IAGA code: GLK) (Dataset)	30 November 2020		
Mineral tracers of the alongshore sediment transport in the South-Eastern Baltic Sea (Data supplement)	15 October 2020		
Geochemical composition of Lower Gondwana sandstones of eastern Arunachal Himalayas, India	13 May 2020		
Data on geochemistry and petrology of two kimberlites at Krishtipadu from Gooty cluster, Andhra Pradesh, southern India	12 June 2020		

**Рисунок 4.2 – Интернет-страница главного репозитория проекта ESDB, сформированная в 2020 г. (<http://esdb.wdcb.ru/doi/2020.html>)**

Созданы страницы отклика для зарегистрированных баз данных и наборов данных, содержащие подробные описания публикуемых данных, информацию о месте хранения и образцы цитирования данных. Страницы доступны с веб-сайта центрального репозитория <http://esdb.wdcb.ru/>.

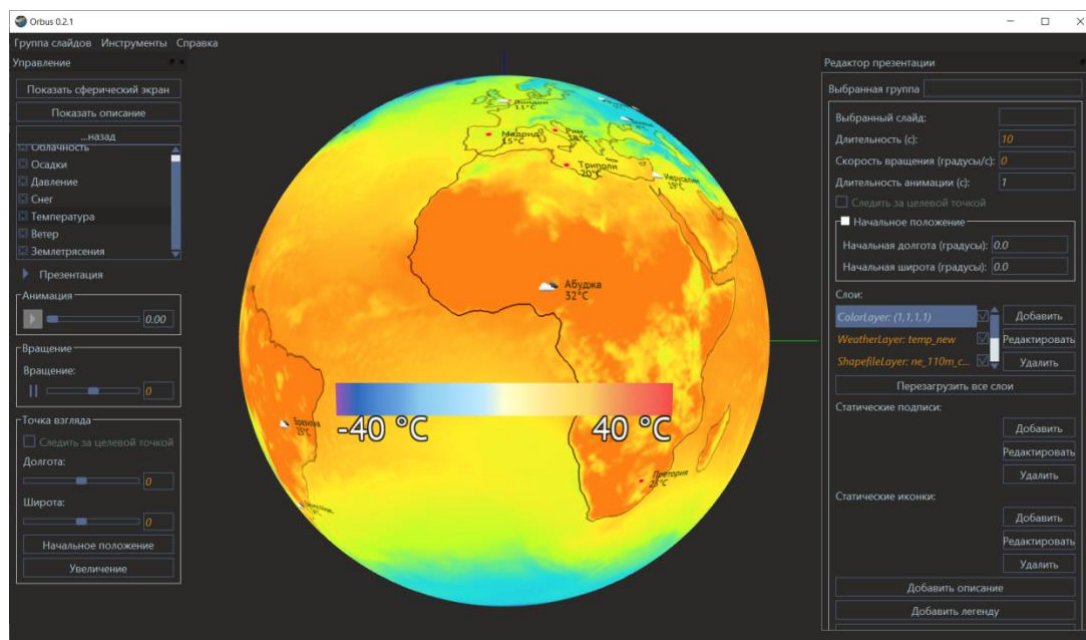
#### **4.2 Развитие БД сферических визуализаций – онлайн данные мониторинга геологических и геофизических процессов; улучшенные статические презентации**

В Геофизическом центре РАН накоплены большие объемы данных по наукам о Земле, а также собраны воедино сторонние открытые источники данных, позволяющие следить за глобальными погодными явлениями в режиме реального времени. Посредством

ПО ORBUS базы онлайн данных были адаптированы под сферический формат для визуализации с использованием цифрового демонстрационного комплекса со сферическим проекционным экраном, а значит, стали более визуально репрезентативными и доступными широкому кругу пользователей [Rybkina et al., 2015]. С 2014 по 2020 годы выполнения работ по НИР технологии сферической визуализации прошли несколько этапов развития [Одинцова и др., 2017]. Было создано несколько версий ПО для сферической визуализации, а также несколько БД со сферическими презентациями. Все результаты зарегистрированы в РОСПАТЕНТ [Rybkina et al., 2016; Одинцова и др., 2018].

В 2020 году был сделан упор на визуализацию в сферическом формате данных, доступных в режиме реального и квазиреального времени, а также улучшению качества уже имеющихся сферических презентаций в связи с возросшими требованиями к четкости и разрешению картинки.

В результате проведенных работ ПО ORBUS позволяет отображать онлайн данные, получаемые с сайта <https://openweathermap.org>, такие как: температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ), (рис. 4.3); атмосферное давление над уровнем моря (кПа); осадки (мм); скорость ветра (м/с); снежные осадки (мм); облачность (%). Данные загружаются с помощью предоставляемого OpenWeather API.



**Рисунок 4.3 – Распределение температуры воздуха по поверхности Земли**

В результате запроса ORBUS получает набор фрагментов карты (тайлов), которые сшиваются и преобразуются в единую равнопромежуточную цилиндрическую проекцию



на первом этапе, а затем в сферическую текстуру, непосредственно отображаемую в программе. Уровень детализации тайлов может задаваться по необходимости. В текстурах также редактируются цветовые параметры, расширяется диапазон по насыщенности, прозрачности, увеличивается контрастность для улучшения качества отображения.

Для построения шкал с диапазонами соответствующих параметров используется заданная OpenWeather цветовая схема. Привязка цвета к конкретному числовому значению параметра задается в xml-файле (рис. 4.4). На основании данного файла происходит отрисовка градиентной шкалы средствами ORBUS.

```
<legend name="кПа">
  <stop color="rgba(0,115,255, 1) "      value = "94"/>
  <stop color="rgba(0,170,255, 1) "      value = "96"/>
  <stop color="rgba(75,208,214, 1) "     value = "98"/>
  <stop color="rgba(141,231,199, 1) "    value = "100"/>
  <stop color="rgba(176,247,32, 1) "     value = "101"/>

  <stop color="rgba(240,184,0, 1) "      value = "102"/>
  <stop color="rgba(251,85,21, 1) "      value = "104"/>
  <stop color="rgba(243,54,59, 1) "     value = "106"/>
  <stop color="rgba(198,0,0, 1) "       value = "108"/>
</legend>
```

**Рисунок 4.4. – Код файла для задания шкалы**

С помощью API OpenWeather также загружаются данные о погоде в конкретных городах. Список необходимых наименований передается на сервер OpenWeather, а ответ содержит такие данные, как осадки, облачность, температур и прочее. Полученные данные преобразуются в графический объект (плоский текст и иконка) и отображаются поверх сферической текстуры.

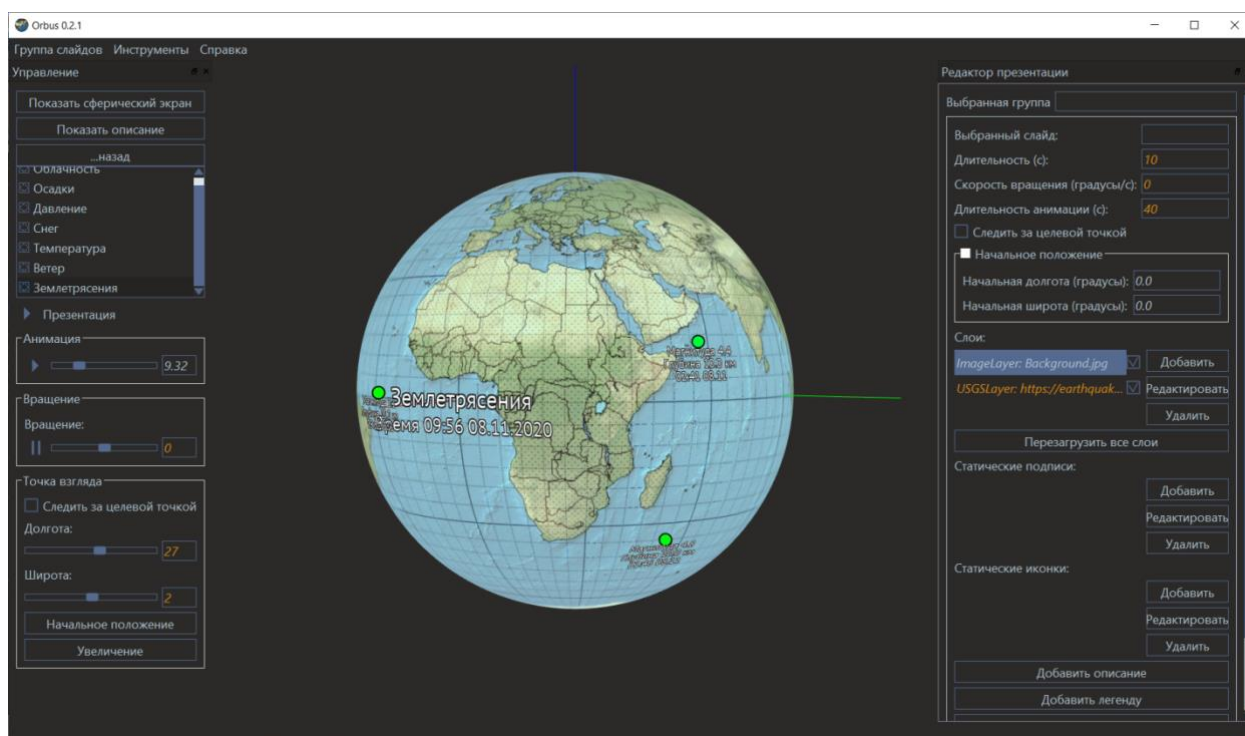
Кроме онлайн-данных OpenWeather в ORBUS отображаются данные о землетрясениях с сайта <https://www.usgs.gov>. USGS предоставляет API для получения данных. В запросе, отправляемом на сервер USGS, можно указать интересующий пользователя период (например, 2 недели). В результате возвращается ответ в виде json-файла с данными о координатах, дате, времени магнитуде и глубине произошедших за указанный период землетрясений.

Далее в ORBUS осуществляется парсинг json файла, отрисовка метки и сопутствующей текстовой информации (рис. 4.5) в точке с координатами соответствующего землетрясения. В зависимости от магнитуды изменяется цвет метки. Метки землетрясений для лучшей читаемости отображаются не одновременно, а по



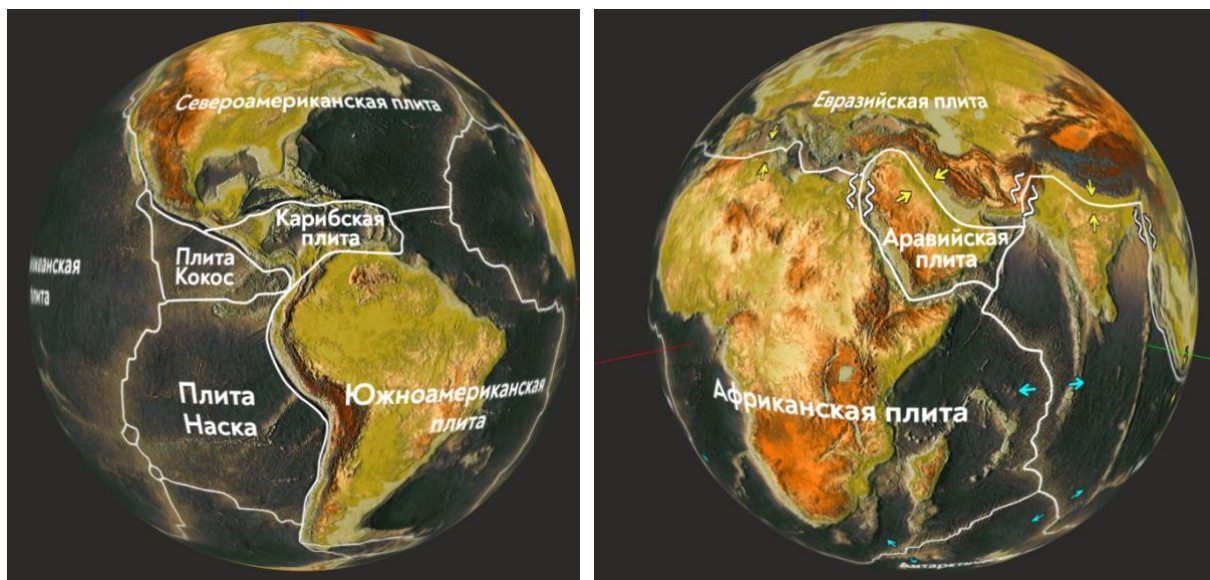
очереди, в зависимости от времени и даты произошедшего землетрясения. Интересуемое время пользователь может выбрать посредством ползунка анимации.

В связи с улучшением аппаратной части Комплекса возрастают требования и к качеству проецируемых на него изображений. За текущий год была проведена работа по улучшению и повторной более качественной детальной отрисовке ряда статических и анимированных сферических презентаций: планеты, звезды и спутники Солнечной системы (Марс, Нептун, Земля, Титан), глобальные явления (извержения вулканов, движение литосферных плит, течения Мирового океана), а также 3D-модели для визуализаций с дополненной реальностью. В результате проведенных работ все растровые изображения получили лучшее разрешение и более гармоничную цветовую гамму.



**Рисунок 4.5 – Онлайн-данные по землетрясениям**

Готовые отрисованные слои посредством ПО ORBUS собираются в динамические презентации. Одним из примеров такой автоматизированной сборки является презентация, отражающая движение литосферных плит: созданы текстуры с границами литосферных плит Земли и схемой их движения (рис. 4.6).



**Рисунок 4.6 – Литосферные плиты Земли**

Аналогично всем визуализациям, созданным за время выполнения предыдущих этапов НИР, любой из тематических разделов может быть транслирован непосредственно на цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном либо доступен к просмотру через пользовательский интерфейс ПО ORBUS [Самохина и др., 2018a; Odintsova et al., 2018]

Постоянное пополнение числа сферических визуализаций – важный процесс, позволяющий обеспечивать более тесное и эффективное взаимодействие научного сообщества с образовательными учреждениями, и выводящий популяризацию научных знаний на новый уровень, доступный широкому кругу потребителей [Самохина и др., 2018б].

#### **4.3 Задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений**

В 2020 г. исследования были направлены на всесторонний анализ полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений.

На основе анализа развития и применения классического подхода ЕРА (Earthquake-Prone Areas) [Гвишиани и др., 1988, 2020; Кособоков и Соловьёв, 2018; Соловьёв и др., 2014 и др.] сделан вывод, что он является эффективным средством для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Это подтверждается анализом данных о сильных землетрясениях, которые произошли в изученных регионах после получения соответствующих результатов. Другими аргументами в пользу достоверности ЕРА служат разработка и выполнение многочисленных контрольных экспериментов,

позволяющих оценивать достоверность получаемых результатов, применение теории динамических и предельных задач распознавания, а также устойчивость результатов при применении различных алгоритмов распознавания, включая алгоритм «Барьер-3» [Гвишиани и др., 2017; Дзобоев и др., 2019; Dzeboev и др., 2019.], использующий обучающую выборку только высокосейсмичного класса. Алгоритм «Барьер-3» создан в 2019 г. в Геофизическом центре РАН.

Особое значение имеет опыт применения в одних и тех же регионах наряду с подходом ЕРА (блок распознавания: «Кора-3», «Подклассы», «Хемминг», «Барьер-3» и др.) метода FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2016; Дзобоев и др., 2018 и др.], разработанного в 2013 г. в Геофизическом центре РАН. Результаты, полученные независимо с помощью этих двух принципиально отличающихся подходов, демонстрируют хорошую согласованность и тем самым дают аргументы в пользу их достоверности.

На основе совместного применения методов ЕРА и FCAZ открываются перспективы создания единого метода системного анализа для более глубокого изучения проблемы выделения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Для создания такого метода необходимо разработать с помощью теории нечетких множеств [Агаян и др., 2005; Гвишиани и др., 2008а, 2008б, 2010 и др.] процедуры интегрирования воедино баз данных и знаний, построенных отдельно с помощью ЕРА и FCAZ. Конечным результатом этого могло бы стать создание автоматизированных методов интегрирования исходной информации и результатов исследований в единые базы данных и знаний.

Единая база данных должна строиться таким образом, чтобы обеспечить эффективное извлечение из нее информации широким кругом пользователей, не имеющих специальной подготовки в области предмета исследования и системного анализа. В идеале, запросы к базе данных могут формулироваться на неформальном языке человеческого общения с возможностью прямого голосового обращения. Встроенный в базу искусственный интеллект (ИИ) должен конвертировать запрос в ее формальный внутренний язык с дальнейшим представлением ответа на общедоступном содержательном языке. В качестве первого шага в этом направлении может рассматриваться создание в Геофизическом центре РАН ГИС-ориентированной базы данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма [Соловьёв и др., 2018а]. В дальнейшем ее планируется расширять путем включения данных по другим регионам.

Внедрение столь продвинутого сегодня ИИ имеет исключительную важность не только в вышеуказанном аспекте. Он также должен «отслеживать» все новые знания, последовательно полученные в решениях каждой следующей задачи распознавания мест



возможного возникновения землетрясений в тех или иных регионах. Эти знания ИИ должен автоматически накапливать в единой базе данных ERA–FCAZ. При проведении исследований в новых регионах ИИ мог бы целенаправленно предоставлять исследователю выдержки из накопленной информации.

На основании опыта применения ERA и FCAZ можно сделать вывод о необходимости непосредственного использования получаемых с их помощью результатов при оценке сейсмической опасности и, в частности, в целях сейсморайонирования. Вопросы использования этих результатов для оценки сейсмической опасности и разработки мероприятий по сокращению ущерба от землетрясений рассмотрены в работах [Peresan *et al.*, 2011, 2015 и др.]. Это потребует дальнейшего развития методов ERA/FCAZ в направлении адаптации их результатов для использования в планировании сейсмостойкого строительства. В частности, необходима разработка методов системного анализа для комбинирования результатов ERA («Кора-3», «Подклассы», «Хемминг», «Барьер-3» и др.) и FCAZ, а также алгоритмов для оценки положения будущего протяженного очага землетрясения. Это позволит использовать результаты распознавания, полученные методами ERA и FCAZ, при выборе, в частности, мест строительства объектов повышенной ответственности: АЭС, могильники ядерных отходов, крупные химические производства и др.

#### 4.4 Развитие ГИС-инфраструктуры ГЦ РАН

Развиваемая в ГЦ РАН ГИС-инфраструктура основана на стандартном клиент-серверном подходе. В целом система состоит из трех ключевых сегментов: БД-сервер, на котором размещается база геопространственных данных; ГИС-сервер, на котором размещаются картографические сервисы и инструменты для обработки и анализа геопространственных данных; веб-сервер, на котором размещается клиентское приложение [Соловьёв и др., 2018б].

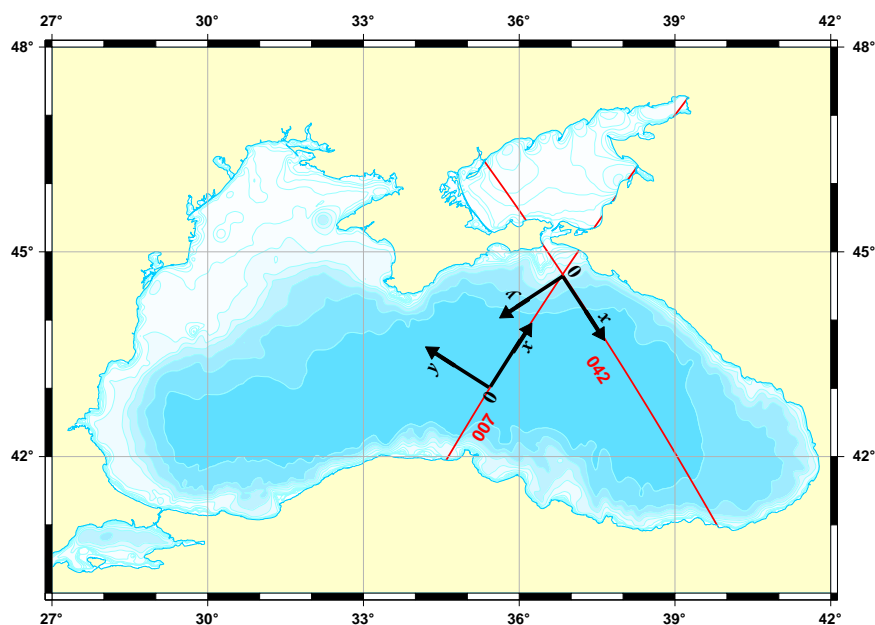
Взаимодействие пользователя с картографическими сервисами осуществляется средствами специализированного геопортала (<http://gis.gcras.ru/>). Функциональные возможности геопортала обеспечивают эффективное пользовательское взаимодействие с пространственными данными, хранящимися в БД. Ядром геопортала является клиентское картографическое веб-приложение, размещаемое на веб-сервере и обеспечивающее доступ к каталогу опубликованных картографических сервисов и набору стандартных и пользовательских инструментов и средств анализа данных. Клиентское приложение создано с использованием проприетарной программной среды ESRI Web AppBuilder и ArcGIS Portal.

При этом следует отметить, что разрабатываемый геопортал позволяет организовать доступ не только к картографическим сервисам, опубликованным на ГИС-сервере ГЦ РАН, но также и к сервисам сторонних организаций (ВСЕГЕИ, Росреестр и др.). В настоящее время этот подход широко используется в современной практике [Fu, 2016]. В ходе дальнейшей работы по данной теме НИР планируется расширение функционала приложения за счет включения новых инструментов работы с геопространственными данными.

#### 4.5 Исследование сезонной и межгодовой изменчивости водообмена между Черным и Азовским морями и через Керченский пролив

Для анализа аномалий водообмена между Черным и Азовским морями и через Керченский пролив использовались альтиметрические измерения со спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3, что объясняется точностью измерений высоты морской поверхности (ВМП), хорошим пространственным разрешением измерений уровня моря и возможностью объединения временных рядов измерений аномалий уровня моря этих трех спутников в единый ряд для каждого трека.

Положение 007 и 042 треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 (рис. 4.7) оптимально для анализа водообмена между Черным и Азовским морями через Керченский пролив. Части этих треков, расположенные выше точки пересечения, захватывают как основное черноморское течение, так и течения, связанные с водообменом между морями и через пролив.



**Рисунок 4.7 – Положение 007 и 042 треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 на акватории Черного моря и оси координат для расчета водообмена через эти треки**

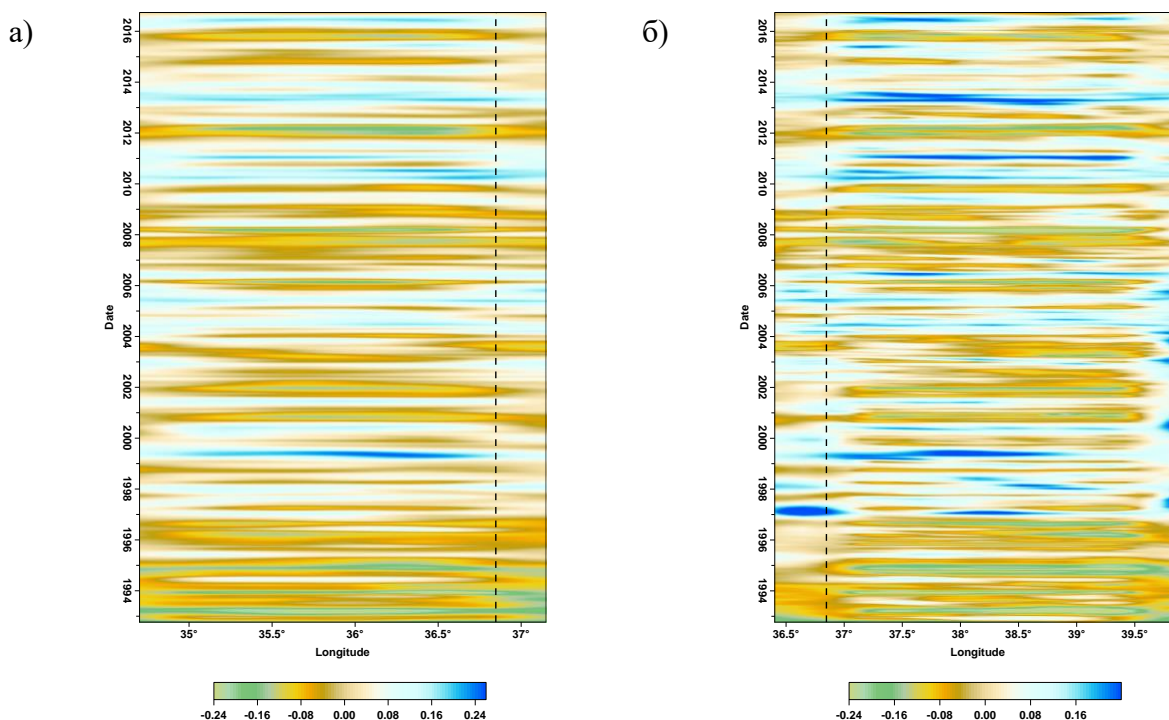


Для анализа временной изменчивости аномалий водообмена через трек необходимо знать аномалии скоростей на поверхности, связанные с аномалиями динамической топографии или аномалиями уровня моря, определяемые по данным спутниковой альтиметрии, и глубину моря вдоль трека.

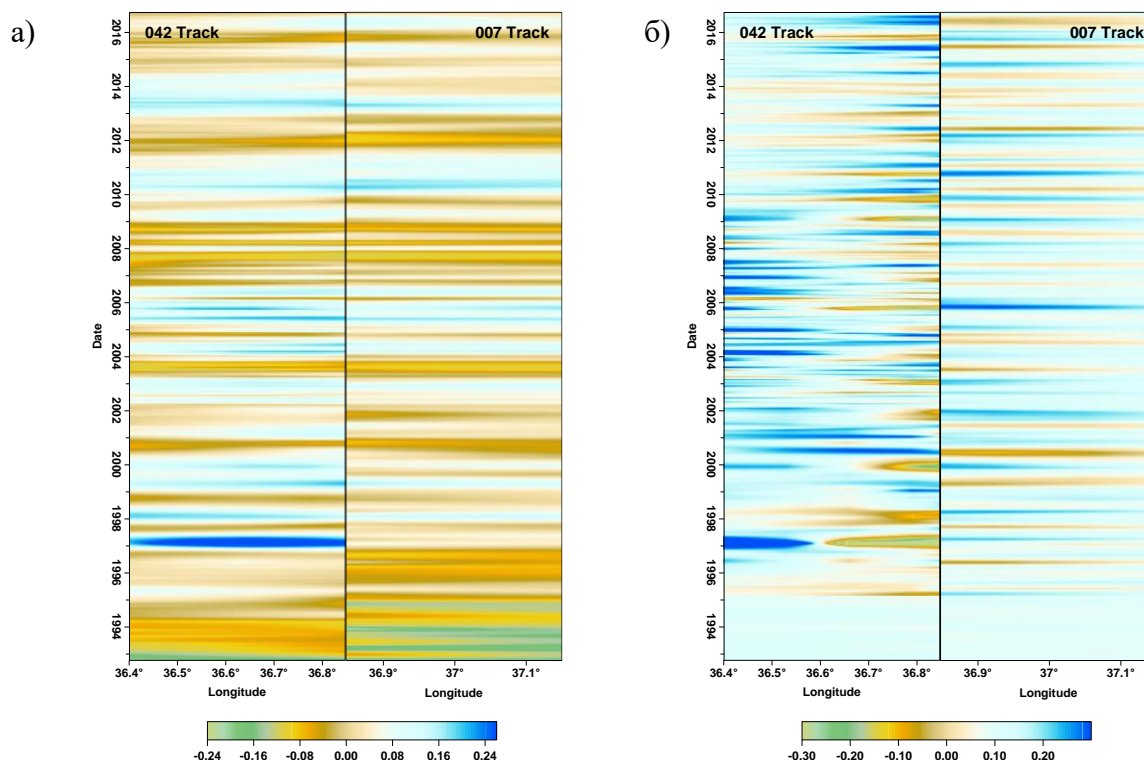
Аномалии уровня моря рассчитываются по данным о ВМП относительно средней высоты поверхности моря DTU15 MSS [Andersen *et al.*, 2016]. Результаты расчета аномалий уровня, рассчитанные относительно этой модели вдоль 007 и 042 треков, представлены на рисунке 4.8. Для наших расчетов будут использованы части треков, расположенных севернее точки пересечения, положение которой выделено на рисунке штриховой линией.

Данные альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 обрабатывались с учетом всех необходимых поправок с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии, разработанного в ГЦ РАН [Лебедев, 1996; Medvedev *et al.*, 1997; Лебедев и Медведев, 2000; Лебедев и Костяной, 2005].

Временная изменчивость поверхностных геострофических скоростей, направленных по нормали к границам области, ограниченной 007 и 042 треками севернее точки их пересечения, представлена на рисунке 4.9.



**Рисунок 4.8 – Временная изменчивость аномалии уровня (м) Черного моря вдоль 007 (а) и 042 (б) треков. Штриховой линией показано положение точки пересечения этих треков**

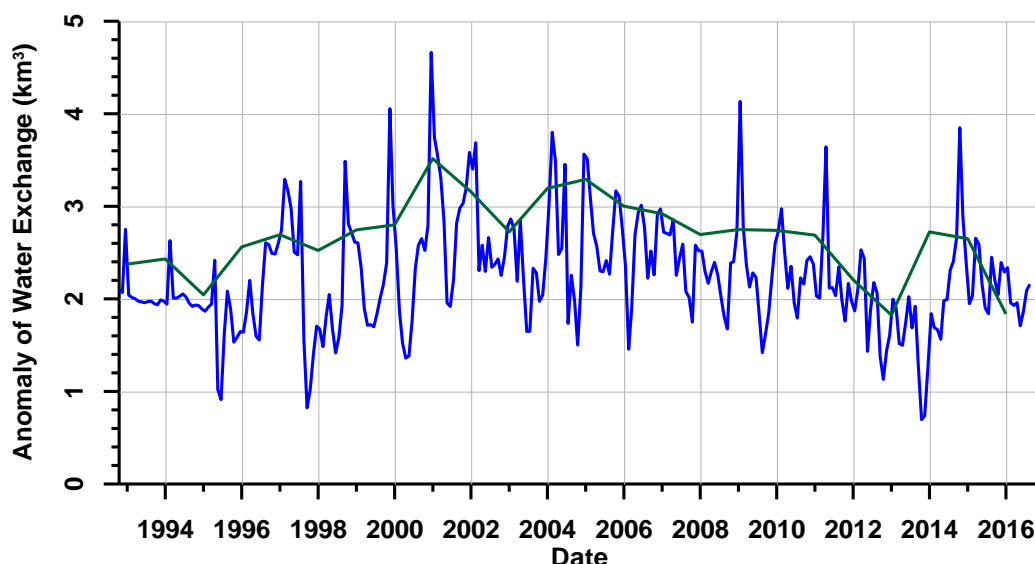


**Рисунок 4.9 – Временная изменчивость (а) аномалий высот морской поверхности (м) вдоль границ и (б) поверхностных геострофических скоростей (м/с), направленных по нормали к границам области, ограниченной 007 и 042 треками севернее точки их пересечения**

Положительные значения для 042 трека соответствуют юго-западному направлению течения, отрицательные значения – северо-восточному, для 007 трека соответственно северо-западному и юго-восточному. Хорошо видно, что основные максимальные скорости течений, связанные с водообменом между Черным и Азовским морями через Керченский пролив, наблюдаются на границе 042 трека. В этой области аномалии геострофических скоростей превышают 20 см/с.

Временная изменчивость аномалий водообмена между Черным и Азовским морями через Керченский пролив, рассчитанных по методике, предложенной в работах [Lebedev & Kostianoy, 2019, 2020], показывает сезонную и межгодовую изменчивость его значений (рис. 4.10).

Максимальные амплитуды аномалий водообмена достигают более 4 км<sup>3</sup>. Максимальные значения аномалий водообмена наблюдались в 2000, 2003 и 2015 годах. Начиная с 2001 года по 2013 включительно водообмен через Керченский пролив уменьшался со скоростью –  $0,082 \pm 0,264$  км<sup>3</sup>.



**Рисунок 4.10 – Временная изменчивость аномалий среднемесячного (синяя линия) и годового (зеленая линия) ( $\text{км}^3$ ) аномалий водообмена между Черным и Азовским морями через Керченский пролив по данным спутниковой альтиметрии**

#### **4.6 Редакционно-издательская подготовка материалов для публикации в изданиях ГЦ РАН**

Журнал «Russian Journal of Earth Sciences» (RJES) (<http://rjes.wdcb.ru/>) издается с 1998 года. В журнале публикуются оригинальные статьи на английском языке, посвященные наиболее важным достижениям во всех областях геологии, геофизики и геохимии, в том числе геоинформатики, экологии и физики атмосферы и океана.

Благодаря редакционной политике журнала, направленной на строгий отбор научных статей исключительно по указанной тематике, высокому уровню редакторов по направлениям и рецензентов, а также слепому рецензированию удастся достичь международного уровня научных статей. Следствием этого стало улучшение показателей качества журнала в библиографической базе данных Scopus. В 2020 году RJES впервые был включен в третий квартиль (Q3) в отрасли знаний «General Earth and Planetary Sciences». Показатели в библиографической базе данных Scopus для журнала рассчитаны впервые, хотя он начал индексироваться в 2018 году, поэтому попадание в третий квартиль подтверждает, что журнал является в полной мере авторитетным международным изданием в области наук о Земле.

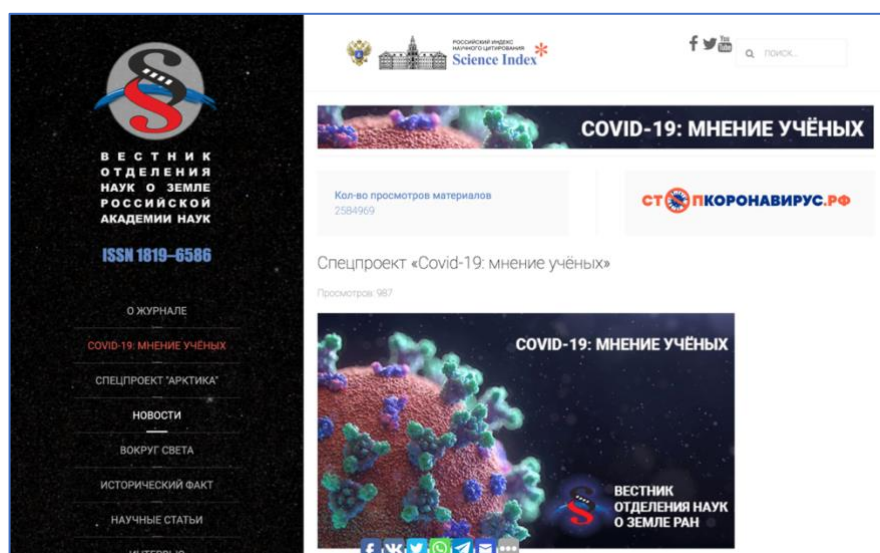
Наряду с этим RJES индексируется системой Web of Science (Core Collection: Emerging Sources Citation Index), Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), входит в перечень ВАК и зарегистрирован в системе Crossref, каждая опубликованная в журнале статья имеет идентификатор DOI.

Еще одним положительным фактором явилось расширение географии авторов, если ранее в журнал поступали статьи из Ирана, Турции, Индии, то в 2020 году появились статьи с авторами из Канады, Австралии и США, что повышает статус журнала в формальной оценке этими же библиографическими базами.

В 2020 году в 4 номере RJES был опубликован специальный выпуск, посвященный Ефиму Наумовичу Пелиновскому к 75-летию со дня рождения под редакцией Е. Г. Морозова, Т. Г. Талиповой, О. Е. Куркиной.

Научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» (<http://onznews.wdcb.ru/>) издается в новом формате электронного мультимедийного журнала с сентября 2009 г. Новости в нем обновляются ежемесячно. Журнал зарегистрирован и индексируется в РИНЦ и Crossref. Наряду с официальными документами, в журнале публикуются материалы о наиболее значимых и интересных событиях в жизни Отделения наук о Земле РАН и его институтов, таких как международные и российские научные конференции, заключения договоров и важнейших научных соглашений по тематике ОНЗ РАН, развитие новых научных и научно-технических проектов, материалы о международном сотрудничестве институтов.

2020 год ознаменовался пандемией коронавируса COVID-19, это обстоятельство не могло не отразиться на страницах журнала «Вестник ОНЗ РАН». Редколлегия приняла решение создать спецпроект «Covid-19: мнение учёных» (рис.4.11), посвященный различным аспектам влияния новой коронавирусной инфекции на жизнь общества.



**Рисунок 4.11 – Страница спецпроекта журнала «Вестник ОНЗ РАН» «Covid-19: мнение учёных»**

Представители Отделения наук о Земле РАН с энтузиазмом откликнулись на просьбу принять участие в формировании совместного мнения, дав интервью или комментарии редакции журнала. В подготовке материалов для спецпроекта приняли



участие учёные с мировым именем – академики, члены-корреспонденты и профессора ОНЗ РАН.

Сериальное электронное издание «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» (<http://ebooks.wdcb.ru/>) содержит публикации научных статей, тематика которых связана с информационными технологиями, внедренными в науки о Земле, научных отчетов, тезисов конференций, инструкций и т.д. Статьи и книги в этой серии публикуются с использованием самых современных технологий электронного издательства, включая мультимедийный и интерактивный контент.

По итогам 2020 г. опубликовано:

- в 20 томе журнала «Russian Journal of Earth Sciences» – 6 номеров (47 статей);
- в «Вестник ОНЗ РАН» – 645 новостных сообщений, 3 научные статьи;
- в «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» – 1 отчет.

Современный научный журнал должен базироваться на программной платформе, реализующей развитую систему сервисов для работы с цифровым контентом, позволяющей оптимизировать рабочий процесс. В конце 2019 года в качестве такой платформы была выбрана Open Journal Systems (OJS), предназначенная для создания рецензируемых электронных журналов с открытым доступом и позволяет не только публиковать статьи в интернете, но и организовывать весь рабочий процесс издательского дела: прием, рецензирование и каталогизирование статей. В 2020 году был осуществлен частичный переход на новую систему, включающую новый веб-сайт RJES (рис. 4.12). Для более безболезненного перехода, как для редакции журнала, так и для авторов и рецензентов было принято решение сохранить старую версию веб-сайта журнала при работающей новой.



Рисунок 4.12 – Новый веб-сайт журнала «Russian Journal of Earth Sciences»



**Список использованных источников**

Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Гвишиани А. Д., Граева Е. М., Злотники Ж., Родкин М. В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования. – 2005. – № 1. – С. 143–155.

Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Ранцман Е. Я., Систернас А., Соловьёв А. А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. – М.: Наука, 1988. – 176 с.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. – 2008а. – № 5. – С. 26–31.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. – 2008б. – Т. 44, № 3. – С. 3–18.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьёв А. А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 109–125.

Гвишиани А. Д., Дзобоев Б. А., Агаян С. М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. – 2016. – № 4. – С. 3–23. – DOI: 10.7868/S0002333716040013.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Дзобоев Б. А., Белов И. О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 474, № 1. – С. 86–92. – DOI: 10.7868/S0869565217130175.

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

Дзобоев Б. А., Агаян С. М., Жарких Ю. И., Краснощёков Р. И., Барыкина Ю. В. Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли. – 2018. – № 2. – С. 96–103. – DOI: 10.7868/S0002333718020084.

Дзобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О., Татаринов В. Н., Агаян С. М., Барыкина Ю. В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье.  $M \geq 6,0$  // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 33–47. – DOI: 10.31857/S0002-33372019433-47.

Кособоков В. Г., Соловьёв А. А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. – 2018. – Т. 19, Вып. 4. – С. 53–88. – DOI: 10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90.

Лебедев С. А. Возможности автоматизированной реляционной геоинформационной оперативной системы АРГОС при работе со спутниковой информацией // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 2. – С. 110–115.

Лебедев С. А., Медведев П. П. Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии // Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». 15 – 17 ноября 2000, Москва. – Часть 2. – М.: ИО РАН. – 2000. – С. 52–57.

Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. – 353 с.



Одинцова А. А., Гвишиани А. Д., Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова А. А., Фирсова Е. Ю. Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и вебсервис (Часть I) // Геоинформатика. – 2017. – № 4. – С. 2–6.

Одинцова А. А., Гвишиани А. Д., Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова А. А., Фирсова Е. Ю. Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и вебсервис (Часть II) // Геоинформатика. – 2018 – № 1. – С. 3–10.

Самохина О. О., Пресняков С. В., Рыбкина А. И. Цифровой демонстрационный комплекс со сферическим экраном: новые проекционные технологии и расширенный функционал ORBUS 2.0 // Научная визуализация. – 2018а. – Т. 10, № 5. – С. 45–56. – DOI: 10.26583/sv.10.5.04.

Самохина О. О., Рыбкина А. И. Сферические технологии как инновационный подход к школьному образованию: простая и наглядная подача сложного материала // Вестник Московского университета. Серия 20. Педагогическое образование. – 2018б. – № 4. – С. 91–98. – ISSN 2073-2635.

Соловьёв А. А., Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Добровольский М. Н., Новикова О. В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. – 2014. – № 2. – С. 3–20. – DOI: 10.7868/S0002333714020112.

Соловьёв А. А., Соловьёв А. А., Гвишиани А. Д., Николов Б. П., Николова Ю. И. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исследование Земли из космоса. – 2018а. – № 5. – С. 42–54.

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

Andersen O. B., Piccioni G., Stenseng L., Knudsen P. The DTU15 MSS (mean sea surface) and DTU15LAT (lowest astronomical tide) reference surface // Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2016, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016.

Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V., Karapetyan J. K., Sergeeva N. A. Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6.0$ . Variable EPA method // Russian Journal of Earth Sciences. – 2019. – Vol. 19. – ES6005. – DOI: 10.2205/2019ES000691.

Fu P. How to stop worrying and getting to know Web GIS. – Redlands, CA, USA: ESRI Press, 2016. – 422 p.

Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Interannual Variability of Water Exchange Anomalies Between the Northern, Middle and Southern Caspian Based on Satellite Altimetry Data // Ecologica Montenegrina. – 2019. – Vol. 25. – P. 106–115.

Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Investigation of seasonal and interannual variability of water exchange through the Middle Caspian based on satellite altimetry // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2020. – Vol. 17, No. 6. – P. 103–109. – DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-103-109.

Medvedev P. P., Lebedev S. A., Tyupkin Yu. S. An Integrated Database of Altimetry Satellite for Fundamental Geosciences Research // Proc. 1st East-European Symp. Advances in Data Bases and Information Systems (ADBIS'97). St.-Petersburg, Russia, 25 September 1997. – Vol. 2. – SPb: St.-Petersburg Univ. 1997. – P. 95–96.

Odintsova A., Gvishiani A., Nakicenovic N., Rybkina A., Busch S., Nikolova J. The world's largest oil and gas hydrocarbon deposits: ROSA database and GIS project development

// Russian Journal of Earth Sciences. – 2018. – Vol. 18. – ES3002. – DOI: 10.2205/2018ES000621.

Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F., Gorshkov A., Panza G. F. Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy // Pure and Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 168, Is. 3–4. – P. 583–607. – DOI: 10.1007/s00024-010-0166-1.

Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G. F. The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment // Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata. – 2015. – Vol. 56, Is. 2. – P. 295–328. – DOI: 10.4430/bgta0141.

Rybkina A. I., Bobkov A. E., Nikiforov O. V., Pyatygina O. O. Hardware and software system for visualization of geophysical data on a spherical screen // Scientific Visualization. – 2015. – Vol. 7, No. 2. – P. 38–49. – ISSN 2079-3537. URL: <http://sv-journal.org/2015-2/04.php?lang=en> (дата обращения 03.03.2021).

Rybkina A. I., Odintsova A. A., Gvishiani A. D., Samokhina O. O., Astapenkova A. A. Development of geospatial database on hydrocarbon extraction methods in the 20th century for large and super large oil and gas deposits in Russia and other countries // Russian Journal of Earth Sciences. – 2016. – Vol. 16. – ES6002. – DOI: 10.2205/2016ES000584.

Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., Krasnoperov R. Historical K index data collection of Soviet magnetic observatories, 1957–1992 // PANGAEA. – 2020. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.922233>.

## 5 Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений

Номер темы в ИСГЗ: 0124-2019-0006

Номер регистрации: AAAA-A19-119101590122-8

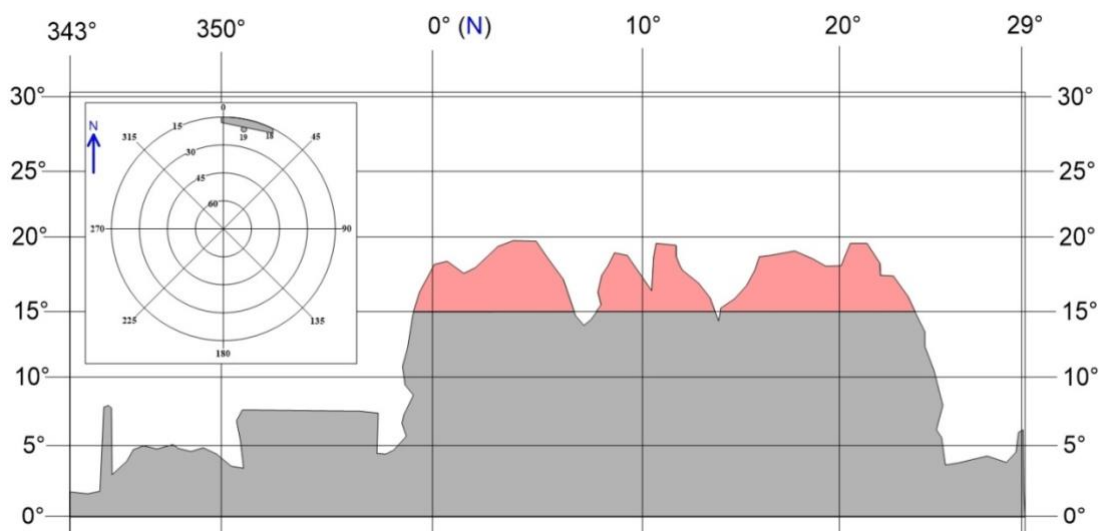
Руководитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров

Ответственный исполнитель: г.н.с., д.т.н., проф. В. Г. Гетманов

### 5.1 Развитие ГНСС-измерений на территории геомагнитной обсерватории «Климовская» (Архангельская область)

В 2020 году были продолжены работы, связанные с установкой и настройкой ГНСС-аппаратуры на геодезическом пункте на территории геомагнитной обсерватории «Климовская» (Архангельская область), получившем условное обозначение KLIM. Работы включали в себя повторную установку ГНСС-приемника, оценку помех для приема радиосигнала антенной, которые создает столб с приборной панелью приемника ГНСС, а также оценку состояния геодезического пункта и его приборов.

Для оценки помех в радиосигнале от столба с аппаратурой ГНСС и подведенной к нему линией электропитания (примерно 10 м в направлении на север от геодезического центра) был составлен абрис радиопомех в плане и в поперечном разрезе (абрисы приведены на рисунке 5.1).



**Рисунок 5.1 – Абрис радиопомех в плане (врезка в левом углу рисунка) и в разрезе, в направлении главного здания и столба с приборной панелью**

Абрис радиопомех был также наложен на фото в направлении от антенны ГНСС к столбу (приведен на рисунке 5.2).

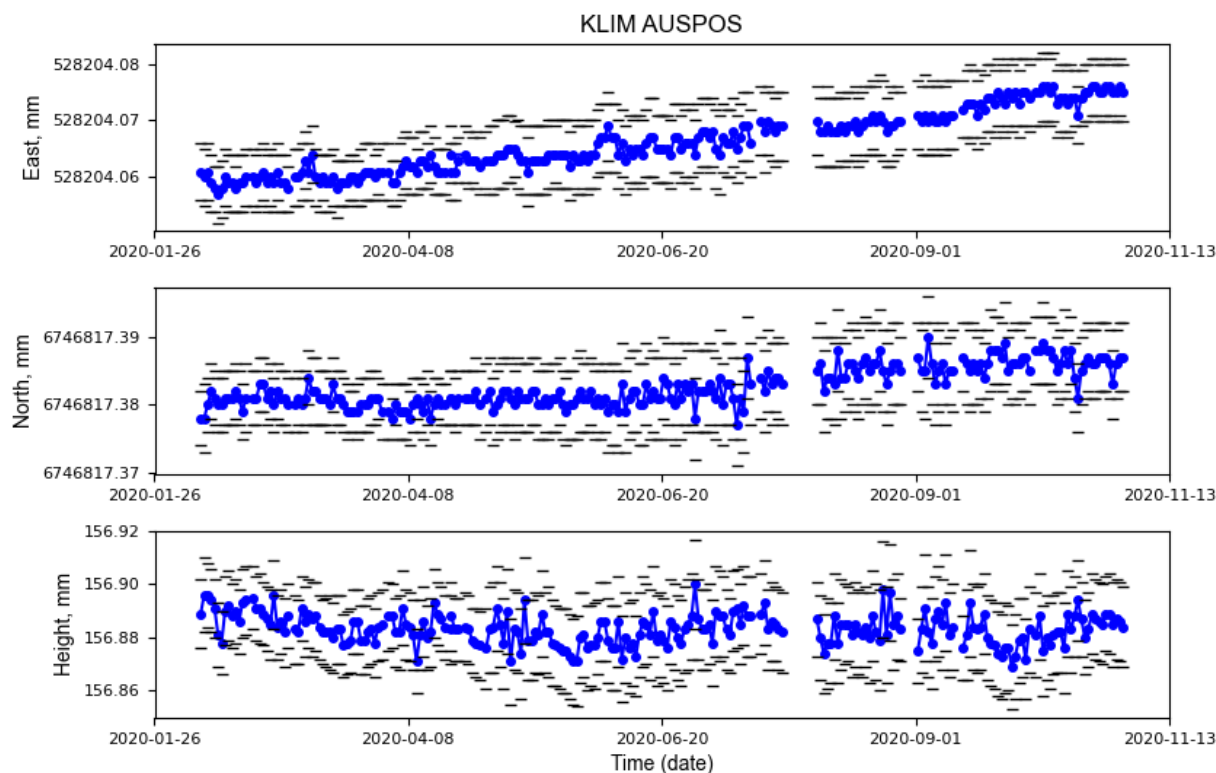


**Рисунок 5.2 – Абрис радиопомех, наложенный на фото со стороны антенны ГНСС**

Установлено, что основные помехи для радиосигнала есть в направлении на север в интервале азимута  $0^{\circ}$ – $25^{\circ}$  и по маске возвышения до  $20^{\circ}$ . Это соответствует в целом хорошим условиям для приема радиосигнала от спутников.

Данные измерений ежедневно передаются в ГЦ РАН в формате jrs фирмы-изготовителя приемника Javad. Далее файлы переводятся в формат RINEX 2.11 и выкладываются на FTP-сервер ГЦ РАН. Для обработки результатов измерений было принято решение использовать сервисы онлайн-обработки результатов ГНСС-измерений, что позволит получать координаты в международной системе ITRF2014 и уравнивать пункт KLIM с пунктами IGS во время обработки результатов измерений. Обработка велась несколькими сервисами, что позволяет дополнительно сравнить и программное обеспечение, и методы обработки. В результате тестирования были отобраны 3 сервиса, которые оказались наиболее пригодны для обработки файлов записей измерений пункта KLIM. Это сервисы OPUS, AUSPOS, CSRS-PPP. ГНСС-измерения на пункте KLIM были обработаны за период с 09.02.2020 по 31.10.2020. По полученным данным были построены временные ряды приращения координат пункта (пример приведен на рисунке 5.3).





**Рисунок 5.3 – Временной ряд приращений координат пункта KLIM, обработанный сервисом AUSPOS**

Достаточно низкие значения среднеквадратических отклонений определения координат дают возможность делать некоторые предварительные выводы о характере смещений геодезического пункта. Об устойчивости геодезического центра можно говорить после набора достаточного количества данных (более 1 года). На время 31 октября 2020 года была посчитана средняя скорость смещения геодезического пункта KLIM по результатам обработки тремя сервисами. В таблице 5.1 для сравнения представлены результаты оценки среднегодовой скорости двух ближайших пунктов международной геодезической сети IGS. Это пункт SVTL на расстоянии около 530 км, который находится на территории Российской Федерации (Ленинградская область) и пункт SOD3 на расстоянии около 965 км, который находится на территории Финляндии.

**Таблица 5.1 – Средняя скорость движения пункта KLIM**

ПО	$V_E$ , мм/год	$V_N$ , мм/год	$V_U$ , мм/год	$\sigma_E$ , мм	$\sigma_N$ , мм	$\sigma_U$ , мм
KLIM AUSPOS	19,3	12,4	-6,9	-	-	-
KLIM OPUS	24,8	12,4	12,4	-	-	-
KLIM CSRS-PPP	23,4	16,5	-17,9	-	-	-
SVTL	21,1	12,15	2,38	0,15	0,16	0,73
SOD3	18,1	13,8	7,48	0,17	0,19	0,83

Можно видеть хорошую сходимость скорости смещения в направлении на запад и север разных вариантов обработки данных пункта KLIM и пунктов SVTL, SOD3. Скорости близки друг к другу по численным значениям, соотношениям и направлениям. Оценка скорости вертикальных движений пункта KLIM непредставительна в виду больших значений СКО, разбросов между разными сервисами обработки и несоответствия ближайшим пунктам IGS.

Таким образом, можно заключить, что в настоящий момент пункт находится в процессе стабилизации. Пока невозможно достаточно уверенно судить о характере вертикальных смещений.

## **5.2 Разработка методики и программы проведения регулярных наблюдений на пунктах векового хода магнитного поля Земли**

В 2020 г. в рамках планирования работ по налаживанию регулярных измерений на пунктах векового хода (ПВХ) выполнен предварительный анализ изученности территории России и СНГ сетью ПВХ и сформулирован ряд соображений по методике наблюдений на ПВХ. Сеть пунктов векового хода (ПВХ) на территории Советского Союза была создана как дополнение к сети магнитных обсерваторий в 1922 году. Одним из значимых результатов этой съемки явилось изучение и последующая разработка месторождений Курской магнитной аномалии. До 1980-х годов работу на ПВХ территории Советского Союза выполняли организации, подведомственные Госкомгидромету СССР и Академии наук. Стандартный интервал опроса всей сети ПВХ составлял 5 лет и был привязан к периоду обновления карт нормального магнитного поля и его вековых вариаций (карты издавались для эпох, кратных 5 годам). В 1990-е годы регулярные повторные наблюдения на ПВХ были приостановлены вместе с сокращением сети магнитных обсерваторий. Регулярные наблюдения на ПВХ в эпоху 1990 года и в последующие пятилетние эпохи не проводились. Вероятно, некоторая часть существующих ПВХ утрачена или более непригодна для измерений ввиду наличия источников помех. О состоянии сети российских ПВХ судить можно только при ее обследовании. Актуальность развития и поддержки сети ПВХ важна в том числе по причине того, что спутниковые геомагнитные измерения, используемые для создания глобальных моделей магнитного поля Земли, также должны быть привязаны к наземным данным в магнитных обсерваториях и на пунктах векового хода. Редкая сеть магнитных обсерваторий и ПВХ в России создает большие сложности для построения качественных глобальных моделей магнитного поля Земли.



Накопленный опыт работ на пунктах векового хода, в том числе высокоширотных, позволяет высказать ряд предложений и рекомендаций как по организации наблюдений, так и по представлению их результатов.

- 1 Если пункт векового хода в точке с указанными координатами не обнаружен (не сохранился), нужно с максимально возможной точностью установить новый пункт по схемам и описаниям, а также азимуты визирных целей (мир). Если пункт непоправимо «засорен» наличием источников помех вблизи него, следует заложить новый пункт в наиболее свободном от искусственных помех месте – желательно в пределах той же геологической структуры, что и прежний ПВХ, и на расстоянии не более 1–2 км.
- 2 Для каждого ПВХ нужно иметь не менее 2–3 мир с различными азимутами. Это позволяет с высокой точностью восстановить положение столба ПВХ при его утрате. Также наличие 2 и более мир может оказаться полезным в случае их утраты или повреждения.
- 3 Количество полных серий угловых абсолютных измерений за время нахождения на ПВХ должно быть «оптимально-максимальным» и учитывать и погодные условия, и необходимость отдыха, и степень возмущенности магнитного поля в разное время суток. Как правило, наиболее интенсивные изменения происходят в местный полдень, но во время магнитных бурь наиболее возмущенными могут оказаться любые периоды времени внутри суток. Помимо этого, нужно учитывать расстояние от ПВХ до обсерваторий, по записям которых будет осуществляться приведение измерений к середине года. Чем больше это расстояние, тем больше вероятность неточного приведения измерений. Выбор наиболее спокойного времени для угловых магнитных измерений производится по текущим показаниям полевого протонного магнитометра, данным ближайших магнитных обсерваторий и индексам геомагнитной активности.
- 4 Для облегчения и ускорения измерений желательно иметь два деklinометра/инклинометра с взаимозаменяемыми электронными блоками. При этом на каждом из приборов будут выполняться только «контрольные» полные серии измерений 2–3 раза в сутки, а в остальное время с интервалом в 15–60 минут нужно следить за изменением только одного из восьми положений датчика (по вертикальному кругу для одного из теодолитов и по горизонтальному кругу для другого). Полные серии служат одновременно для контроля ориентационной поправки, (стабильности несовпадения оси датчика с оптической осью теодолита).

Помимо стандартно измеряемых на ПВХ угловых и силовых элементов предложено рассчитывать 4 новые характеристики магнитного поля: *координаты расчетного магнитного полюса* ( $\Theta$ ,  $\Lambda$ ), величину *локальной магнитной постоянной* ( $G$ ), физический смысл которой – степень недипольности поля, и *расстояние от точки наблюдения до расчетного магнитного полюса* ( $L$ ).

### 5.3 Развитие видов геофизических наблюдений на российских геофизических обсерваториях, включая пункты наблюдений в Арктической зоне РФ

#### 5.3.1 Аэромагнитная съемка территории магнитной обсерватории «Казань»

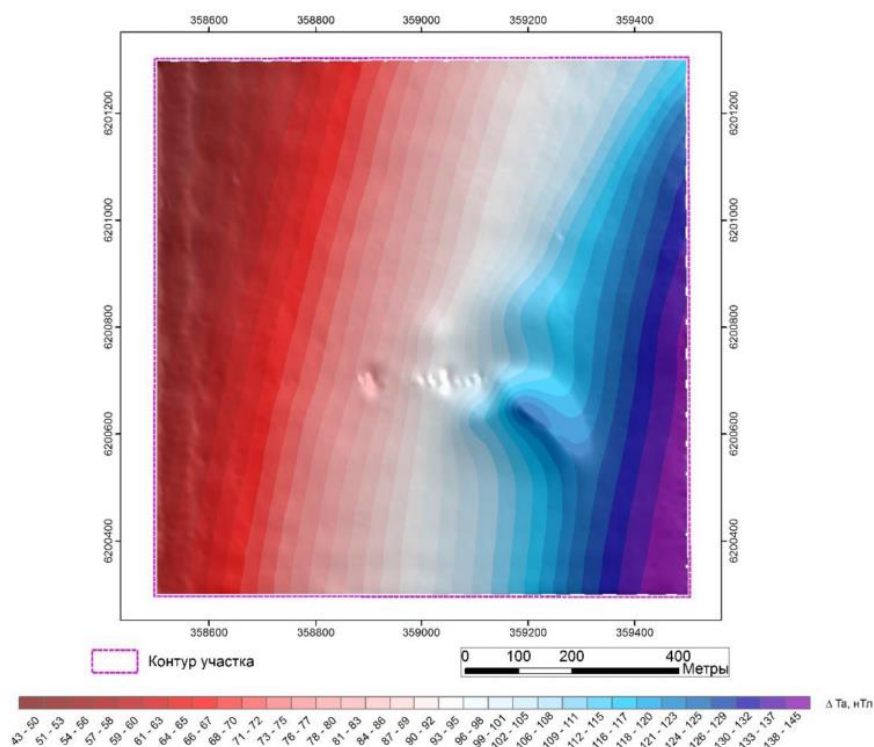
В 2020 году на территории геомагнитной обсерватории «Казань» (Республика Татарстан, Зеленодольский район) ООО «Геоскан» выполнена для ГЦ РАН аэромагнитная съемка масштаба 1:1000. Цель съемки состояла в изучении магнитных аномалий в окрестностях обсерватории. Съемка выполнялась с использованием аэрокомплекса ГЕОСКАН-401-Геофизика, представляющего собой БПЛА (квадрокоптер) и квантовый рубидиевый аэромагнитометр QMag Rb-1, установленный ниже БПЛА в выносной гондоле на тросе длиной 20 м. Маршруты аэромагнитной съемки были ориентированы с запада на восток. Среднее межмаршрутное расстояние составляло 10 м. Суммарный объем аэромагнитных маршрутов на площади участка работ – 61,9 км<sup>2</sup> – составил 128,6 пог. км, включая 5,9 пог. км повторных наблюдений для контроля. Высота магнитометра от поверхности земли выдерживалась равной 40 м. При этом съемочные полеты проводились с плавным огибанием рельефа. Средняя скорость движения магнитометра на съемочном маршруте составляла 35 км/час.

Все аэромагнитные измерения были обеспечены регистрацией вариаций геомагнитного поля, которую осуществлял протонный оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1 с частотой регистрации раз в 2 секунды. Учет вариаций магнитного поля выполнялся в программной среде Geosoft. Значения вариаций  $T_{\text{вар}}$  в файле были вычислены по следующей формуле:

$$T_{\text{вар}} = T_{\text{ср}} - T_{\text{набл}}, \quad (5.1)$$

где  $T_{\text{ср}}$  – среднесуточное значение магнитного поля в месте установки базового магнитометра,  $T_{\text{набл}}$  – наблюдаемое магнитное поле. Затем за соответствующие моменты времени вычислялась поправка за вариации для каждой точки аэронаблюдений. Для перехода к аномальным значениям модуля вектора магнитной индукции  $\Delta T_a$  из измеренных значений было вычтено нормальное поле Земли, определенного по данным модели IGRF.

На полученной в результате карта аномальной составляющей магнитного поля (рисунок 5.4) виден слабовозрастающий тренд с запада-северо-запада на восток-юго-восток. Только в юго-восточной части наблюдается заметная магнитная аномалия величиной около 30 нТл и размером около 170–200 м. Вероятным источником аномалии являются сооружения обсерватории (в этом месте находится въезд на территорию и металлические ворота). Ряд локальных аномалий в центральной части также имеет, по всей видимости, техногенную природу. В остальном же по территории участка горизонтальный градиент магнитного поля составляет около 0,1 нТл/м, что удовлетворяет стандартам IAGA для развертывания геомагнитных обсерваторий [Jankowski and Sucksdorff, 1996]. Таким образом, результаты аэромагнитной съемки показывают отсутствие существенных магнитных аномалий геологического и антропогенного происхождения в окрестностях геомагнитной обсерватории «Казань» и, следовательно, подтверждают ее пригодность для высокоточных измерений магнитного поля Земли. Аэромагниторазведка по новой технологии низковысотных съемок с применением квадрокоптера сочетает в себе высокую маневренность с высокой чувствительностью бортового магнитометра. Система позволяет выполнять высокоточные аэромагнитные съемки на предельно малой высоте с детальным огибанием рельефа. Данная технология в несколько раз производительнее наземной магниторазведки, а также предоставляет возможность более детальной съемки по сравнению с аэромагниторазведкой, выполняемой пилотируемыми носителями.

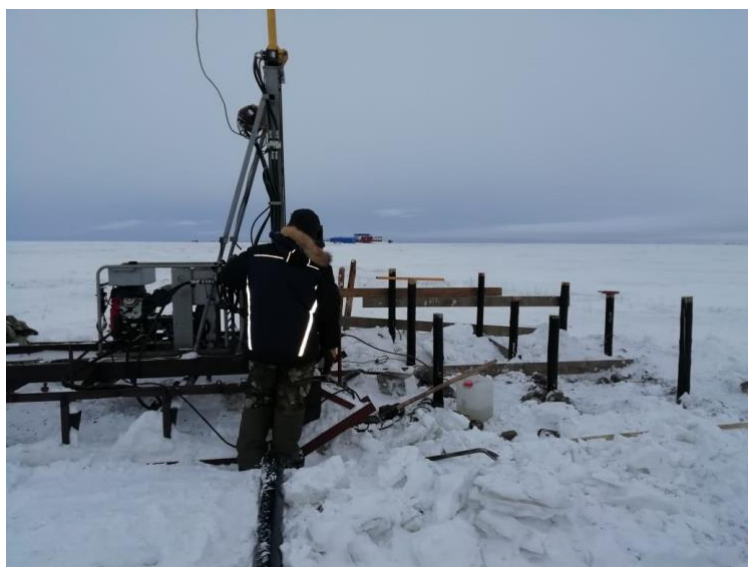


**Рисунок 5.4 – Аномальное магнитное поле на территории геомагнитной обсерватории «Казань» по данным аэромагнитной съемки с БПЛА**



### 5.3.2 Начало строительства обсерватории на о. Самойловский

В 2020 г. началось строительство совместной с ИНГГ СО РАН магнитной обсерватории «Остров Самойловский» (о. Самойловский, дельта р. Лена), место для развёртывания которой было изучено магниторазведкой в 2018 г. Начато строительство технического павильона. На текущем этапе строительства заложены сваи для фундамента технического павильона. Фото свайного поля приведено на рисунке 5.5. После возведения обсерваторских зданий и сооружений и установки аппаратуры обсерватория будет функционировать в составе российского сегмента геомагнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Развёртывание высокоточных стационарных геомагнитных измерений в Арктической зоне РФ позволит получить уникальную информацию о геомагнитной активности, необходимую не только для фундаментальных исследований в геомагнетизме и солнечно-земной физике, но и для широкого круга прикладных исследований.



**Рисунок 5.5 – Свайное поле для фундамента технического павильона магнитной обсерватории «Самойловский»**

### 5.3.3 Строительство измерительных павильонов обсерватории «Михнево»

В 2020 г. построены немагнитные обсерваторские павильоны совместной с ИДГ РАН магнитной обсерватории «Михнево» в Ступинском районе Московской области. На рисунке 5.6 можно увидеть оба павильона на стадии строительства – абсолютный (рисунок 5.6, слева) и вариационный (рисунок 5.6, справа).

Запуск обсерватории предварительно запланирован на 2021 г. Развёртывание высокоточной геомагнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ в широтах г. Москвы, но на удалении от источников техногенных помех сможет поддержать, а в перспективе – заменить обсерваторию «Москва» (ИЗМИРАН, г. Троицк), данные которой уже существенно зашумлены ввиду непрерывно развивающейся промышленной и жилой застройки.



**Рисунок 5.6 – Измерительные павильоны будущей геомагнитной обсерватории «Михнево»: абсолютный (слева) и вариационный (справа) на этапе их строительства**

#### **5.3.4 Включение полярных геофизических станций в российский сегмент геомагнитных обсерваторий**

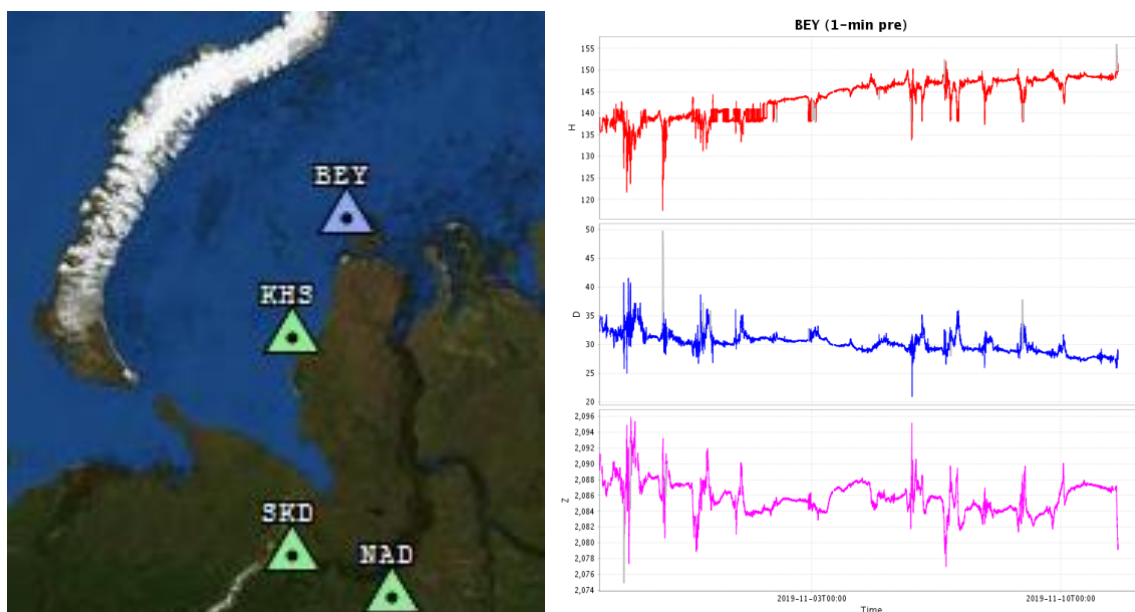
В 2020 г. организована передача данных в Российско-украинский центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) на базе ГЦ РАН с четырех полярных станций, поддерживаемых ИЗМИРАН. Станции «Остров Белый», «Харасавей», «Надым» и «Салехард» (IAGA-коды, соответственно, BEY, KHS, NAD, SKD) функционировали в составе сети магнитометров в районе Карского моря и полуострова Ямал, действовавшей с 1972 г. Информация о расположении и оснащении станций приведена в таблице 5.2.

**Таблица 5.2 – Информация о полярных станциях ИЗМИРАН**

IAGA-код	Наименование	Географические координаты		Используемые магнитометры
		Широта, °	Долгота, °	
BEY	О. Белый	73,3	70,0	«Кварц-3»
KHS	Харасавей	71,16	66,83	«Кварц-4»
NAD	Надым	65,53	72,51	«Кварц-4» и МФ-03-Р
SKD	Салехард	66,575	66,777	«Кварц-3» и «Кварц-4».

Геомагнитные данные полярных станций ИЗМИРАН также доступны в реальном времени на портале института (<https://forecast.izmiran.ru>). Взаимное расположение станций на карте представлено на рисунке 5.7 слева. Станции оснащены цифровыми векторными магнитометрами на базе кварцевых магнитных датчиков, которые активно внедрялись в практику геофизических исследований в Арктике, а также современным цифровым векторным магнитометром МФ-03-Р на базе феррозондовых датчиков.

На рисунке 5.7 справа приведен пример данных магнитных вариаций со станции «Остров Белый» (IAGA-код BEY).



**Рисунок 5.7 – Схема расположения полярных старций ИЗМИРАН на п-ове Ямал (слева) и пример данных станции «Остров Белый» (справа)**

#### **5.4 Разработка методов автоматизированной верификации и анализа геофизических данных**

Получены значительные результаты в области разработки методов автоматизированной верификации и анализа геофизических данных. На основе программных и аппаратных разработок ГЦ РАН [Богоутдинов и др., 2010; Soloviev et al., 2012; Gvishiani et al., 2016] разработана технология подготовки верифицированных геомагнитных данных и их хранения в базе данных, во многом ускоряющая процедуру подготовки. Качество получаемых данных сравнимо с результатами применения традиционных подходов ИНТЕРМАГНЕТ к их подготовке. Внедрение данной высокопроизводительной технологии в практику подготовки окончательных данных ИНТЕРМАГНЕТ будет способствовать ускорению их публикации, а также оперативному расчету продуктов данных и моделей на их основе.

Также проведен анализ широтного распределения геомагнитной активности по обсерваторским данным [Оценко и др, 2020] с помощью индикатора меры аномальности (МА) [Soloviev et al., 2016], разработанного ранее в ГЦ РАН и применяемого в работе аппаратно-программного комплекса МАГНУС [Gvishiani et al., 2016]. В рамках нового исследования проведен анализ зависимости средних значений МА от геомагнитной широты в разные фазы магнитных бурь. Анализ проводился по данным российских



геомагнитных обсерваторий для пяти бурь, зарегистрированных в 2015–2018 гг. на завершающем этапе 24-го солнечного цикла (2008–2020 гг.). Информация о бурях приведена в таблице 5.3.

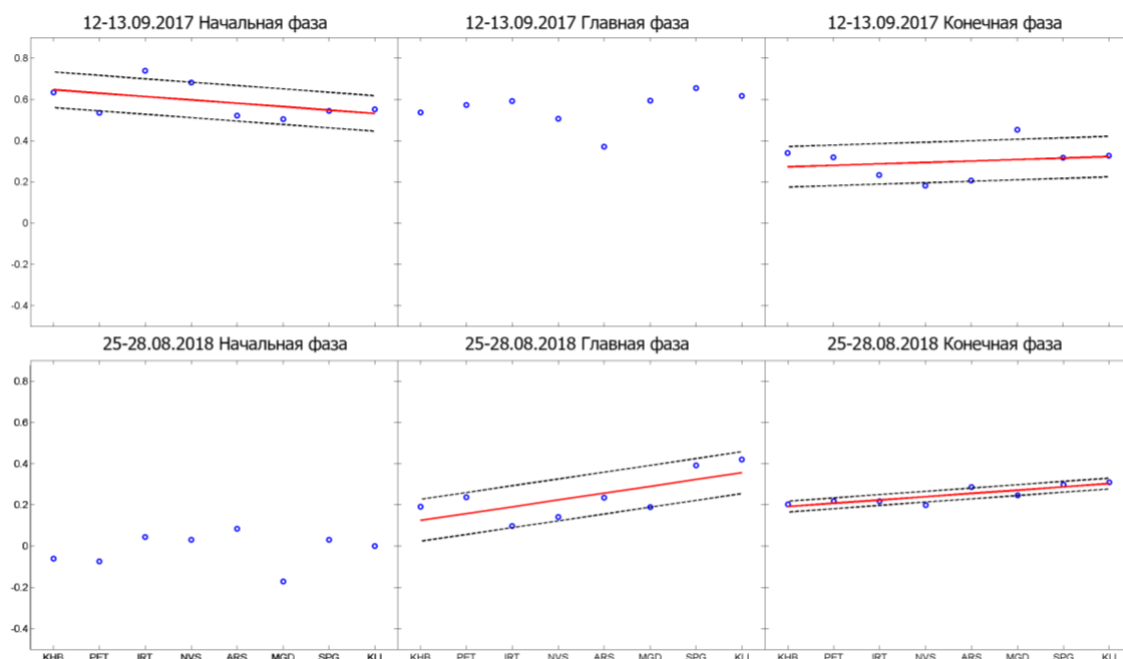
Таблица 5.3 – Сводная информация о рассматриваемых магнитных бурях

№ бури	Начало фаз магнитной бури (UT)			Конец магнитной бури (UT)	Минимум $D_{st}$ -индекса, нТл
	начальная	главная	восстановительная		
1	2015.03.17 04:45	2015.03.17 08:00	2015.03.17 23:00	2015.03.21 21:00	– 223
2	2016.03.06 13:30	2016.03.06 17:00	2016.03.06 21:30	2016.03.08 08:30	– 98
3	2016.10.12 21:30	2016.10.13 08:00	2016.10.13 17:30	2016.10.14 14:30	– 104
4	2017.09.12 20:00	2017.09.12 21:30	2017.09.13 00:30	2017.09.13 09:30	– 50
5	2018.08.25 08:30	2018.08.25 20:00	2018.08.26 06:30	2018.08.28 18:30	– 174

Для максимального широтного охвата в выборку были включены 8 российских геомагнитных обсерваторий в диапазоне от  $47^\circ$  до  $60^\circ$  с. ш. В области аврорального овала ввиду сложной картины геомагнитных возмущений, обусловленной влиянием электроджетов, результаты расчёта требовали независимой интерпретации и потому не рассматривались при построении широтных зависимостей. В анализе использовались данные северной ( $X$ ) либо горизонтальной ( $H$ ) компонент полного вектора магнитного поля. Зависимости средних значений меры аномальности магнитного поля для разных фаз от геомагнитной широты приведены на рисунке 5.8 на примере двух из рассмотренных бурь. Для оценки тренда на тех графиках, где разброс значений МА не превышал выбранного нами порогового значения 0,2, была построена линейная регрессия методом наименьших квадратов (сплошная линия на рисунке 5.8) и рассчитаны доверительные интервалы (пунктирные линии).

По результатам анализа поведения МА на разных фазах магнитных бурь были отмечены общие закономерности. Средние значения МА для первой фазы исследованных бурь в основном уменьшаются с увеличением геомагнитной широты (кроме бурь 2 и 5). Уменьшение значений МА при движении от низких широт к высоким на начальной фазе обусловлено ослаблением влияния экваториальной токовой системы  $D_{st}$ . С повышением геомагнитной широты её эффект ослабляется. Для главной фазы средние значения МА в трех из пяти случаев возрастают с увеличением широты, однако возрастающий тренд выражен сравнительно слабо и в некоторых случаях может отсутствовать. На фазе восстановления для всех исследованных бурь характерен примерно одинаково

возрастающий тренд значений МА по мере увеличения широты, что объясняется ростом влияния ионосферных токов, возникающих на заключительной стадии бури при приближении к авроральной зоне.



**Рисунок 5.8 – Зависимость средних значений меры аномальности (по оси ординат) от геомагнитной широты различных магнитных обсерваторий (по оси абсцисс) для начальной (слева), главной (в центре) и восстановительной (справа) фаз на примере двух магнитных бурь 12–13 сентября 2017 г. и 25–28 августа 2018 г. По вертикали графики расположены в порядке времени наступления события (сверху вниз от раннего к позднему)**

Результаты подтверждают устойчивость МА и универсальность ее работы на геомагнитных данных различных широт, а также ее возможности в распознавании внезапного начала бури и преимущества по сравнению с традиционно используемым планетарным Кр-индексом в задаче выбора магнитно-спокойных временных интервалов. Это делает возможным применение МА для изучения токовой системы низкоширотной ионосферы, а также для автоматизированного отбора данных для построения моделей главного магнитного поля.

### **5.5 Новая модель осадочного чехла территории юга Восточно-Европейской платформы и Предкавказья по данным декомпенсационных аномалий силы тяжести**

В 2020 г. получен важный научный результат в области наук о Земле. Разработана новая модель плотности и мощности осадочного чехла в обширном регионе на стыке южной части Восточно-Европейской платформы, Предкавказья и некоторых





прилегающих к югу структур, которые ограничены Альпийско-Средиземноморским складчатым поясом. Применялся подход, предложенный отечественными и зарубежными исследователями [Зорин и др., 1985; Cordell et al., 1991] и позволяющий уточнить эффект осадочных отложений в гравитационном поле путем расчета *декомпенсационной поправки*. В отличие от обычных изостатических аномалий или аномалий Буге, декомпенсационная коррекция снижает влияние глубоких гравитирующих масс, обеспечивая компенсацию приповерхностных аномалий плотности. В работах [Kaban et al., 2016; Haeger and Kaban, 2019] подход усовершенствован для учета эффективной упругой мощности литосферы. На первом этапе определяется изостатическая поправка и рассчитываются изостатические гравитационные аномалии. В частотной области изостатическая поправка может быть рассчитана согласно [Kaban et al., 2016]:

$$\Delta g_{ic}(k_x, k_y) = G_{is}(k_x, k_y) \cdot t_{adj}(k_x, k_y) = -2\pi G \rho \cdot C \cdot \exp(-kM) \cdot t_{adj}(k_x, k_y) \quad (5.2)$$

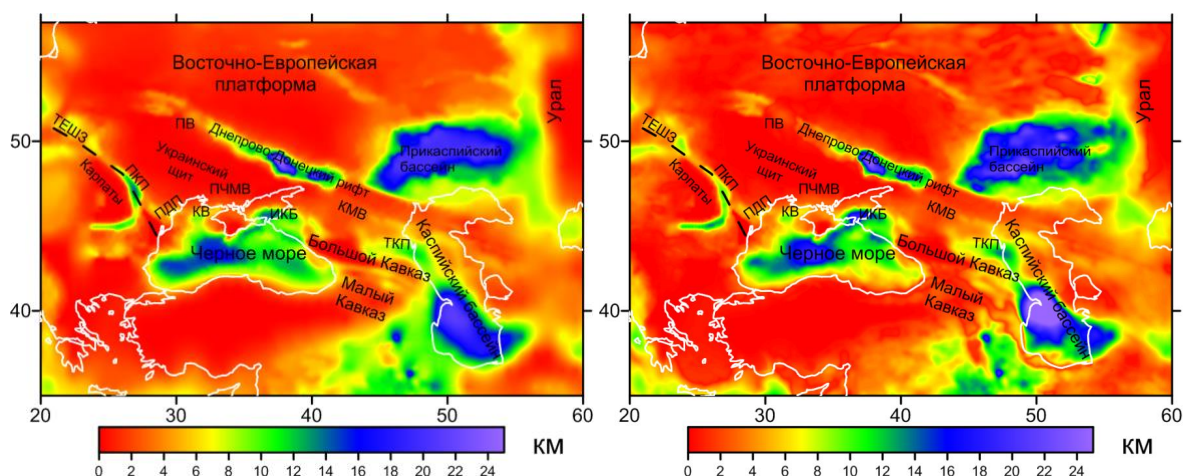
где  $M$  – глубина до поверхности Мохо,  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  – волновое число,  $k_x = 2\pi/\lambda_x$ ,  $k_y = 2\pi/\lambda_y$ ,  $G$  – гравитационная постоянная,  $t_{adj}$  – коррекция за топографию, которая вводится в морскую зону для коррекции батиметрии и рельефа суши при постоянной плотности  $\rho$ . Параметр  $C$  связан с эффективной упругой мощностью литосферы ( $T_e$ ). Ввиду изменчивости эффективной упругой мощности литосферы и глубин залегания поверхности Мохо, в выражение (5.2) введена *функция Грина* ( $G_{is}$ ), определенная для каждой комбинации  $M$  и  $T_e$  обратным преобразованием Фурье для членов, применяемых к  $t_{adj}$  в (5.2). Затем изостатическая поправка вычисляется как свертка скорректированной топографии и соответствующих функций Грина в скользящем окне:

$$\Delta g_i(x_0, y_0) = \Delta g_b(x_0, y_0) + \iint_{-1250km}^{1250km} t_{adj}(x_0 + x, y_0 + y) \cdot G_{is}(x, y, M, T_e) dx dy \quad (5.3)$$

где  $\Delta g_b(x_0, y_0)$  – аномалии Буге. На следующем этапе рассчитывается декомпенсационная поправка с учетом данных  $M$  и  $T_e$  с применением функций Грина в скользящем окне, далее вычисляются декомпенсационные гравитационные аномалии.

Изменения мощности осадочных пород оказались весьма значительными во многих областях результирующей модели региона и достигают 8,5–11 км; различия между исходной (рисунок 5.9, слева) и итоговой (рисунок 5.9, справа) моделями мощности также значительны. Однако анализ новой модели осадочного чехла показывает, что в целом она соответствует современным представлениям о геологии и тектонике региона, несмотря на некоторые расхождения с рядом исследований. Новая модель вносит несколько

существенных поправок к структуре нескольких глубоких впадин. В частности, в новой модели наблюдается сильная разница между северной и южной частями восточной части Черного моря, и наиболее глубокая часть восточного бассейна Черного моря примыкает к Индоло-Кубанской впадине. Этот вывод противоречит предыдущим исследованиям, которые определяли фундамент как кровлю меловых отложений. Кроме модели мощности осадочных отложений была получена и новая плотностная модель региона, которая, в частности, подтверждает новую информацию о структуре литосферы западной и восточной частей Большого Кавказа, полученную по результатам работы [Ismail-Zadeh *et al.*, 2020]. На основе новой уточненной модели осадочного чехла возможно указать потенциальные области для дальнейших детальных исследований не только в фундаментальных целях, но и для поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.



**Рисунок 5.9 – исходная (слева) и новая (справа) модель мощности осадочного чехла юга Восточно-Европейской платформы и Предкавказья по данным декомпенсационных аномалий силы тяжести. Для обозначения осадочных бассейнов используются следующие аббревиатуры: ПВ – Припятская впадина, КМВ–Кума-Манычская впадина, КВ – Каркинитская впадина, ИКБ – Индоло-Кубанский бассейн, ТКП – Терско-Каспийский краевой прогиб, ПЧМВ– Причерноморская впадина (низменность), ПДП – Предобруджинский (Молдавский) краевой прогиб, ПКП – Предкарпатский краевой прогиб, ТЕШЗ – Транс-Европейская шовная зона**

#### Список использованных источников

- Богоутдинов Ш. Р., Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Соловьёв А. А., Кин Э. Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. I. Выбросы на магнитограммах всемирной сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. – 2010. – № 11. – С. 99–112.
- Зорин Ю. А., Письменный Б. М., Новоселова М. Р., Туратанов Е. Х. Декомпенсационные аномалии силы тяжести // Геология и геофизика. – 1985.– № 8.– С. 104–108.



Ощенко А. А., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А., Соловьёва Е. Н. Обзор применения меры аномальности для оценки геомагнитной активности // Геофизические исследования. – 2020. – Том 21. – № 4. – С. 5–19. DOI: 10.21455/gr2020.4-4

Cordell L., Zorin Y. A., Keller, G.R. The decompensative gravity anomaly and deep structure of the region of the Rio Grande rift // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1991. – Vol. 96. – No. 4. – P. 6557–6568.

Haeger C., Kaban, M.K. Decompensative gravity anomalies reveal the structure of the upper crust of Antarctica // Pure and Applied Geophysics. – 2019. – Vol. 176. – P. 4401–4414. DOI: 10.1007/s00024-019-02212-5

Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R. Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment // Data Science Journal. – 2016. – Vol. 15. – P. 18. DOI: 10.5334/dsj-2016-018

Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. – Warsaw: IAGA, 1996. – 235 p.

Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M. K., Kadirov F., Karapetyan J., Kengerli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A. (2020). Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus // Earth-Science Reviews. – 2020. – Vol. 207. – 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222

Kaban M. K., El Khrepy S., Al-Arifi N. Isostatic model and isostatic gravity anomalies of the Arabian Plate and surroundings // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 173. – P. 1211–1221. DOI: 10.1007/s00024-015-1164-0

Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A., Heumez B. Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // Earth Planets Space. – 2012. – Vol. 64. No. 9. P. 743–752. DOI:10.5047/eps.2012.03.004

Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov Sh. Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // Annals of Geophysics. – 2016. – Vol. 59. – No. 6. – G0653. DOI: 10.4401/ag-7116

## **6 Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы**

Грант РФФИ: 16-17-00121-П

Номер регистрации: АААА-А16-116030110009-6

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

### **6.1 Расширение отечественной сети геомагнитного мониторинга на высоких широтах**

Развернутая магнитная обсерватория «Белое море» (IAGA-код WSE), расположенная в окрестностях Беломорской биологической станции (ББС) МГУ им. М. В. Ломоносова (Карелия), продолжает непрерывную работу – ведется регистрация трех компонент и модуля вектора магнитного поля с 1-секундной дискретизацией и их передача в геомагнитный центр ГЦ РАН. Участники проекта периодически выезжали на обсерваторию для контроля ее работы. В октябре 2020 г. было проведено исследование местности вблизи обсерватории магнитоградиентометром GSM-19GW с целью поиска мест возведения дополнительных павильонов. Составлена предварительная карта размещения перспективных павильонов. В ходе экспедиции на ББС были выполнены работы по модификации и усовершенствованию цепей питания и линий связи в действующем измерительном павильоне, и установлено телеметрическое оборудование для регистрации температуры, влажности и напряжения входящего питания. Собираемые телеметрические данные передаются по линии проводной связи в симплекс-режиме на компьютер, расположенный в техническом здании станции. Разработана программа загрузки данных в базу данных МАГНУС. Модернизация цепей электропитания и связи позволила повысить качество регистрируемых данных и надежность электроснабжения магнитометра POS-4. Новая телеметрическая система обеспечивает мониторинг влияния метеорологических параметров и скачков входного напряжения на работу магнитометра. Работа по проекту координировалась с Полярным геофизическим институтом, ведущим регистрацию геоиндуцированных токов в заземленной нейтрали трансформаторных станций на линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии.

### **6.2 Генерация интенсивных геоиндуцированных токов в энергетических системах**

Даже умеренные возмущения геомагнитного поля могут приводить к генерации интенсивных геоиндуцированных токов (ГИТ) в энергетических системах. Более того, растет число публикаций о связанных с ГИТ нарушениях в работе энергетических систем



на средних и низких широтах, где амплитуды геомагнитных возмущений, меньше наблюдаемых на высоких широтах. Длительное существование (несколько часов) ГИТ умеренной интенсивности, индуцированных геомагнитными Pc5-Pi3 пульсациями, может быть более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь и бурь. Сахаров и др. [2021] проанализировали влияние геомагнитных пульсаций на интенсивность ГИТ в линии электропередач (ЛЭП) «Северный Транзит» на авроральных широтах. Рассмотренный частотный диапазон включает квазимонохроматические пульсации Pc5 (с частотами  $> 2$  мГц) и более широкополосные пульсации Pi3 (с частотами  $< 2$  мГц). Установлено, что не существует однозначной связи между амплитудами геомагнитного возмущения и наведенного ГИТ. Это связано с интегральным характером связи между ЭДС, наведенной в «контуре», размер которого зависит от частотного и пространственного масштаба возмущения магнитного поля. Показано, что интенсивность ГИТ зависит не только от амплитуды и частоты геомагнитных пульсаций, но и от их поляризации и пространственного масштаба. Корреляция крупномасштабных возмущений с ГИТ оказалась выше, чем мелкомасштабных. Предложен и апробирован для квазимеридиональной ЛЭП интегральный по частоте параметр, определяющий взаимную зависимость спектральной мощности ГИТ и геомагнитных пульсаций.

Более детальный анализ ГИТ, возбуждаемых в ЛЭП на Кольском полуострове пульсациями Pc5/Pi3 (диапазон частот от 1,5 до 5 мГц), регистрируемых сетью магнитометров IMAGE, дан в работе [Yagova et al., 2021]. Были проанализированы ГИТ в трансформаторе на конечной станции Выходной в течение всего 2015 г., вблизи максимума 24-го солнечного цикла. Для количественной оценки эффективности генерации ГИТ геомагнитными пульсациями вводится соотношение между спектральными плотностями мощности ГИТ и вариациями магнитного поля. При рассмотрении эффективности геомагнитных пульсаций в генерации ГИТ особое внимание уделяется зависимости от частоты и пространственного масштаба. Для оценки пространственных масштабов пульсаций в широтном и долготном направлениях использовался треугольник станций, разнесенных в широтном и долготном направлениях. Было обнаружено, что крупномасштабные пульсации (с высокой спектральной когерентностью, малой разностью фаз и близкими амплитудами на удаленных друг от друга станциях) возбуждают более интенсивные ГИТ и более опасны для устойчивой работы ЛЭП, чем мелкомасштабные пульсации.



Токи большой интенсивности в ЛЭП могут индуцировать различные типы возмущений космической погоды – усиление крупномасштабного аврорального электроджета в момент взрывного начала суббури, геомагнитные пульсации типа  $Pi3$  и  $Pc5$ , дневные внезапные импульсы  $SC$ , ночные спорадические магнитные импульсы. Энергия таких импульсных или квазипериодических возмущений много ниже, чем энергия магнитосферных бурь или суббурь, однако быстро меняющиеся поля таких возмущений могут вызывать всплески ГИТ значительной величины. В общем случае амплитуды геомагнитных вариаций убывают с частотой, тогда как величины индуцированного электрического поля будут расти с частотой. Следовательно, отклик ГИТ на геомагнитное возмущение, который представляет собой свертку обоих факторов, должен иметь максимум на некоторых частотах. Исследования всплесков ГИТ показали, что этот характерный временной масштаб составляет примерно 2–10 минут, то есть он попадает в низкочастотный интервал ультранизкочастотного (УНЧ) диапазона. Токовые системы в ионосфере, ответственные за импульсные геомагнитные возмущения УНЧ диапазона, представляют собой локализованные вихревые структуры. Специальная техника анализа данных 2D сети магнитометров была разработана для выделения локализованных вихревых структур в ионосферных токах [Чинкин и др., 2020]. Анализ ГИТ в ЛЭП на северо-западе РФ явно продемонстрировал, что фактически источником всплесков токов является не интенсификация ионосферного электроджета, а появление короткоживущих мелкомасштабных структур в ионосферных токах. Результаты разработанной методики показывают, что экстремальные всплески ГИТ ( $> 100$  А) в ранние утренние часы однозначно связаны с импульсами, образующими  $Ps6$  пульсации – последовательностью локализованных (радиус  $\sim 200$ – $250$  км) вихревых холловских токов, поддерживаемых струями продольных магнитосферных токов попеременно меняющегося направления с плотность до  $\sim 5$  А/км<sup>2</sup>, и распространяющимися по азимуту в восточном направлении (к Солнцу).  $Ps6$  пульсации вызывали наиболее интенсивные ГИТ в системе «Северный Транзит» за все 8 лет наблюдений.

Актуальность задачи о ГИТ связана как с авариями во время экстремальных геомагнитных возмущений, так и с экономическими потерями при возмущениях, хотя и не приводящим к масштабным отключениям, но увеличивающим нагрузку на энергосистему. Проблема негативного воздействия ГИТ на работу энергетических систем особенно актуальна для России из-за большой протяженности высоковольтных ЛЭП, в том числе расположенных на высоких широтах. Сбои в работе электрооборудования могут быть вызваны преждевременным старением компонентов высоковольтных



трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренных по величине ГИТ. В рамках проекта проанализировано влияние геомагнитных пульсаций на интенсивность ГИТ в ЛЭП «Северный Транзит» на авроральных широтах. Рассмотренный частотный диапазон включает квазимонохроматические пульсации Pc5 (с частотами  $> 2$  мГц) и более широкополосные пульсации Pi3 (с частотами  $< 2$  мГц). Обнаружено, что не существует однозначной связи между амплитудами геомагнитного возмущения и ГИТ. Интенсивность ГИТ зависит не только от амплитуды и частоты геомагнитных пульсаций, но и от их поляризации и пространственного масштаба, при этом крупномасштабные возмущения вызывают более интенсивные ГИТ, чем мелкомасштабных. Длительное существование (несколько часов) ГИТ умеренной интенсивности, вызванных геомагнитными пульсациями, может быть более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь и бурь.

### **6.3 Компьютерное моделирование работы промышленных трансформаторов под воздействием квазипостоянных ГИТ**

В сотрудничестве с Московским энергетическим институтом продолжены работы по компьютерному моделированию работы промышленных трансформаторов в условиях квазипостоянных ГИТ. В предшествующих работах влияние ГИТ на трансформаторы исследовалось без учета явления гистерезиса, в то время как из-за гистерезисных явлений даже ГИТ порядка первых ампер могут создать потенциальную угрозу для корректной работы релейных защит. В пусковом режиме силовых трансформатора переходные процессы приводят к появлению бросков намагничивающих токов (БНТ), многократно превышающих номинальные. Такие броски при включении трансформатора могут вызвать ложное срабатывание дифференциальных релейных защит. В работе [Гусев и др., 2020] представлены результаты исследования влияния на пусковые режимы трансформаторов знакопостоянных токов в обмотках силовых трансформаторов, вызванных геомагнитными возмущениями. Проанализированы процессы намагничивания силовых трансформаторов, вызываемые ГИТ, с учетом гистерезиса. Были сопоставлены БНТ в трансформаторе без ГИТ и с ГИТ, насыщающем стержень магнитопровода. Расчеты проведены на модели участка сети 500 кВ с помощью специально разработанного программного обеспечения, позволяющего моделировать переходные процессы в нелинейных электрических цепях с учетом явления гистерезиса. Кратности БНТ с учетом ГИТ увеличились примерно в 2 раза. При протекании ГИТ было выявлено изменение знака остаточной намагниченности, которая при повторных включениях может

привести к увеличению суммарного потокосцепления, что вызовет повторный рост кратностей БНТ и изменение гармонического состава токов. Обоснована необходимость учета ГИТ при расчетах термической и электродинамической стойкости трансформаторов, и при выборе установок релейных защит.

#### **6.4 Метод прогноза электромагнитных возмущений и ГИТ на основе комбинирования глобальных моделей космической погоды и симуляций теллурических полей**

Перспективным методом, позволяющим давать оперативный прогноз возможных электромагнитных возмущений на земной поверхности, является комбинирование глобальных моделей космической погоды и симуляций приповерхностных полей. На основе такого моделирования может быть сделан прогноз ГИТ в заданных технологических системах, так как эти токи могут быть вычислены при наличии данных о теллурическом электрическом поле, а также параметров и геометрии технологической сети. Основными входными параметрами моделей космической погоды являются спутниковые данные о солнечном ветре и межпланетном магнитном поле, передаваемые в режиме реального времени со спутников в точке Лагранжа L1 на линии Земля-Солнце (ММП) на удалении  $\sim 200$  радиусов Земли), что дает потенциальную возможность предсказывать геомагнитные вариации с упреждением порядка 30–60 мин. На основе методов глобального моделирования может быть получена картина ожидаемых вариаций магнитного поля у поверхности Земли, а эти результаты могут быть использованы как входные параметры для последующего моделирования теллурических полей с помощью современных 3-D программных средств, которые позволяют достигать значительно более высокой точности при работе с высококонтрастными моделями проводимости. Используя этот подход, проводилось моделирование теллурических полей во время геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. Использовались различные модели проводимости, включая реалистичную 3-D модель, полученную на основе магнитотеллурических данных проекта EarthScope. Исследование [Marshalko et al., 2020] показало, что контрасты проводимости оказывают большое влияние не только на локальное теллурическое поле, но и на региональную разность потенциалов и, соответственно, на ГИТ. Также было произведено сравнение результатов моделирования для реалистичного пространственно-неоднородного источника и стандартного приближения плоской волны, и было показано, что различия в результатах моделирования существенны даже в средних широтах, особенно на границах контрастов проводимости.



Одним из практических шагов по уменьшению ущерба технологическим системам от космической погоды, предпринимаемым международным геофизическим сообществом, является разработка численных моделей, способных осуществлять прогнозирование возможных электромагнитных возмущений в оперативном режиме. Перспективным методом прогноза представляется комбинация глобальных магнитосферных моделей и симуляций приповерхностных электромагнитных полей. На основе такого комбинированного моделирования может быть сделан прогноз ГИТ в конкретных технологических системах, так как эти токи могут быть вычислены исходя из получаемой картины теллурических полей. Основными входными параметрами моделей космической погоды являются данные о солнечном ветре, передаваемые в режиме реального времени со спутников на линии Земля-Солнце (на удалении ~ 200 радиусов Земли), что дает потенциальную возможность предсказывать ожидаемые геомагнитные вариации с упреждением порядка 30–60 мин. Получаемая с помощью глобального моделирования картина вариаций магнитного поля у поверхности Земли используется как входная информация для последующего численного расчета теллурических полей с помощью современных 3-D программных средств. Используя этот подход, проводилось моделирование теллурических полей во время геомагнитных бурь, используя реалистичную 3-D модель проводимости земной коры. Исследование, в частности, показало, что контрасты проводимости оказывают большое влияние не только на локальное теллурическое поле, но и на региональную разность потенциалов и, соответственно, на ГИТ.

#### **6.5 Модели для мониторинга и оперативного прогноза динамики аврорального овала при изменениях космической погоды**

Назрела необходимость создания и практической апробации моделей для мониторинга и оперативного прогноза динамики аврорального овала при изменениях космической погоды. Погодонезависимым источником детальной информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния. Модель аврорального овала OVATION-prime (OP) основана на данных более 20 лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках DMSP (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?model=Ovation%20Prime>). Спутниковые данные регистрации потоков частиц не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, доступны для обоих полушарий, и более чувствительны, чем оптические

наблюдения. Модель ОР параметризирована на значения параметров солнечного ветра и ММП, и рассчитывает ожидаемое 2D пространственное распределение интенсивности основных типов высыпаний авроральных электронов. На основании статистической модели авроральных высыпаний ОР разработан веб-сервис <http://aurora-forecast.ru> для визуализации вероятности появления полярных сияний, построенный методами географических информационных систем (ГИС) [Воробьев и др., 2020]. Разработанная ГИС представляет собой программную оболочку, построенную на базе технологии «виртуальный глобус» – мультимасштабной цифровой 3D-модели Земли, обеспечивающей визуализацию данных о планетарном распределении вероятности наблюдения полярных сияний. Входными параметрами модели являются данные в реальном времени по солнечному ветру и ММП с межпланетных спутников, поступающие на FTP сайты NASA и NOAA. Сдвиг по времени ( $\sim 1$  часа) за счет распространения солнечного ветра от межпланетного спутника к границе магнитосферы дает принципиальную возможность давать краткосрочный прогноз ожидаемой интенсивности полярных сияний. Разработанная модель может быть использована операторами технологических систем и наблюдателями полярных сияний для оперативного прогнозирования вероятности наблюдения полярных сияний и положения аврорального овала в любой точке планеты. Воздействие космической погоды на технологические системы в наибольшей степени проявляется в области аврорального овала – именно в этой области высок уровень турбулентности ионосферной плазмы, что значительно снижает устойчивость сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС, и течет мощный авроральный электроджет, вызывающий появление ГИТ в энергетических системах.

При рассмотрении воздействий космической погоды обычно предполагается, что геомагнитные поля пространственно однородны по всей площади энергосистемы. Однако, зачастую на фоне общего усиления геомагнитного поля во время суббурь, наблюдаются экстремально большие локализованные максимумы, сильно отличающиеся от регионально усредненных полей. В ходе работ по проекту, используя данные глобальной сети наземных магнитных станций с портала SuperMAG, построена веб-геоинформационная система (ГИС) для динамического анализа вариаций геомагнитного поля и определения пространственно-временной структуры экстремальных геомагнитных возмущений по адресу <https://geomagnetic.ru/>. Система дает возможность визуализации и анализа в планетарном масштабе динамики как возмущений геомагнитного поля, так и вариабельности поля ( $dB/dt$ ).





## **6.6 Излучение линий электропередач на частотах 50/60 Гц и их прохождение в ионосферу и магнитосферу**

Сети высоковольтных ЛЭП, простирающиеся на многие сотни километров, являются по существу излучающими системами с очень большими масштабами антенны. Из-за наличия сильных нелинейных элементов (таких как тиристоры) в энергетических системах в ЛЭП возникают и излучаются и высокие гармоники основной частоты 50/60 Гц. Излучение линий электропередач Power Line Emission (PLE), которое регистрируется как электромагнитные узкополосные излучения на частотах 50/60 Гц, может эффективно проникать в ионосферу и магнитосферу и обнаруживаться с помощью спутниковых датчиков. То обстоятельство, что PLE обнаруживается на большом расстоянии (и даже в космосе) от трехфазной ЛЭП является показателем ее несбалансированной работы под воздействием ГИТ. В ЛЭП могут возникать фазовые и амплитудные дисбалансы напряжения и тока, что приводит к потерям мощности из-за излучения электромагнитной энергии. Согласно многолетним наблюдениям спутника DEMETER, интенсивность PLE увеличивается во времена высокой вариабельности магнитного поля, т.е. больших значений  $dB/dt$ , рассчитанных по данным наземных магнитометров. Интенсивности PLE на основной частоте энергосистемы и ее третьей гармонике над Европой и Северной Америкой, наблюдаемые при больших значениях вариабельности поля, оказываются систематически выше, чем интенсивности, наблюдаемые во время спокойного геомагнитного поля. При этом ночью общая интенсивность PLE была значительно выше, чем днем. Эти наблюдения продемонстрировали, что над промышленно развитыми районами интенсивность PLE значительно выше среднего уровня. Однако теоретические модели, позволяющие надежно оценить степень проникновения энергии PLE в верхнюю ионосферу, пока не разработаны. В отличие от ОНЧ излучателей (таких как радиопередатчики или молниевые разряды) источник излучения СНЧ диапазона не может быть смоделирован как бесконечно малый диполь, и его конечный масштаб надо учитывать. В работе [Fedorov et al., 2020] построена численная модель электромагнитного отклика реалистичной ионосферы на приземный ток у земли. В модели рассматривается неоднородная по вертикали система Земля – атмосфера – ионосфера. Структура параметров ионосферной плазмы рассчитана по модели International Reference Ionosphere (IRI), на основе которой вычисляются частоты столкновений и компоненты тензора проводимости. Электромагнитное поле возбуждается бесконечно длинной ЛЭП и описывается системой дифференциальных уравнений, вытекающей из полной системы Максвелла с тензором для столкновительной плазмы. На поверхности Земли выполняется импедансное граничное условие, а на

бесконечности – условие излучения. Схема численного расчета основана на введении матрицы адмиттанса, соединяющей горизонтальные составляющие электрического и магнитного возмущений. Преимущество этого численного метода состоит в том, что он позволяет избежать неустойчивости вычислительного процесса. Амплитуды электрического и магнитного полей на всех высотах были численно рассчитаны для различных ионосферных условий и сопротивлений земной коры. Электромагнитное поле в верхней ионосфере от наземной ЛЭП зависит от плотности ионосферы и сопротивления подстилающего слоя земной поверхности. Увеличение проводимости земной коры на 2 порядка от  $10^{-4}$  См/м до  $10^{-2}$  См/м приводит к уменьшению примерно на порядок амплитуды возбуждаемого поля в верхней ионосфере (600 км) над источником. При этом проникновение через ионосферу в ночное время более эффективно, чем в дневное время из-за большего затухания волн при распространении в дневной ионосфере. Моделирование показывает, что несбалансированные токи в ЛЭП с интенсивностью  $\sim 10$  А возбуждают PLE с амплитудой, достаточной для обнаружения электрическими датчиками низкоорбитальных спутников. Магнитная составляющая PLE даже в благоприятном случае высокого удельного сопротивления земной коры под ЛЭП должна составлять  $\sim 0,1$  пТл для тока в линии 1 А, и такой сигнал будет скрыт помехами и фоновым шумом. Электромагнитное загрязнение околоземного космического пространства наземными ЛЭП будет постоянно возрастать по мере индустриального развития общества.

### **6.7 Создание баз данных высокого уровня по спутниковым данным**

Создана общедоступная база данных по продольным токам между ионосферой и магнитосферой по данным спутников SWARM, получившая свидетельство о государственной регистрации. База содержит 1-мин данные рассчитанных по данным спутниковых магнитометров продольных токов при пролетах в высокоширотных областях северного и южного полушарий за 2013–2020 гг. База данных обеспечивает сортировку спутниковых измерений плотности продольных токов: по координатам местное магнитное время – магнитная широта, по дню и сезону, по значениям ММП. База данных может использоваться для разработки статистических моделей продольных токов, параметризованных по сезону года (реализуется зависимость токов от проводимости ионосферы), и по величине и направлению ММП (реализуется зависимость токов от механизма электродинамического взаимодействия в системе солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера). Созданная база данных дает возможность провести поиск событий с одновременной регистрацией на спутнике аномально больших локализованных продольных токов и импульсного возмущения на наземных станциях.



## 6.8 Разработка новых региональных геомагнитных индексов для территории РФ

Предложено ввести в исследования по космической погоде новые региональные геомагнитные индексы, характеризующие значения возмущения геомагнитного поля и его вариабельности в российском секторе на авроральных широтах. Показано, что использование стандартных планетарных индексов для оценки региональных возмущений космической погоды может привести к ложным выводам. В свободный доступ на FTP сайт <ftp://indexguest@imagftp.gcras.ru/> выложена база данных стандартных, модифицированных, и новых региональных индексов за 2003–2018 гг.

Построена веб-ГИС для динамического анализа вариаций геомагнитного поля и определения пространственно-временной структуры экстремальных геомагнитных возмущений (<https://geomagnetic.ru/>). Система дает возможность визуализации и анализа в планетарном масштабе динамики как возмущений геомагнитного поля, так и вариабельности поля (dB/dt).

Статья [Воробьев и др., 2021] с апробацией новых региональных (для территории РФ) индексов геомагнитной активности, характеризующих не только средний уровень возмущенности за 15–60 мин интервал, но и вариабельность геомагнитного поля за этот период, и их сопоставление с существующими высокоширотными индексами (AE, SME, EI, PC) находится на рецензировании в журнале Солнечно-Земная Физика. В работе предложено ввести в исследования по космической погоде новые региональные геомагнитные индексы SME-R и VAR, характеризующие значения возмущения геомагнитного поля и его вариабельности (т.е. dB/dt) в российском секторе на авроральных широтах. Индексы рассчитываются по данным всех российских магнитных станций на геомагнитных широтах от 40° до 70°. Проведено сравнение неофициальных и региональных индексов со стандартными планетарными индексами во время некоторых магнитных бурь 2015 г. Помимо официальных IAGA индексов Dst/SYM-H, AE, PC, рассмотрены модифицированные и региональные индексы SME, PC-n, ULF, EI, Wp(Pi2). Анализ этих событий показал, что некоторые авроральные активизации, уверенно выделяемые SME индексом, могут быть пропущены стандартным AE индексом. Расхождение между стандартным PC и уточненным PC-n индексами достигает 1–2 мВ/м во время сильных возмущений. Вариабельность магнитного поля, характеризуемая VAR индексом, не связана однозначно с уровнем геомагнитной возмущенности, характеризуемой индексами AE или SME-R. Показано, что использование планетарных индексов для оценки региональных возмущений космической погоды может привести к

ложным выводам. В свободный доступ на FTP сайт <ftp://indexguest@imagftp.gcras.ru/> выложена база данных стандартных, модифицированных, и новых региональных индексов за 2003–2018 гг. для апробации.

При рассмотрении воздействий космической погоды обычно предполагается, что экстремальные геомагнитные поля пространственно однородны по всей площади энергосистемы. Однако, зачастую на фоне общего усиления геомагнитного поля во время суббурь, наблюдаются экстремально большие локализованные максимумы. Структура локального геомагнитного поля во время этих экстремальных возмущений на отдельных участках может сильно отличаться от регионально усредненных полей. Физические процессы, которые определяют генерацию этих экстремальных значений, недостаточно изучены. Неоднородности в структуре проводимости земной коры также могут привести к локальным усилениям геомагнитного поля и его variability. Однако, ни один из существующих веб-сервисов не предоставляет информации о динамике пространственного распределения геомагнитных вариаций. В ходе работ по проекту, используя данные глобальной сети наземных магнитных станций с портала SuperMAG, построена веб-геоинформационная система (ГИС) для динамического анализа вариаций геомагнитного поля и определения пространственно-временной структуры экстремальных геомагнитных возмущений по адресу <https://geomagnetic.ru/>. Система дает возможность визуализации и анализа в планетарном масштабе динамики как возмущений геомагнитного поля, так и variability поля (dB/dt).

## **6.9 Краткосрочный прогноз полярных сияний на базе технологии «виртуальный глобус»**

Наиболее активные проявления космической погоды, такие как перегрузка энергетических линий, вызванная ГИТ, сбои систем коротковолновой радиосвязи, и пр. наблюдаются в области аврорального овала. Для этой области характерно наличие резких градиентов и высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует сбои и значительно снижает устойчивость спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Назрела необходимость создания и практической апробации региональных моделей для арктической зоны РФ, позволяющих вести мониторинг и оперативный прогноз динамики аврорального овала при изменениях космической погоды. Погодонезависимым источником детальной информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния. В заметке [Vorobev et al., 2020b]



описывается новый веб-сервис для визуализации вероятности появления полярных сияний, построенный методами географических информационных систем (ГИС) на основании статистической модели авроральных высыпаний OVATION-prime. В качестве входных данных в этой модели используются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), передаваемые в режиме реального времени со спутников в точке Лагранжа L1 на линии Земля-Солнце (на удалении ~ 200 радиусов Земли).

Воздействие космической погоды на технологические системы в наибольшей степени проявляется в области аврорального овала. В этой области высок уровень турбулентности ионосферной плазмы, что значительно снижает устойчивость сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС, и течет мощный авроральный электроджет, вызывающий появление геоиндуцированных токов в линиях электропередач. В работе [Vorobev et al., 2020a] создан веб-сервис <http://aurora-forecast.ru/> для непрерывного мониторинга, визуализации и прогноза полярных сияний. Разработанная геоинформационная система представляет собой программную оболочку, построенную на базе технологии «виртуальный глобус» – мультимасштабной цифровой 3D-модели Земли, обеспечивающей визуализацию данных о планетарном распределении вероятности наблюдения полярных сияний. Основой сервиса служат выходные данные модели OVATION-prime, представляющие собой планетарную картину полярных сияний о параметрах межпланетной среды, поступающих с внемагнитосферных спутников в режиме реального времени. Разработанная модель может быть использована операторами технологических систем и наблюдателями полярных сияний для оперативного (30 мин) прогнозирования вероятности наблюдения полярных сияний, положения и геометрических характеристик аврорального овала в любой точке планеты.

#### **Список использованных источников**

Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Еникеев Т. А., Воробьева Г. Р. Геоинформационная система для анализа динамики экстремальных геомагнитных возмущений по данным наблюдений наземных станций // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 782–790. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-707.

Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Добровольский М. В., Козырева О. В., Евдокимова М. А. Новые региональные геомагнитные индексы для Российского сектора // Солнечно-Земная Физика. – 2021. – в печати.

Гусев Ю. П., Лхамдондог А., Монаков Ю. В., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. Оценка воздействия геоиндуцированных токов на пусковые режимы силовых трансформаторов // Электрические станции. – 2020. – №2. – С. 54–59.



Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи // Известия РАН, серия Физическая. – 2021. – Т. 85. – С. 439–444. DOI:10.31857/S0367676521030236.

Чинкин В. Е., Соловьёв А. А., Пилипенко В. А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60, № 5. – 588–599 DOI: 10.31857/S001679402005003X.

Fedorov E. N., Mazur N. G., Pilipenko V. A., Vakhnina V. V. Modeling ELF electromagnetic field in the upper ionosphere from power transmission lines // Radio Science. – 2020. – Vol. 55. – e2019RS006943. DOI: 10.1029/2019RS006943.

Marshalko E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., Murphy B. S., Rastaetter L., Ngwira C., Pulkkinen A. Exploring the influence of lateral conductivity contrasts on the storm time behavior of the ground electric field in the eastern United States // Space Weather. – 2020. – Vol. 18. – e2019SW002216. DOI:10.1029/2019SW002216.

Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I., Vorobeva G. R., Lorentzen D. A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the «virtual globe» technology // Russ. J. Earth. Sci. – 2020a. – Vol. 20. – ES6001. DOI:10.2205/2020ES000721.

Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Reshetnikov A. G., Vorobeva G. R., Belov M. D. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // Scientific Visualization. – 2020b. – Vol. 12. – P. 108–118. DOI:10.26583/sv.12.3.10.

Yagova N., Pilipenko V., Sakharov Ya., Selivanov V. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // Earth Planets Space. – 2021. – in press.



## **7 Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа**

Грант РФФИ: 17-17-01215

Номер регистрации: АААА-А18-118021990128-8

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

Ответственный исполнитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

### **7.1 Проведение непрерывных серий измерений на МГ УРАГАН вариаций потока мюонов космических лучей. Корректировка на метеоэффекты и подготовка данных к физическому анализу. Метод выявления геоэффективных гелиосферных событий. Модель КВМ**

Данный параграф с материалами МИФИ подразделяется на подпараграфы с рассмотрением вопросов первичного анализа данных и их подготовки к проведению физического анализа, подготовки рядов мюонных матриц во время магнитосферных возмущений, подготовки данных «Космической погоды» и выделение геоэффективных событий в гелиосфере, развитие метода заблаговременного выявления геоэффективных гелиосферных событий на основе анализа анизотропии мюонных матриц МГ УРАГАН и формирование скорректированной модели КВМ.

#### **7.1.1 Первичный анализ и паспортизация данных. Подготовка к физическому анализу**

В ходе выполнения этапа 2020 г. проекта были выполнены работы по обеспечению проведения экспериментальной серии, включающей анализ работоспособности супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН и формирование набор данных [Barbashina *et al.*, 2008]. Анализировались ряды первичных данных, полученных в течение непрерывной серии измерений пространственно-угловых вариаций потока мюонов на поверхности Земли с 01 января по 31 октября 2020 г. Данные были проверены на корректность с помощью анализа различных параметров (эффективность регистрации и т.п.), характеризующих корректность работы мюонного годоскопа. Время некорректной работы супермодулей за январь – октябрь 2020 г. составило: СМ01 – 9542 мин (2,2%); СМ03 – 11471 мин (2,6%); СМ04 – 11221 мин (2,6%). Потеря данных за счет остановок и некорректной работы незначительна (2,2% для СМ01, 2,6% для СМ03 и 2,6% для СМ04). Периоды некорректной работы были исключены из дальнейшего анализа.

### **7.1.2 Подготовка рядов мюонных матриц во время развития магнитосферных возмущений.**

На основе рядов первичных данных были сформированы последовательности угловых матриц трех типов, скорректированных на барометрический и температурный эффекты [Дорман, 1972; Дмитриева и др., 2015; Dmitrieva et al., 2011]: линейные матрицы  $M(\varphi, \theta)$  (без поправки на метеоэффекты),  $MCP(\varphi, \theta)$  (с поправкой на давление (CP)),  $MCPT(\varphi, \theta)$  (с поправкой на давление и температурный профиль (CPT)); проекционные матрицы  $M(\theta X, \theta Y)$  и проекционные тангенциальные матрицы  $M(tg\theta X, tg\theta Y)$ .

### **7.1.3 Подготовка данных «Космической погоды» и выделение геоэффективных событий в гелиосфере, связанных с различными проявлениями солнечной активности.**

Были подготовлены ежемесячные справки по космической погоде за период январь–октябрь 2020 года с использованием данных, доступных из всемирных баз данных: мониторинг вспышечной активности проводился по данным GOES [SpaceWeather, 2021]; отбор корональных выбросов масс велся из базы CACTus по данным спутников (коронограф LASCO) [CACTus, 2021]; состояние ближней гелиосферы отслеживалось по спутнику ACE [ACE, 2021]; магнитные возмущения на средних широтах, Kp-индекс [Kp-Index, 2021], магнитные возмущения на низких широтах, Dst-индекс [Real-time, 2021]. По полученным справкам был составлен список корональных выбросов масс, произошедших в 2020 году. Отбор производился из базы данных CACTus, при условии, что средняя скорость KBM ( $\langle VCME \rangle$ ) более 500 км/с. Корональные выбросы массы, произошедшие в 2020 году со скоростью более 500 км/с были негеоэффективны.

### **7.1.4 Развитие метода заблаговременного выявления геоэффективных гелиосферных событий на основе анализа анизотропии мюонных матриц МГ УРАГАН.**

На основе анализа рядов пространственно-угловых матриц были построены распределения GSE карт областей локальной анизотропии космических лучей и питч углов в периоды минимума солнечной активности 24-го солнечного цикла: 2009 и 2010, 2018 и 2019 гг. Результаты были сопоставлены с параметрами мощных геоэффективных событий и солнечных процессов, ответственных за формирование изучаемой анизотропии потока космических лучей. На основе анализа распределений областей деформаций и питч-углов с изменениями (повышений и понижений) потока КЛ на  $5\sigma$  и более. В данный



период наблюдались области деформации размером от 0,1 до 0,8 стерadians. Наиболее часто регистрировались области размером 0,4 стерadians в независимости от года. Анализ распределений питч-углов в рассмотренные годы показал, что в 2009 году наиболее часто частицы, зарегистрированные годоскопом, влетали в магнитосферу Земли с питч-углами в районе  $50^\circ$ , в 2010 году с углами около  $90^\circ$ , и, соответственно, в 2018 –  $50^\circ$  и в 2019 –  $80^\circ$ . Эти результаты являются важными с точки зрения изучения анизотропии космических лучей, и требуют дополнительного анализа. Не попадали в магнитосферу частицы с питч-углами  $180^\circ$  и  $0^\circ$  (направленные вдоль и против силовой линии магнитного поля).

### **7.1.5 Формирование скорректированной модели KBM.**

Ранее разработанная модель обратных траекторий космических лучей, дающих отклик в данных мюонного годоскопа, была поправлена с помощью метода интерполяции Рунге-Кутты, который позволяет более корректно строить движение частицы между точками разбиения. Поведение скорректированной модели было протестировано на модели KBM (корональных выбросов масс), разработанной на предыдущих этапах настоящего проекта. Методы Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядков показали в однородном поле очень близкие результаты. Это означает, что траектория частицы, с точностью до шага почти круговая, так как 2-й порядок почти идеально подходит для круговых траекторий. В неоднородных полях могут наблюдаться существенные различия, обусловленные наличием границ между разными полями. Особенно сильное отличие метода проявилось при отражении траектории частицы в околосолнечной зоне или на границе тора развивающегося KBM.

### **7.2 Методы и алгоритмы цифровой обработки временных рядов матричных наблюдений годоскопа УРАГАН решений задач распознавания локальных анизотропий мюонной диагностики для реализации предсказаний геомагнитных бурь**

Данный параграф с материалами ГЦ РАН подразделяется на подпараграфы рассмотрения построений системы функций интегральных аномальностей (функций 1,2,3) и формирование на основе построенных функций алгоритма предсказания (расознавания) геомагнитных бурь – распознаваний локальных анизотропий – мюонной диагностики на основе функций распределений интенсивностей потоков мюонов годоскопа УРАГАН.

### 7.2.1 Построение специального цифрового фильтра и функции 1 интегральных аномальностей

Рассматривалось решение задачи синтеза специального низкочастотного квазигауссовского цифрового фильтра (ЦФ) для обеспечения снижения шумов во временных рядах пуассоновских наблюдений. Результаты данной задачи ориентированы на формирование методов и алгоритмов для мюонной диагностики – раннего распознавания геомагнитных бурь на основе распознаваний локальных анизотропий (ЛА) в выходных функциях распределения интенсивностей мюонных потоков (ФРИПМ). Специальные требования к синтезируемому ЦФ состояли в необходимости обеспечения неотрицательности коэффициентов ЦФ и реализации для него малой частоты среза и малой размерности. Материалы данного подпараграфа базировались на результатах, продолженных в [Гетманов и др., 2018; Сидоров и др., 2019].

Синтезируемый ЦФ формировался в форме КИХ-фильтра. Задавалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) низкочастотного фильтра-прототипа в виде параметрической гауссовской кривой. Вычислялась задаваемая частота среза фильтра-прототипа. Вводился функционал – мера близости АЧХ фильтра-прототипа и АЧХ синтезируемого ЦФ, который оказался многоэкстремальным. Осуществлялось решение оптимизационной задачи аппроксимации гауссовской функции АЧХ фильтра-прототипа и с помощью функции АЧХ синтезируемого квазигауссовского ЦФ. Производились вычисления коэффициентов синтезируемого квазигауссовского ЦФ путём минимизации функционала с использованием метода случайного поиска глобального минимума многопараметрических функций с помощью алгоритма имитации физического процесса «отжига».

Было осуществлено сравнение АЧХ фильтров-прототипов, синтезированных квазигауссовских ЦФ и стандартных КИХ фильтров. Было установлено, что для малых частот среза и малых размерностей АЧХ синтезированных квазигауссовских ЦФ лучше аппроксимируют АЧХ фильтра-прототипа, чем АЧХ стандартных КИХ-фильтров. Последнее означало, что предлагаемые квазигауссовские фильтры в большей степени снижали шумы в пуассоновских МГ-наблюдениях, чем стандартные КИХ-фильтры; малая размерность квазигауссовских фильтров доставляла малые погрешности фильтрации переменных во времени локальных анизотропий (ЛА) в выходных ФРИПМ.

Была разработана схема тестирования ЦФ на модельных МГ-наблюдениях для оценивания эффективности – вычислений погрешностей фильтрации. В результате





проведённых вычислений было показано, что предлагаемые ЦФ обеспечивали снижение среднеквадратичных значений (СКЗ) погрешностей фильтрации, в среднем, на 20–30% больше, чем стандартные КИХ-фильтры.

Была разработана схема апробации ЦФ на экспериментальных данных на основе базы экспериментальных данных «Невод-МИФИ» с минутными и часовыми данными годоскопа УРАГАН, относящимися к месячному периоду июля 2015 г. В результате проведённых вычислений было показано, что предлагаемые ЦФ, эффективно снижающие шумы, обеспечивали успешное распознавания 2–3% понижений для ЛА.

Синтезированный низкочастотный квазигауссовский ЦФ был применён к временному ряду наблюдений ФРИПМ для построения функции 1 интегральных аномальностей.

### **7.2.2 Построение функции 2 интегральных аномальностей**

Рассматривалось решение задачи оценивания двумерных нормированных вариаций входных функций распределения интенсивностей мюонных потоков (ФРИПМ) для МГ. Результаты данной задачи ориентированы на формирование методов и алгоритмов для мюонной диагностики – раннего распознавания геомагнитных бурь на основе распознаваний ЛА в выходных ФРИПМ. К исходным ФРИПМ был применён фильтр из п.п.2.1.

Были произведены вычисления нормированных вариаций входных ФРИПМ [Гетманов и др., 2021; Добровольский и др., 2019], базирующихся на специальном введённом функционале, основанном на временных рядах матричных МГ-наблюдений, гипотезы о равномерных ФРИПМ, многопараметрической модели аппаратной функции. Были введены оценки нормированных аппаратных функций для МГ и на их основе сформированы оценки нормированных вариаций входных ФРИПМ.

Для снижения погрешностей оценивания нормированных вариаций входных ФРИПМ были разработаны: 1. специальная двумерная фильтрация со скользящими локальными кусочно-линейными моделями и взвешенным усреднением с регулируемыми размерами локальных моделей и шагом скольжения; 2. специальная пороговая фильтрация с регулируемым порогом. Используемые варианты фильтраций обеспечили приемлемые погрешности в оценках.

Были смоделированы аппаратные функций и входные пуассоновские матричные наблюдения ФРИПМ для статистического моделирования. Вычислялись оценки

математических ожиданий и СКЗ для определения погрешностей алгоритма вычисления нормированных вариаций. Вычисления модельных ЛА по предлагаемому подходу позволили сделать вывод о возможности распознавания ЛА с понижениями в 2–4%.

Была разработана программа вычисления статистических характеристик оценок нормированных вариаций ФРИПМ на экспериментальных матричных МГ-наблюдениях. Формировались модельные ЛА, которые модулировали рассматриваемые экспериментальные МГ-наблюдения. На основе произведённых расчётов были получены результаты, позволившие заключить об удовлетворительных возможностях использования оценок нормированных вариаций ФРИПМ для распознавания ЛА с понижениями 1–3%.

На основе решения задачи оценивания двумерных нормированных вариаций входных ФРИПМ для МГ реализовывалось построение функции 2 интегральных аномальностей.

### **7.2.3 Построение функции 3 интегральных аномальностей**

Было рассмотрено решение задачи распознавания ЛА на основе временных рядов выходных ФРИПМ для МГ. К исходным ФРИПМ был применён фильтр из п. 7.1. Главная особенность рассмотрения, в отличие от п. 7.2. состоит в том, что в предлагаемом решении исключено промежуточное оценивание аппаратной функции, являющееся, в определённой степени, проблемным. Результаты задачи ориентированы на формирование методов и алгоритмов для мюонной диагностики – раннего распознавания геомагнитных бурь. Была сформулирована постановка задачи распознавания ЛА во временных рядах матричных МГ-наблюдений, базирующаяся на введённых индикаторных матрицах [Getmanov *et al.*, 2020; Dobrovolsky *et al.*, 2019].

Произведены вычисления для задачи распознавания ЛА на основе введения эталонных и текущих временных участков наблюдений, нахождении эталонных и текущих доверительных интервалов для оценок математических ожиданий пуассоновских матричных МГ-наблюдений, оценивании матриц аномальностей на основе систем доверительных интервалов. Вычислены индикаторные матрицы, определяющие распределение аномальностей в МГ-наблюдениях, в зависимости от пространственных и временных координат.



Сформирован алгоритм пространственно-временной фильтрации повышения эффективности распознавания областей с ЛА для временных рядов индикаторных матриц МГ-наблюдений.

Вычислялись модельные аппаратные функции и модельные входные пуассоновские матричные выходные ФРИПМ с модуляционными ЛА-понижениями. Вычислялись временные ряды модельных индикаторных матриц и реализовывалась их пространственно-временная фильтрация. Были продемонстрированы возможности модельных индикаторных матриц для уверенного распознавания модельных 2–4%-х ЛА-понижений.

Были вычислены индикаторные матрицы для временных рядов экспериментальных МГ-наблюдений с модельными ЛА-понижениями. Вычислялись временные ряды экспериментальных индикаторных матриц и реализовывалась их пространственно-временная фильтрация. Были продемонстрированы возможности индикаторных матриц для уверенного распознавания 2–4%-х ЛА-понижений в экспериментальных МГ-наблюдениях.

На основе решения задачи распознавания ЛА во временных рядах матричных МГ-наблюдений, базирующейся на использовании введенных индикаторных матриц, реализовывалось построение функции 3 интегральных аномальностей.

#### **7.2.4 Применение системы построенных функций 1, 2, 3 интегральных аномальностей для мюонной диагностики распознавания геомагнитных бурь**

Была рассмотрена, в предварительном порядке, задача распознавания геомагнитных бурь, базирующаяся на системе введенных функций 1, 2, 3 интегральных аномальностей (п. 7.2.1–7.2.3), основанных на выходных ФРИПМ (п. 7.2.1), нормированных вариациях выходных ФРИПМ (п. 7.2.2), индикаторных матрицах (п. 7.2.3) и специальных решающих правилах.

На основе базы данных «Невод-МИФИ» с минутными данными годоскопа УРАГАН были сформированы временные ряды экспериментальных МГ-наблюдений, относящиеся к выбранному двухлетнему периоду 2016–2017 гг.

Были произведены вычисления функций 1, 3 интегральных аномальностей и их последующая низкочастотная фильтрация с целью удаления в них суточных возмущений. Программным образом были определены координаты локальных минимумов функций 1, 3 интегральных аномальностей; принималось, в достаточной степени, правдоподобное

предположение, которое состояло в том, что локальные минимумы с большой вероятностью связаны с Форбуш-понижениями.

Был сформирован временной ряд Кр-индексов геомагнитной активности из базы данных «International Service of Geomagnetic Indices» с трёхчасовой дискретностью для выбранного двухлетнего периода 2016–2017 гг. Были определены координаты геомагнитных бурь, для которых выполнялось неравенство  $K_p > K_{p0}$ ; принималась величина порога  $K_{p0}=4$ .

Были рассмотрены взаимные положения во времени событий-геомагнитных бурь на основе Кр-индексов и событий-локальных минимумов функций 1, 3 интегральных аномальностей.

Проведённый, в предварительном порядке, на основе анализа временных координат взаимных положений было обнаружено, что вполне определённому количеству событий-геомагнитных бурь предшествуют во времени вполне определённое количество событий-локальных минимумов функций интегральных аномальностей. Данное обнаруженное важное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности использования предложенного подхода для обеспечения предсказания раннего распознавания геомагнитных бурь на основе временных рядов матричных МГ-наблюдений.

## **Заключение**

1.1 Получены экспериментальные данные непрерывных серий измерений на МГ УРАГАН по регистрации вариаций потока мюонов космических лучей за 2020 год. Данные были подготовлены к физическому анализу для использования развития методов заблаговременного выявления потенциально опасных геоэффективных КВМ в гелиосфере.

1.2 На основе составленных ежемесячных справок по «Космической погоде» за 2020 г. был сформирован список мощных геоэффективных событий и их характеристик. Анализ полученных данных по КВМ показал, что мощных геоэффективных событий в 2020 году не было обнаружено. Геомагнитная активность, в основном, была связана с рекуррентными возрастаниями высокоскоростного солнечного ветра.

1.3 Были проанализированы характеристики и периоды появления областей анизотропии космических лучей в угловых распределениях потока мюонов,



зарегистрированных МГ УРАГАН. Полученные данные были сопоставлены в минимумах 24-го СЦ 2009–2010 и 2018–2019 гг.

1.4 Полученная ранее модель обратных траекторий была скорректирована с помощью метода интерполяции Рунге-Кутты, который позволяет более корректно строить движение частицы между точками разбиения. Реализованные поправки дают более реалистичные оценки поведения обратных траекторий частиц КЛ в турбулентных зонах в околосолнечной области и в турбулентных областях развивающегося КВМ.

2.1 В результате вычислений было показано, что квазигауссовские ЦФ обеспечивали снижение среднеквадратичных значений (СКЗ) погрешностей фильтрации, в среднем, на 20–30% больше, чем стандартные КИХ-фильтры, и реализовывали успешное распознавание 2–3% понижений для ЛА. Благодаря процедуре синтеза квазигауссовский ЦФ оказался успешно применённым к временному ряду наблюдений ФРИПМ для построения функции 1 интегральных аномальностей.

2.2 На основе произведённых расчётов были получены результаты, позволившие заключить об удовлетворительных возможностях использования оценок нормированных вариаций ФРИПМ для распознавания ЛА с понижениями 1–3%. С использованием решения задачи оценивания двумерных нормированных вариаций входных ФРИПМ для МГ реализовывалось построение функции 2 интегральных аномальностей.

2.3 Были продемонстрированы возможности индикаторных матриц для уверенного распознавания 2–4%-ых ЛА-понижений в экспериментальных МГ-наблюдениях. На основе решения задачи распознавания ЛА во временных рядах матричных МГ-наблюдений, базирующейся на использовании введённых индикаторных матриц, реализовывалось построение функции 3 интегральных аномальностей.

### Список использованных источников

Дмитриева А. Н., Барбашина Н. С., Ковыляева А. А., Чернов Д. В. Учет температурного разреза атмосферы в данных мюонного годоскопа УРАГАН с использованием данных ЦАО, GDAS и информации «АЛИСА-СК»: 2007–2014 гг. // Известия РАН: серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 3. – С. 417–419. DOI: 10.7868/S0367676515030151

Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей. – М.: Наука, 1972. – 211 с.

ACE Database. NOAA, Space Weather Prediction Center. – URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/> (дата обращения 02.03.2021). Kp-Index Database. NOAA, Space Weather Prediction Center. – URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/plots/kp/> (дата обращения 02.03.2021).



Barbashina N. S., Kokoulin R. P., Kompaniets K.G, Mannocchi G., Petrukhin A. A., Saavedra O., Timashkov D. A., Trinchero G., Chernov D. V., Shutenko V. V., Yashin I. I. The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – Vol. 51. – P. 180–186. DOI: 10.1134/S002044120802005X

CACTus 2.5.0 LASCO catalog. – URL: <http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php> (дата обращения 01.03.2021).

Dmitrieva A. N., Kokoulin R. P., Petrukhin A. A., Timashkov D. A. Corrections for temperature effect for ground-based muon hodoscopes // Astroparticle Physics. – 2011. – Vol. 34. – No. 6. – P. 401–411. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2010.10.013

Real-time (Quicklook) Dst index. [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/index.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html). (дата обращения 02.03.2021)

SpaceWeather.com – News and information about meteor showers, solar flares, auroras, and near-Earth asteroids. – URL: <http://www.spaceweather.com/> (дата обращения 02.03.2021).

Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А., Богоутдинов Ш. Р., Яшин И. И., Дмитриева А. Н., Ковыляева А. А., Астапов И. И. Фильтрация наблюдений угловых распределений мюонных потоков от годоскопа УРАГАН // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 3, № 6. – С. 506–512.

Гетманов В. Г., Чинкин В. Е., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Крянев А. В., Яшин И. И. Метод оценивания нормированной аппаратной функции мюонного годоскопа УРАГАН // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». – 2021. – Т. 18, № 1(233). – С. 135–148.

Добровольский М. Н., Астапов И. И., Барбашина Н. С., Гвишиани А. Д., Гетманов В. Г., Дмитриева А. Н., Ковыляева А. А., Петрухин А. А., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А., Шутенко В. В., Яшин И. И. Метод поиска локальной анизотропии потоков мюонов в матричных данных годоскопа УРАГАН // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, №5. – С.706–708.

Сидоров Р. В., Астапов И. И., Барбашина Н. С., Гвишиани А. Д., Гетманов В. Г., Дмитриева А. Н., Добровольский М. Н., Соловьёв А. А., Чинкин В. Е., Шутенко В. В., Яшин И. И. Метод устранения суточных вариаций потоков мюонов для матричных наблюдений годоскопа УРАГАН // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83, № 5. – С. 709–711.

Dobrovolsky M. N., Astapov I. I., Barbashina N. S., Gvishiani A. D., Getmanov V. G., Dmitrieva A. N., Kovilyaeva A. A., Peregoudov D. V., Petrukhin A. A., Sidorov R. V., Soloviev A. A., Shutenko V. V., Yashin I. I. A way of detecting local muon-flux anisotropies with the matrix-form data of the URAGAN hodoscope // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83. No. 5. – P. 647–649.

Getmanov V. G., Sidorov R. V., Dobrovolsky M. N., Dmitrieva A. N., Yashin I. I., Perederin F. V. Two-dimensional filtering method using systems of local model functions for muonogram analysis // Pattern Recognitions and Image Analysis. – 2020. Vol. 30. №3. – P.460–469.



## 8 Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов

Грант РФФИ: 18-17-00241

Номер регистрации: АААА-А18-118091090066-5

Руководитель: акад. А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: к. ф.-м.н. Б. А. Дзебоев, д.т.н. В. И. Кафтан,  
д.т.н. В. Н. Татарин

В 2020 г. было продолжено наполнение базы данных, реализованной в среде ESRI ArcGIS for Desktop. Она содержит интеллектуальные алгоритмические модули анализа на языке Python и 12 информационных слоев [Гвишиани и др., 2021]. На базу данных получен РИД [Лосев и др., 2020].

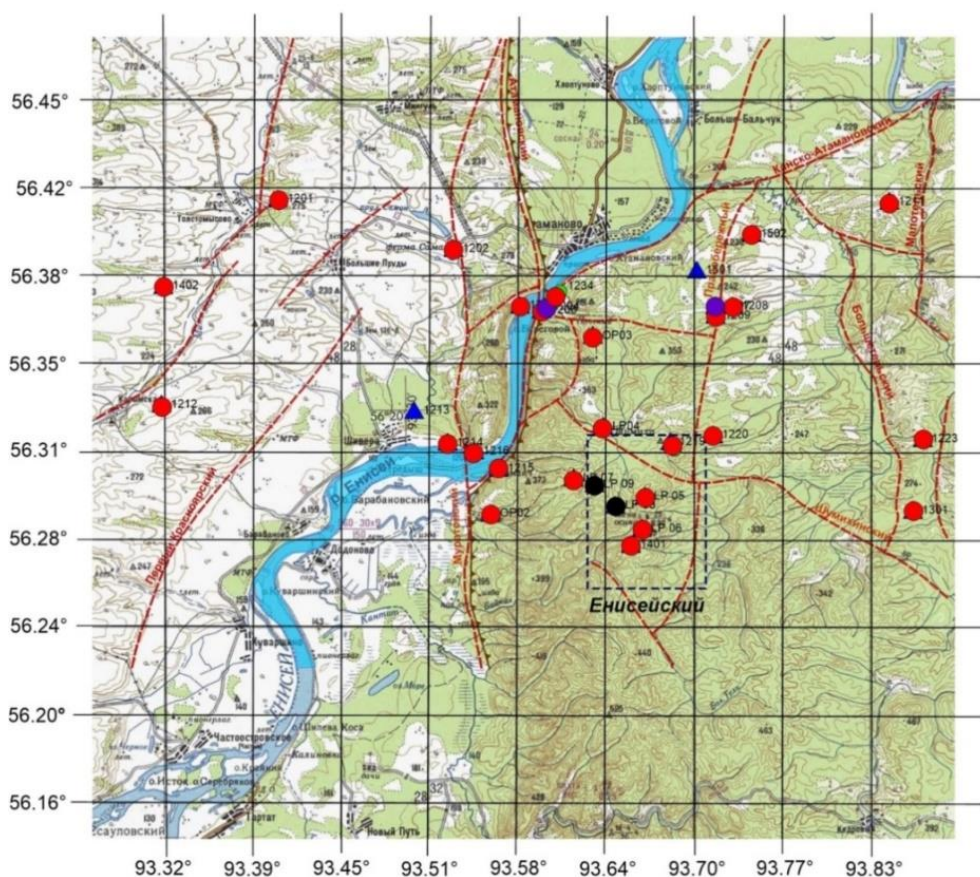
С 17 по 28 сентября 2020 г. были проведены полевые геодезические наблюдения на геодинамическом полигоне (Нижнеканский массив, г. Железнодорожный, Красноярский край). Цель – получение новых данных о современных движениях земной коры, экспериментальная проверка методики высокоточных полевых наблюдений и методики полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры.

На рис. 8.1 показано расположение ГНСС-пунктов.

Во время экспедиции были выполнены:

- ☐ измерения на 25 ГНСС-пунктах с целевым показателем продолжительности записи более 4-х часов;
- ☐ серии методических парных измерений на контрольном векторе различными типами ГНСС-приемников – *Javad Delta 3N*, *Trimble Geo 7X*, *Topcon Hiper SR*, *PrinCe i50*;
- ☐ рекогносцировочное обследование 31-го ГНСС-пункта и восстановительные работы на 3-х ГНСС-пунктах геодинамического полигона.

При экспериментальной проверке ГНСС-приемников и методики контроля точности в полевых условиях использовалось 4 типа ГНСС-приемников. Полученные результаты характеризуют реальную точность ГНСС-измерений в условиях залесенности территории. Получены стохастические оценки точности в плане и высоте – 3,7 и 5,2 мм. Это почти вдвое ниже оценок, заявленных производителями ГНСС-приемников. В контрольных измерениях использовалось 5 комплектов ГНСС аппаратуры. Это дало возможность образовать 10 сочетаний при измерении одного и того же вектора. В табл. 8.1 приведены результаты контроля точности на базисе пункт ОЗ02 – пункт 1215.



**Рисунок 8.1 – Схема геодинимической сети эпохи 2020 г. (синие треугольники – точки без измерений, красные кружки – ГНСС-пункты на которых были выполнены измерения, синие – ГНСС-пункты на которых были выполнены измерения, но запись сигналов забракована)**

**Таблица 8.1 – Результаты контроля точности ГНСС-аппаратуры**

Вероятнейшие значения	Компонента $dE$ (мм)		Компонента $dN$ (мм)		Компонента $dU$ (мм)	
	$\delta E$	$m_{\delta E}$	$\delta N$	$m_{\delta N}$	$\delta U$	$m_{\delta U}$
1	2	3	4	5	6	7
$x_1$	3,5	4,0	0,6	3,3	– 1,4	3,6
$x_2$	– 3,0	4,2	1,4	3,5	0,4	3,9
$x_3$	2,0	4,0	– 0,5	3,3	– 2,6	3,6
$x_4$	– 0,6	3,9	– 2,7	3,2	1,0	3,4
$x_5$	– 1,8	4,1	1,2	3,4	2,6	3,9

Видно, что детерминированные компоненты имеют случайный характер, так как они не превышают значимо их стохастические оценки – средние квадратические ошибки. Можно утверждать, что результаты характеризуют реальную точность ГНСС измерений в условиях залесенной местности и все комплекты ГНСС-аппаратуры обеспечивают практически равнозначные и удовлетворительные измерения.



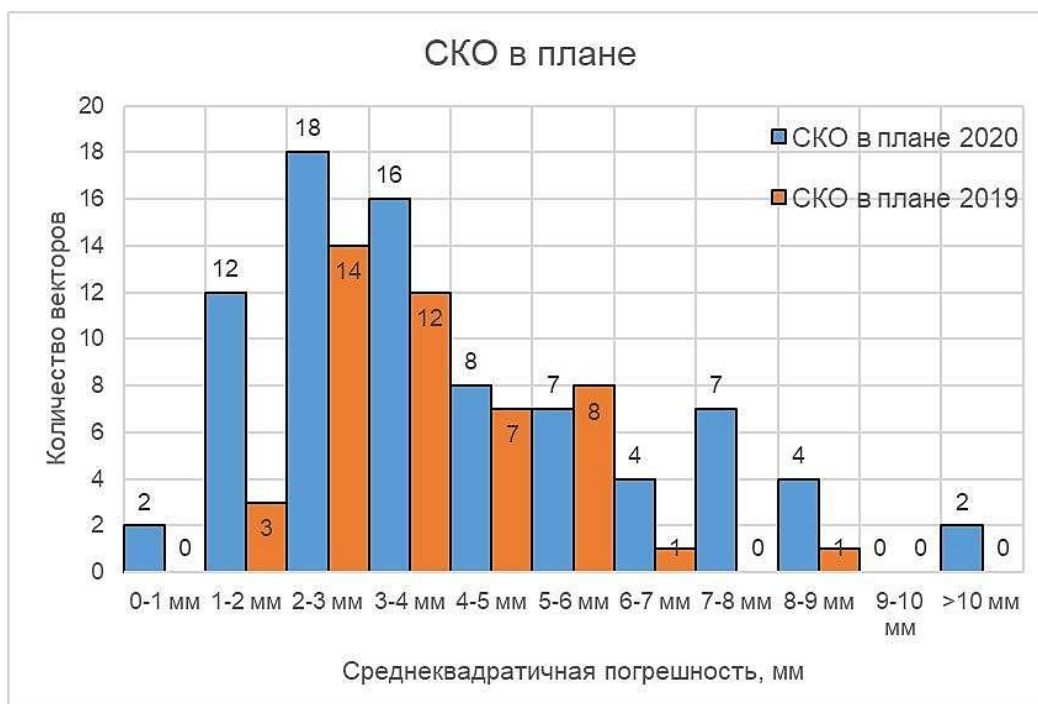
Были также обработаны данные двух циклов (2019 и 2020 гг.) ГНСС-измерений и выполнено их уравнивание. Результаты обработки продемонстрировали высокую точность определения смещений пунктов – до 2,5 мм в плане и 3 – 6 мм по высоте (рис. 8.2).

По результатам ГНСС-наблюдений построена карта скоростей современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского [Гвишиани, 2020]. Установлены границы крупных структурных блоков с различными кинематическими характеристиками (направление движений, абсолютные значения скоростей). Для центральной и восточной части района отмечена наибольшая изменчивость в распределении векторов (вплоть до смены на  $180^\circ$ ) при скоростях – более 4 мм/год. Скорее всего, это следствие взаимодействия крупнейших структур – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Вдоль контакта этих структур, а также по Атамановскому отрогу Енисейского кряжа зарегистрирована граница изменения направления современных движений.

Была оценена современная подвижность зоны контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты и ее влияние на устойчивость структурного тектонического блока, в котором планируется захоронение РАО. Основой для интерпретации стали векторы базовых линий и их корреляционные матрицы, полученные в результате статистической обработки и диагностического уравнивания циклов измерений с 2010 по 2020 гг. Скорости СДЗК были проанализированы в совокупности с многолетними данными высокоточного нивелирования I-класса и геофизических исследований.

Отмечено, что в 2013–2014 гг. произошла резкая активизация геодинамического режима района, проявившаяся в реверсе деформаций сжатия и растяжения на правобережной и левобережной частях р. Енисей. Анализ результатов ГНСС-наблюдений позволяет сделать предварительный вывод, что район в целом испытывает субширотное сжатие по азимуту  $100\text{--}110^\circ$ .

Построена кинематическая модель современных движений [Гвишиани и др., 2020], позволяющая оценить направления горизонтальных блоковых движений и провести геодинамическое районирование территории (рис. 8.3). Движения на Площадке подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) и вмещающего ее структурного блока более однородные и равномерные, чем по его границам. Наибольшие градиенты движений приходится на западную часть блока, находящегося между площадкой и контактом Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты по Атамановскому разлому.

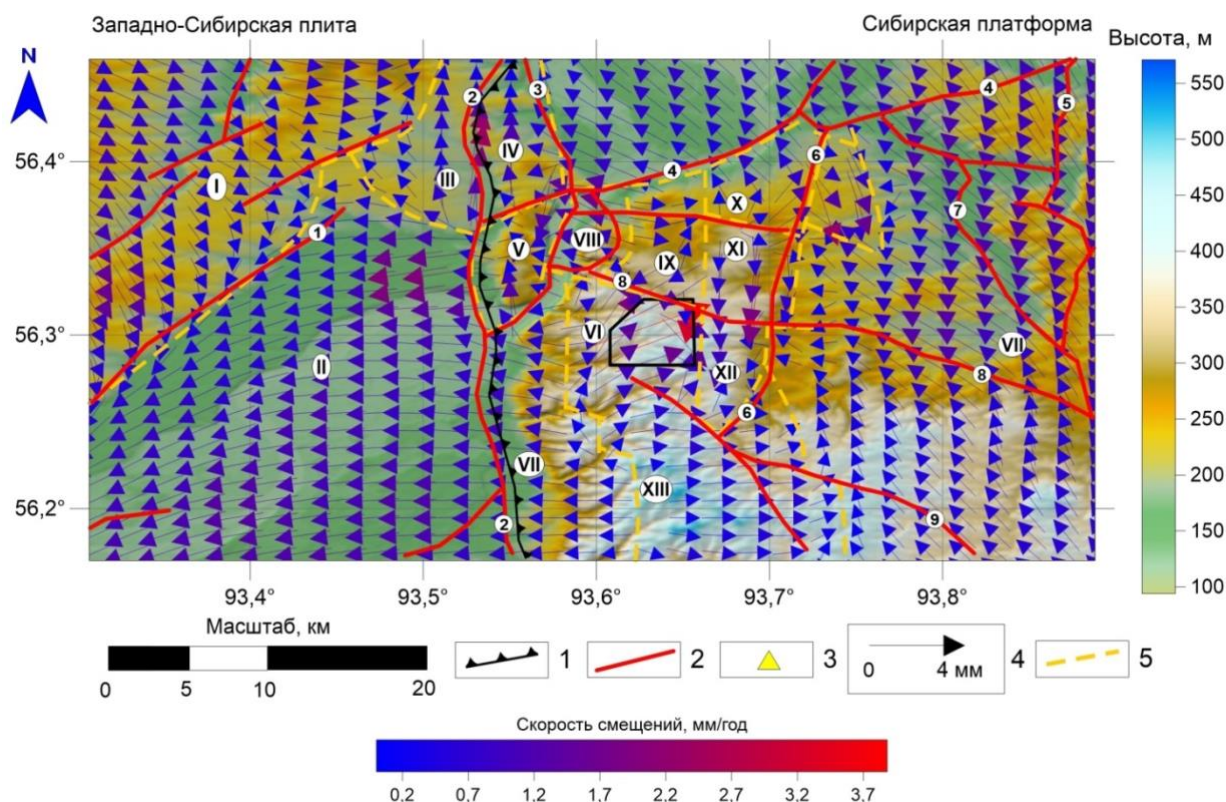


**Рисунок 8.2 – Средние квадратические ошибки (СКО) определения планового положения ГНСС-пунктов**

Полученная модель хорошо согласуется с результатами структурно-геологических и геодинамических исследований в данном районе [Верниковский, 2020]. Сравнивая рассчитанные величины дилатации с критериями, которые приведены в литературе для геодинамических активных зон ( $\Delta = \pm 5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$  в год), можно утверждать, что район характеризуется относительно слабыми скоростями деформаций земной коры.

В рамках геодинамического районирования территории были построены карты компонент тензора и интенсивности напряжений, мер активности динамических показателей для северной части Нижнеканского массива. Выявлены локальные зоны концентрации напряжений (концентрация упругой энергии деформации), в которых наиболее вероятна деструкция породного массива в результате тектонического крипа, образования новых разрывов или сейсмических явлений. Мощная субмеридионально вытянутая область высоких значений интенсивности напряжений, более 30 МПа, получена на западе от границы Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы. Скорее всего, она связана со сдвиговым характером СДЗК по зоне контакта и отсутствием широтных разломов, способствовавших реализации накопленных тектонических напряжений. Выделяются локальные области концентрации интенсивности напряжений, приуроченные к концам разломов, а также области пониженных значений вдоль трассы разломов.





**Рисунок 8.3 – Поле средних скоростей современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы; 3 – ГНСС-пункты; 4 – векторы скоростей СДЗК ГНСС-пунктов, мм/год; 5 – активные геодинамические зоны, соответствующие границам структурных блоков с различными кинематическими характеристиками. Латинскими цифрами обозначены тектонические блоки, выделенные по данным ГНСС-наблюдений**

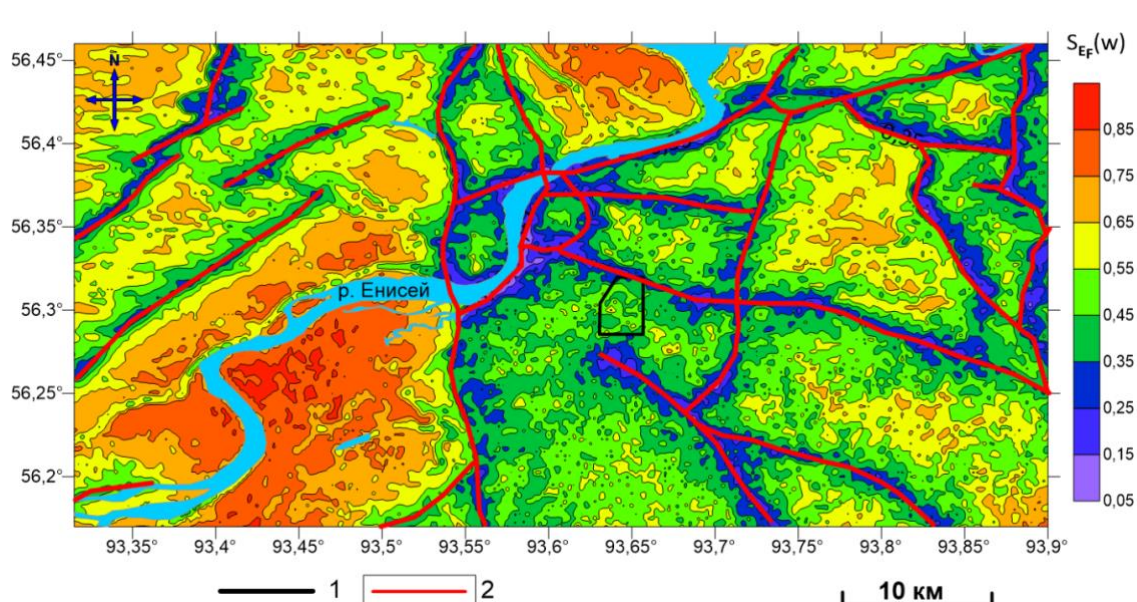
Площадка ПИЛ находится в области низких значений напряжений. Зоны концентрации напряжений на ближайших активных разломах Правобережном и Шумихинском не зафиксированы, т.к. напряжения реализуются в виде активных движений. С юга от ПИЛ формируется зона повышенной интенсивности напряжений на замыкании Байкальского разлома. Северо-западнее находится другая область, образованная замыканием Шумихинского разлома. Теоретически эти зоны могут взаимодействовать, воздействуя на площадку ПИЛ.

В 2020 г. были продолжены работы по составлению карт динамической устойчивости и интегральной меры геодинамической безопасности района расположения ПИЛ, начатые в прошлом году. Теоретические основы подхода представлены в работе [Гвишиани и др., 2019]. Результаты тестирования методики опубликованы в [Гвишиани и др., 2020]. Были обработаны цифровая модель рельефа SRTM-4, 1" × 1" (30 × 30 м), по данным спутниковой радарной топографической съёмки и карты результатов моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС), а также проведён расчет интегральной меры геодинамической безопасности по 5 характеристикам геологической среды.

Структурный блок, где строится ПИЛ, рассматривается как часть динамической системы, имеющей внутренние и внешние источники энергии, определяющие пространственно-временную эволюцию структуры и НДС, отражающиеся в особенностях распределения геофизических полей, рельефа, полей напряжений, скоростей СДЗК и т.д. Для районирования территории была разработана методология и алгоритм расчета интегральной меры геодинамической безопасности  $S_{Ef}(w)$  на основе ДМА, учитывающий геоморфологические характеристики (абсолютные высоты, градиент, крутизна), плотность разломов, результаты моделирования НДС и ГНСС-наблюдений. На рис. 8.4 представлена мера  $S_{Ef}$ , построенная по геоморфологическим особенностям рельефа и меры близости к тектоническим разломам.

Были введены новые характеристики НДС района. Шкала устойчивости (безопасности) скорректирована и разделена на 3 части: условно безопасные  $S_{Ef} > 0,65$ , нейтральные  $0,45 < S_{Ef} < 0,65$  и опасные  $S_{Ef} < 0,45$ . Показатель геодинамической безопасности изменяется на всей территории района в интервале  $[0,25-0,78]$ . Большинство значений (около 50%) попадают в интервал  $[0,5-0,65]$  и их можно определить как «нейтральные». Оставшиеся – примерно поровну (по 25%) распределяются по нормальному закону по обе стороны.

Установлено, что правобережная область, включая площадку ПИЛ, находится в зоне с  $S_{Ef} \approx 0,48-0,5$ . Площадка ПИЛ располагается между тремя зонами с  $S_{Ef} < 0,45$ . Эти кластеры приурочены к местам окончания Байкальского и Шумихинского разломов пересечению Шумихинского и Правобережного разломов.



**Рисунок 8.4 – Пример расчета интегральной меры геодинамической безопасности  $S_{Ef}$ , учитывающей геоморфологию и близость к разломам**

Было пересчитано НДС района, с использованием результатов ГНСС-наблюдений для задания граничных условий. Были получены карты распределения компонент тензора напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ .

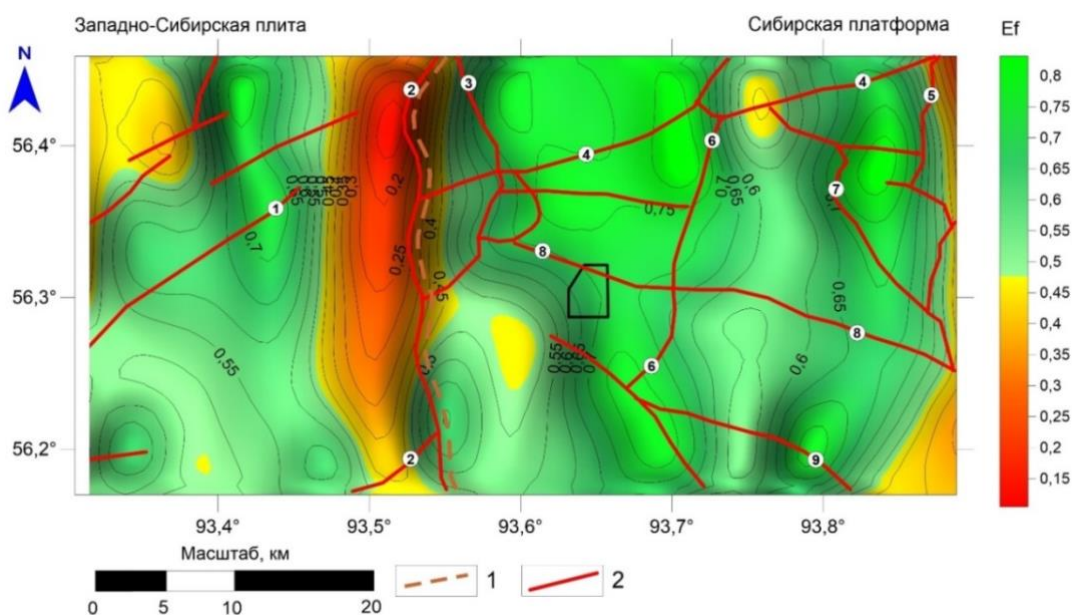
Для оценки НДС состояния были выбраны две меры активности:

1. Мера активности динамического показателя  $\sigma_i$ , т.к. формула ее расчета включает в себя все остальные компоненты напряжений (рис. 8.5).

2. Мера активности, рассчитанная по показателям динамической активности компонент тензора напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ , приведенных выше. Общая мера рассчитывается как среднее арифметическое значение от двух показателей, показывая усредненный вклад каждой компоненты напряжений в развитие тектонических процессов деструкции геологической среды (рис. 8.7).

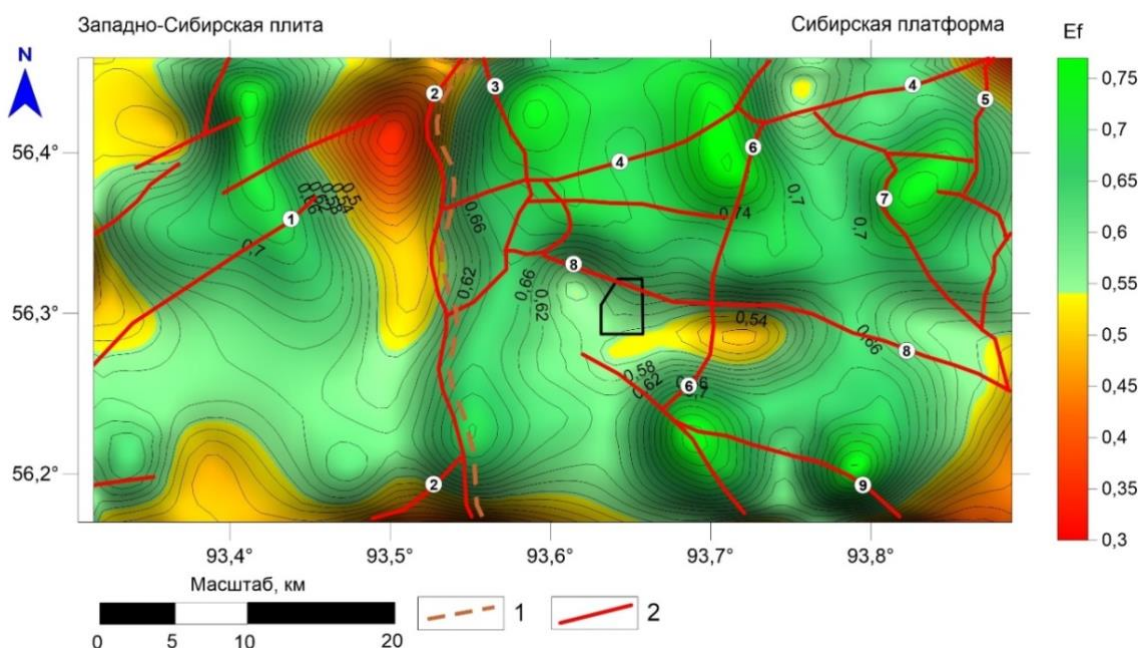
Вычисление интегральной меры  $S_{Ef}$  на данном этапе происходило на основе соединения трёх мер активности динамических показателей. Из мер активности НДС была выбрана интенсивность напряжений, т.к. она имеет понятную физическую интерпретацию. Чем ближе численное значение интегральной меры к 1 – тем устойчивее ячейка, и наоборот, чем ближе к 0 – тем ячейка неустойчивее.

Карта интегральной меры геодинамической безопасности приведена на рис. 8.8. Полученные результаты позволяют дать обоснование постановки геофизических исследований для подтверждения расположения и активности тектонических структур.



**Рисунок 8.5 – Мера активности динамического показателя интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в районе Нижнеканского массива. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы**





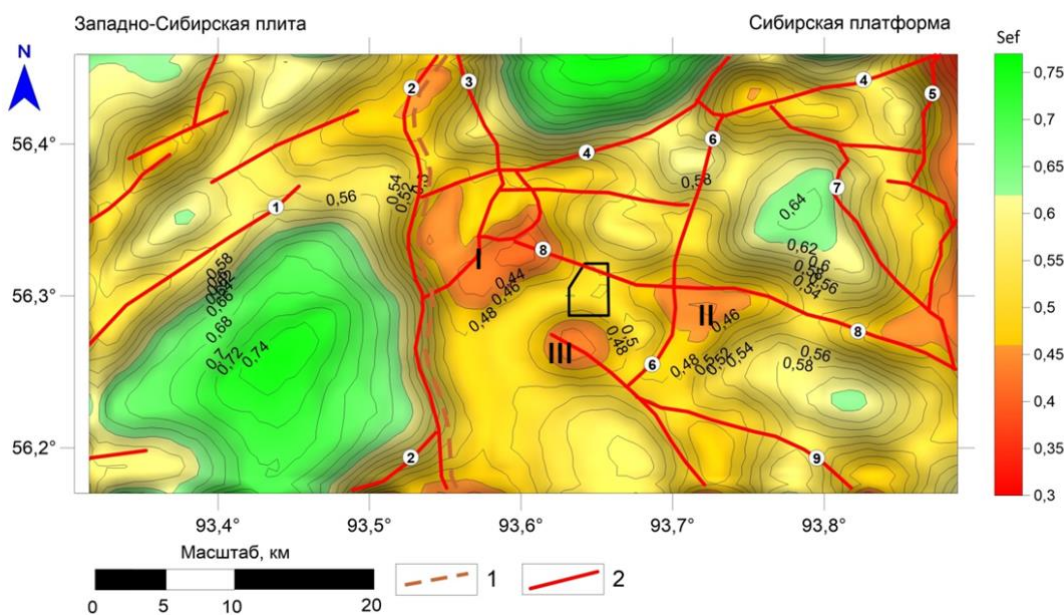
**Рисунок 8.6 – Мера активности динамических показателей компонент тензора напряжений  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  в районе Нижнеканского массива. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы. Зеленый цвет среда более устойчивая  $S_{Ef} > S_{\text{среднее}}$ , красный – неустойчива  $S_{Ef} < S_{\text{среднее}}$**

Шкала карты разделена на 3 части и скорректирована по сравнению со шкалой, принятой ранее – в отчете за 2019 г.:

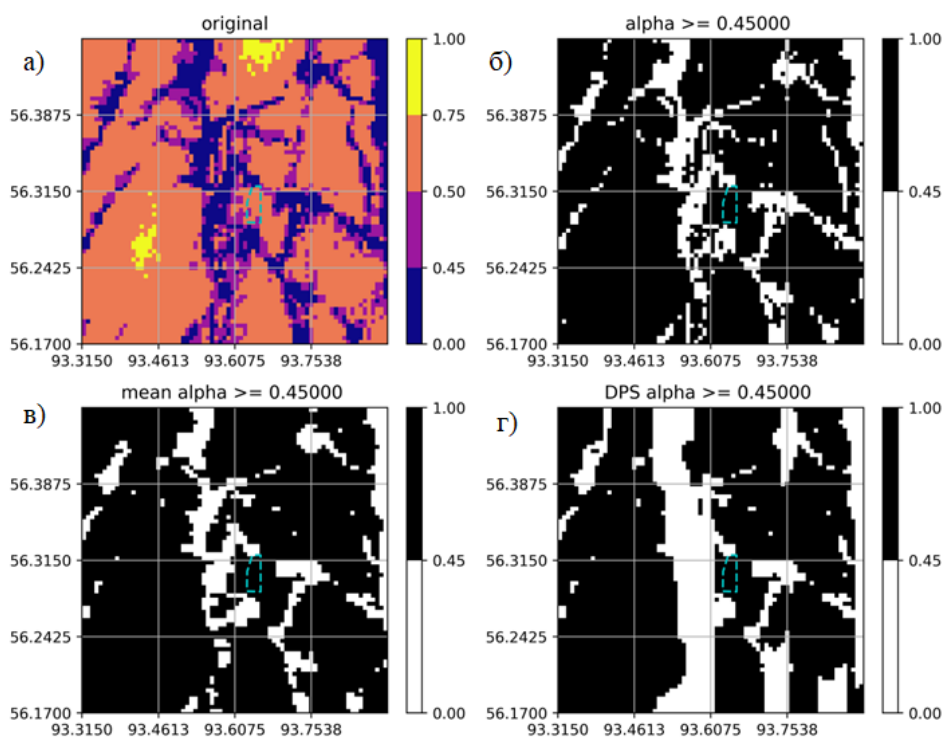
- ☐ условно безопасные ( $S_{Ef} > 0,65$ ),
- ☐ нейтральные ( $0,45 < S_{Ef} < 0,65$ ),
- ☐ опасные ( $S_{Ef} < 0,45$ ).

На рис. 8.7 римскими цифрами показаны три выявленные в результате системного анализа геодинамические неустойчивые зоны (красный цвет). В дальнейшем необходимо сосредоточить исследования в первую очередь на этих участках.

Для оценки устойчивости структурных тектонических блоков земной коры предложен функциональный алгоритм DPS, продолжающий ряд алгоритмов DPS (простой, теоретико-множественный). Описание алгоритма *FDPS* приведено в работе [Агаян и др., 2020]. *FDPS* был протестирован на двух конкретных примерах по Нижнеканскому массиву: первый пример для участка Енисейский, второй для всего района исследования. На рис. 8.8 показаны результаты кластеризации функциональным алгоритмом *FDPS* интегральной меры геодинамической безопасности  $S_{Ef}$  для района.



**Рисунок 8.7 – Интегральная мера геодинамической безопасности  $S_{ef}$  района Нижнеканского массива. 1 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы (красный цвет – наименее устойчивые зоны). Римскими цифрами показаны выявленные в результате системного анализа геодинамические неустойчивые зоны**



**Рисунок 8.8 – Результаты кластеризации функциональным алгоритмом DPS интегральной меры геодинамической безопасности  $S_{ef}$  для района исследований. а) исходные данные; б)–г) итерации кластеризации**



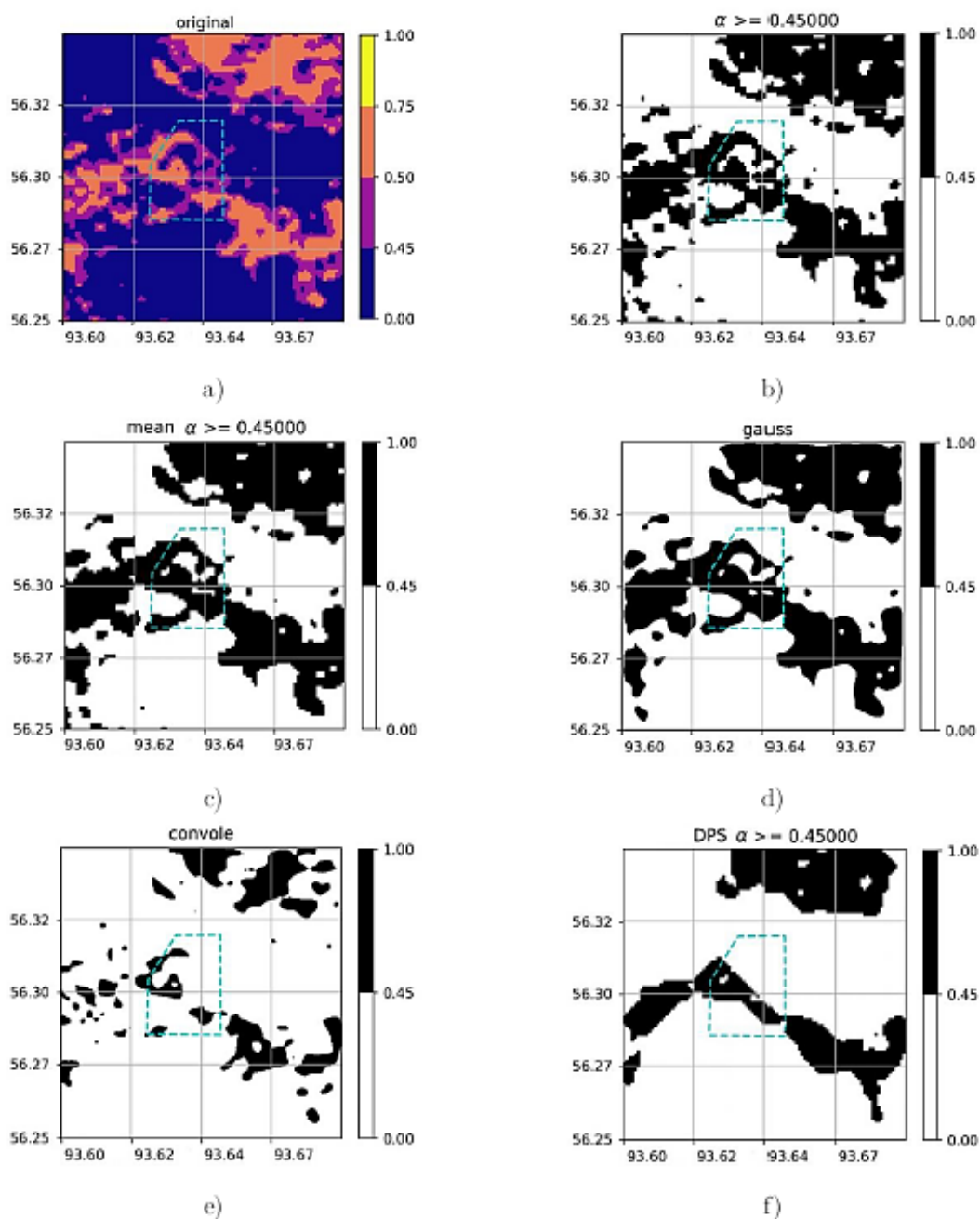
Эффективность работы FDPS была проверена путем сравнения с результатами расчетов традиционными алгоритмами. Итоговая мера геодинамической безопасности в определенной степени наследует стохастичность рельефа и разломов, лежащих в ее основе (рис. 8.9a). Поэтому, выбрав некоторый уровень  $\alpha$ , например,  $\alpha = 0,45$ , мы видим (рис. 8.9b), что множество  $\alpha$ -устойчивых узлов имеет сложную топологию. Ее необходимо упростить, т.е. выделить только массивные области с возможными исправлениями незначительных внутренних потерь  $\alpha$ -устойчивости для окончательной оценки геодинамической безопасности.

Традиционные методы (обычное усреднение (рис.8.8с), свертка с ядром Гаусса (рис. 8.9d) [Shapiro and Stockman, 2001; Nixon and Aguado, 2019], пирамидальное сглаживание (рис. 8.9e) [Steven, 1999]) не решают проблему. Необходимое упрощение достигается с помощью алгоритма FDPS.

На рис. 8.9f показан результат использования FDPS с выбранным уровнем плотности для меры, представленной на рис. 8.9a. На рис. 8.9f четко видно, что зона с меньшей величиной  $S_{Ef}$  пересекает горный отвод ПИЛ в направлении с юго-востока на северо-запад, совпадая с тектоническим нарушением (Шумихинский разлом).

Таким образом, развитие методов и алгоритмов системного анализа данных позволило в результате выполнения проекта получить новые фундаментальные знания о геодинамическом режиме северной части Нижнеканского массива. Разработанная оригинальная методология ГНСС-наблюдений и системного анализа геопространственных геолого-геофизических данных может быть использована и для других объектов, требующих выполнения геодинамического районирования и оценки состояния геологической среды, например, месторождений полезных ископаемых, особо ответственных и экологически опасных объектов, трубопроводов и др.

В 2020 году опубликованы 5 статей в журналы, индексируемых в Web of Science и Scopus, получен 1 РИД.



**Рисунок 8.9 – Результаты сравнения выделения аномальных зон в районе Нижнеканского массива различными алгоритмами по интегральной мере безопасности**

#### **Список использованных источников**

Верниковский В. А. Тектоника и геодинамика Енисейского кряжа в неопротерозое  
Тектоника и геодинамика Енисейского кряжа в неопротерозое // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 18. – 2020. – С. 56–58.

Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Агаян С. М., Лосев И. В., Маневич А. И. ГИС-ориентированная база данных для системного анализа и прогноза геодинамической устойчивости Нижнеканского массива // Исследование Земли из космоса. 2021. №1.

Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзедобоев Б. А., Лосев И. В. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Академии наук. 2020. Т. 493. № 1. С. 73–77. DOI: 10.31857/S2686739720070075.

Лосев И. В., Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Маневич А. И. Св. о госрег. База данных для ЭВМ. № 2020622380 от 23.11.2020. «База данных по геодинамике Нижнеканского массива (Geodynamic DataBase)».

Agayan S.M., Tatarinov V.N., Gvishiani A.D., Bogoutdinov Sh.R., Belov I.O. Functional DPS in assessing sustainability structural tectonic blocks of the Earth's crust // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. Vol. 20. DOI: 10.2205/2020ES000752.

Mark Nixon, Alberto Aguado. Feature Extraction and Image Processing. Academic Press, 2019, 650p.

Shapiro, L. G. & Stockman, G. C. Computer Vision. — Prentence Hall, 2001. – С. 137, 150.

Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing San Diego, California, 1999, 664p.



## **9 Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса**

Грант РФ: 19-77-10075

Номер регистрации: АААА-А19-119082190032-6

Руководитель: зав. лаб., к.г.-м.н. А. И. Рыбкина

### **9.1 Проведение аналитических исследований и результаты полевых исследований**

Конкретным научным направлением настоящего проекта РФ является разработка методологии проведения циклостратиграфических исследований. Участниками проекта в первый год были проведены полевые геологические работы на разрезе Коп-Такыл, аналитические исследования по оценке влияния астрономической цикличности на магнитные свойства пород, проведены необходимые лабораторные исследования, а также создан математический фундамент для обработки данных и проработаны пути визуализации современными методами ГИС. Циклостратиграфия и математическая геология имеют очень тесную и фундаментальную связь. Одна из основных целей математической геологии состоит в том, чтобы предоставить теорию геологических процессов и выявить существующие закономерности в ее развитии, а также повторяемость циклов. Влияние астрономических циклов на стратиграфическую запись во многом связано с климатом, который на примере данного исследования проявляется в литологической и палеомагнитной изменчивости отложений.

В первый год были проведены комплексные детальные полевые исследования тарханских отложений среднего миоцена Восточного Паратетиса, вскрытых в разрезе Коп-Такыл, расположенном на черноморском побережье Керченского полуострова, являющегося стратотипическим районом. В ходе полевых работ было составлено послойное описание разреза с отбором реперных проб, проведены замеры магнитной восприимчивости пород (852 определений) и взяты с интервалом штуфы (44 шт.) для петромагнитного и палеомагнитного изучения отложений. Данные определений магнитной восприимчивости были обработаны с использованием математических методов на базе дискретного математического анализа и предложена принципиально новая методика для поиска возможных периодов исходной функции. Были выявлены наиболее сильные и устойчивые периоды в данных измерений магнитной восприимчивости отложений верхнего сармата и низов мэотиса равны 3,0, 13,6 и 16,6. Были проведены необходимые лабораторные исследования: были измерены и исследованы стандартные магнитные параметры: естественная остаточная

намагниченность NRM, магнитная восприимчивость  $\chi$ , коэрцитивная  $B_c$  и остаточная коэрцитивная сила  $B_{cr}$ . Было выполнено три вида термомагнитного анализа: по температурной зависимости магнитного момента насыщения  $M_s(T)$ , магнитной восприимчивости  $\chi(T)$ , остаточного магнитного момента  $M_r(T)$ .

Основными носителями намагниченности являются моноклинный пирротин и магнетит в низкой концентрации. Общая мощность изученных отложений составляет ~ 53–56 м. Магнитную анизотропию изучали для обоснования достоверности полученных результатов. Палеомагнитные исследования показали, что рассматриваемый интервал кувинских пластов тархана в нижних частях состоит из отложений прямой намагниченности, а породы в его верхней части обратной намагниченности. Породы терского и аргунского пластов также характеризуются намагниченностью нормальной полярности. Для правильной интерпретации положения регионаруса Тархана в общей стратиграфической шкале требуются дополнительные междисциплинарные исследования, в том числе изучение этих отложений методами циклостратиграфии для определения скорости седиментации и возможной продолжительности накопления отложений.

Также была разработана структура базы данных измерений магнитной восприимчивости отложений Паратетиса, основанной на данных, полученных авторами проекта, которая будет использована в дальнейшем при получении новых измерений. В целях визуализации итоговых результатов, началась работа по созданию единого ГИС-пространства, которое могло бы объединить различные данные, что отвечает комплексному и междисциплинарному подходу к реализации целей и задач данного проекта.

## 9.2 Результаты полевых исследований и обработка полученных данных

В основе методов циклостратиграфии лежит оценка отражения астрономической цикличности в процессах осадконакопления, что подкрепляется детальным литологическим изучением и палеомагнитными исследованиями. Глобальные колебания инсоляции на Земле в комбинации с классическим литологическим подходом позволяет производить оценку скорости седиментации и производить датирование осадочных пород, что является особенно актуальным в отсутствие прочих возможностей достоверно определять абсолютный возраст отложений, либо в качестве эффективного сопровождающего метода. Также влияние астрономических циклов на процессы





осадконакопления носит глобальный характер, что делает этот метод особенно актуальным при широкомасштабных корреляциях.

При использовании этого метода точность определения абсолютного возраста пород может составлять от 20 до 400 тыс. лет, что было показано на примере работ, проведенных по данным развития палеобассейна Паратетиса. Методы циклостратиграфии получили свое широкое развитие за рубежом. Также существуют работы по оценке влияния астрономической цикличности на отложения отдельных регионов верхнего миоцена (мэотис и понт) на Таманском полуострове (Восточный Паратетис).

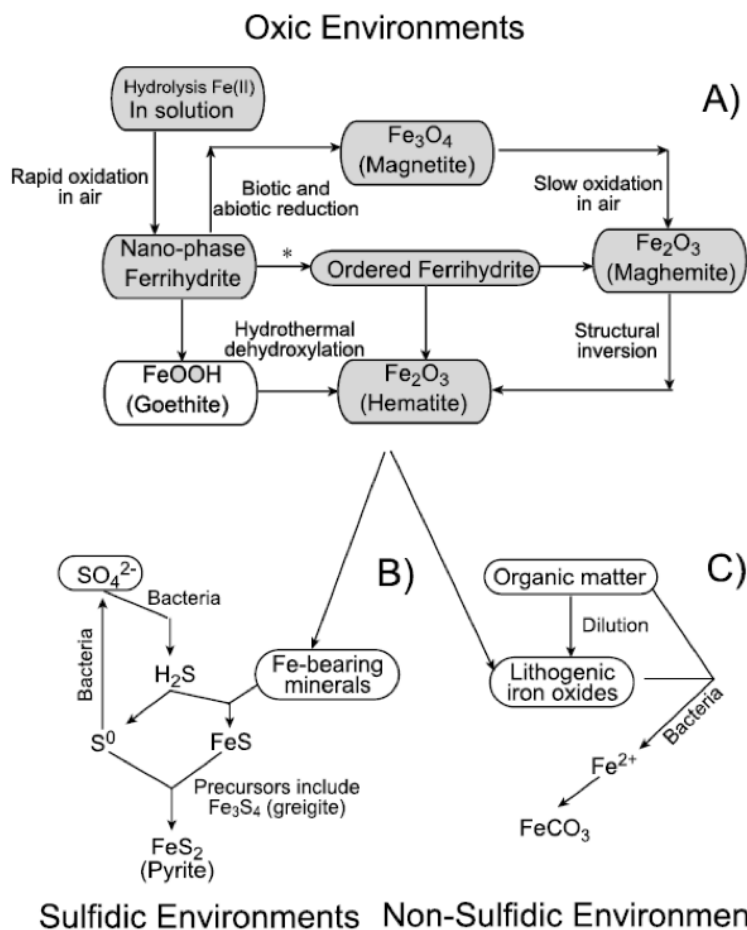
Существует три орбитальных цикла, которые обычно вызывают изменения климата в течение десятков тысяч лет, — это прецессия, наклон земной оси и эксцентриситет. Эти орбитальные циклы возникают в результате изменения гравитационной среды, в которой Земля вращается вокруг Солнца. Изменения орбитальной конфигурации приводят к изменениям количества солнечной радиации (инсоляции), получаемой Землей в верхней части ее атмосферы, что приводит к изменениям климата.

Изменения инсоляции влияют на положение ячеек атмосферной циркуляции и вызывают смещение климатических поясов в широтном направлении [Matthews and Perlmutter, 1994]. Климат затем влияет на многие параметры, которые прямо или косвенно контролируют выработку, перенос и накопление осадочного материала. Атмосферные изменения температуры и циркуляции приводят к изменениям температуры воды, океанической циркуляции и характера осадков. Активность ледников, рек и ветра, а также растительный покров контролируют выработку и перенос материала с суши в океан. Поступление пресной воды и питательных веществ через реки, испарение, глубокая циркуляция в океанах или озерах, а также газообмен между гидросферой и атмосферой влияют на химический состав воды. Все эти тесно связанные факторы в конечном итоге контролируют образование осадков, а также геохимические признаки обстановок осадконакопления. В зависимости от чувствительности осадочных и биологических систем, некоторые из этих параметров могут быть зарегистрированы и, таким образом, косвенно отражают параметры орбиты. Основным контролирующим фактором для осадочных систем является эвстатические колебания уровня моря. Во время ледниковых периодов изменения уровня моря с высокой амплитудой возникают благодаря растущему и убывающему полярным ледяным покровам и горным ледникам. Результирующие изменения уровня моря сильно асимметричны, потому что ледяные щиты тают быстрее,

чем растут. Эта асимметрия хорошо известна из кислородно-изотопной записи позднего плейстоцена [Hays *et al.*, 1976].

В магнетизме окружающей среды исследование магнитных свойств минералов и горных пород используются для изучения процессов образования, перемещения, седиментации и постседиментационных изменений магнитных минералов под воздействием окружающей среды. Железосодержащие, в частности магнитные минералы, оказываются весьма чувствительными к изменению окружающей среды, что делает петромагнитные измерения крайне полезными для выявления климатических изменений, записанных, к примеру, в лёссах, озерных и морских отложениях, а также для понимания условий осадконакопления (окислительные/восстановительные) и постседиментационных преобразований. Магнетизм окружающей среды непосредственно связан с глобальным циклом железа посредством химических, физических и биологических факторов. Круговорот железа в природе осуществляется на различных масштабах, включая глобальный (рис. 9.1) [Maher *et al.*, 2010], и когда трансформация железа происходит *in situ* (магнетита, маггемита, ферригидрита, гетита, лепидокрокита, сульфидов железа и других распространенных магнитных минералов) совместно или без воздействия бактерий в различных средах [Cornell and Schwetmann, 2003; Malki *et al.*, 2006].

Наиболее распространенными магнитными минералами осадочных пород являются магнетит, маггемит, гематит и гетит. Различные совокупности магнитных минералов в осадочных горных породах могут быть обусловлены разными источниками сноса терригенных отложений и вторичными процессами, происходящими в тех или иных условиях окружающей среды, которые приводят к образованию аутигенных магнитных минералов. А именно, после осадконакопления диагенетические процессы при определенных условиях могут привести к замещению детритных магнитных минералов аутигенными магнитными минералами путем растворения и перекристаллизации. Химические изменения могут происходить в течение всего времени существования породы, даже когда осадочные отложения литифицированы. Аутигенные минералы, которые обычно образуются в окислительной среде и включают гематит, магнетит, а гейгит и пирротин образуются в восстановительных условиях, при этом биологические процессы могут стимулировать процессы минерализации.

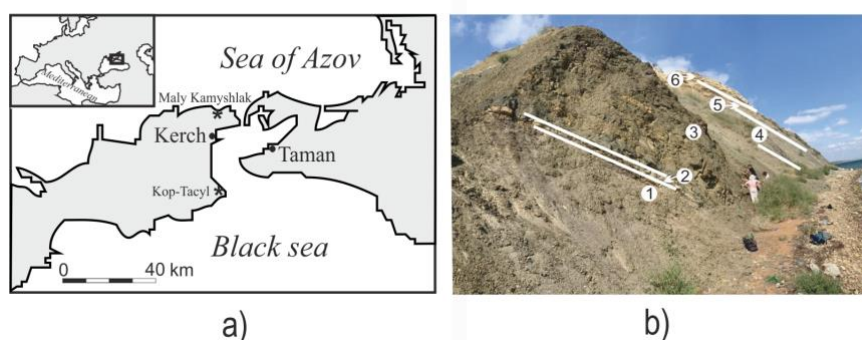


**Рисунок 9.1 – Трансформация оксидов железа и сульфидов железа в (а) – кислородных средах; (б) – сульфидных средах; (с) – несulfидных бескислородных средах**

Магнетизм окружающей среды в основном связан с циклом  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  на небольшой глубине или на поверхности Земли, включая выветривание и образование почв, эрозию и переотложение осадка, а также ранний диагенез. Преобразование  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$  несет за собой изменения и магнитных свойств горных пород, что обнаруживается с помощью петромагнитных методов. Таким образом, магнитные свойства горных пород позволяют при благоприятных обстоятельствах определять условия седиментации и постседиментационные изменения. Обстоятельства, препятствующие этому, – слабая намагниченность/магнитная восприимчивость горных пород, т. е. ниже предела чувствительности современных приборов; в то же время, это перерывы в осадконакоплении, недостаточная детальность отбора образцов и т. д. К магнитным свойствам горных пород или, иначе говоря, магнитным параметрам может быть отнесена концентрация магнитных минералов в породе, размер магнитных частиц и магнитная минералогия. Как уже было показано выше, магнитные минералы являются весьма чувствительным индикатором смены условий осадконакопления и процессов диагенеза. Таким образом, изучение магнитных свойств и определение магнитных минералов горных

пород и их вариации по разрезу позволяют делать выводы об изменении палеобстановок, палеоклимата, а также могут быть сопоставлены с астрономическими циклами [Kodama and Hinnov, 2014].

В первый год выполнения проекта были проведены комплексные детальные полевые исследования тарханских отложений среднего миоцена Восточного Паратетиса, вскрытых в разрезе Коп-Такыл расположенном на черноморском побережье Керченского полуострова, являющегося стратотипическим районом (рис. 9.2).

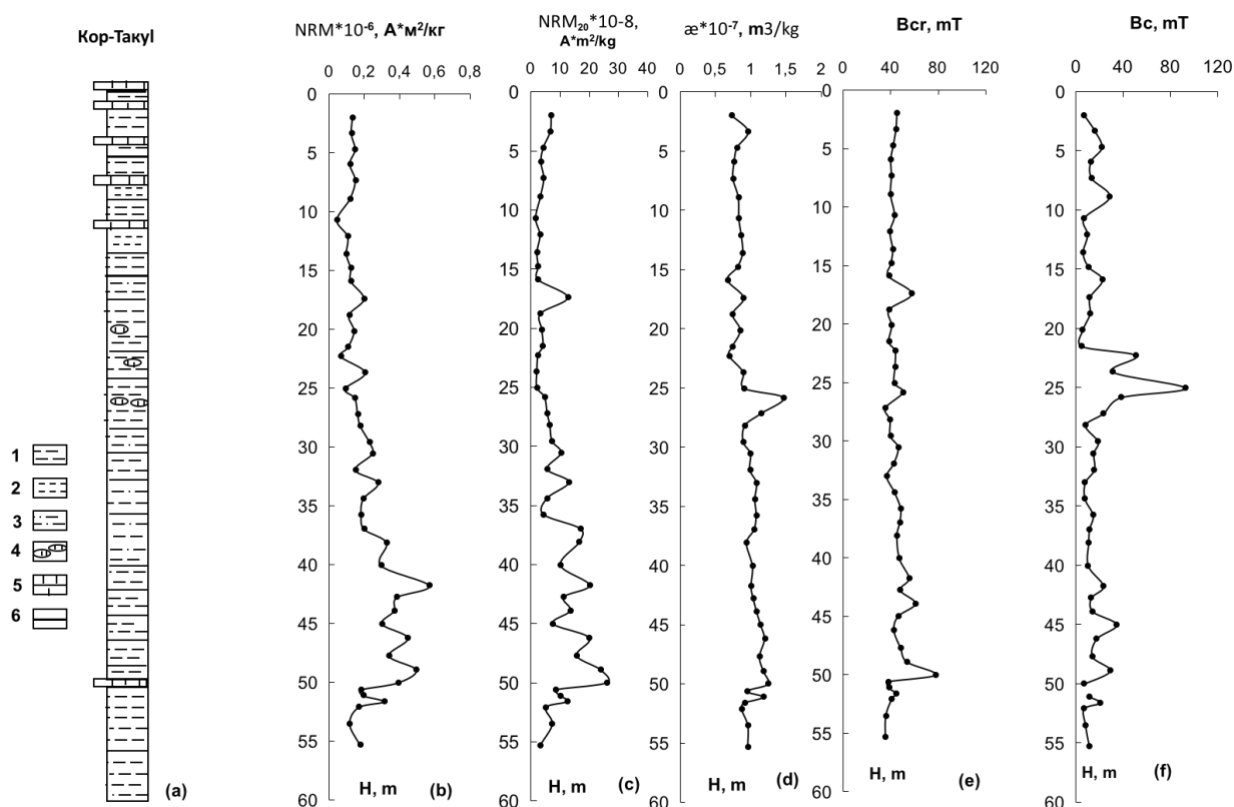


**Рисунок 9.2 – (а) Схематическая карта местополжения разреза. На вставке в квадрате указано местоположение области исследования на географической карте. (б) Общий вид Тарханских отложений в разрезе Коп-Такыл (Керченский полуостров)**

Осадки стратотипического разреза Керченского полуострова Коп-Такыл представляют собой глубоководные отложения среднего миоцена (рис. 9.3). Глубоководные осадки, в отличие от мелководных, в полной мере отражают геологическую летопись, что во многом определяет необходимость их изучения. В 2019–2020 г. перед участниками проекта стояла задача отобрать и обработать петромагнитными и палеомагнитными методами фактический материал отложений, вскрываемых в разрезе Коп-Такыл. Стоит отметить, что объём, стратиграфическое положение и датирование границ нижнего и среднего миоцена до сих пор остается остро дискуссионным.

В ходе полевых работ было составлено послойное описание разреза с отбором реперных проб, проведены замеры магнитной восприимчивости пород (852 определений) через 20 см вкrest простираня пород и взяты с интервалом 1,5 м штуфы (44 штук) для петромагнитного и палеомагнитного изучения отложений. Установлено, что общая мощность толщ рассматриваемого разреза, в котором выделяются все стратиграфические подразделения (кувинские, терские и аргунские слои) тархана, а также переходные тархан-чокракские породы, составляет 56 метров. По особенностям литологического строения отложений выделены интервалы монотонного строения глинистых толщ (Слой 1

и низы Слоя 3), опесчанивания (верхи Слоя 3) и с большим содержанием известковой составляющей (Слои 4,5 и 6), отражающих смену основных этапов осадконакопления. Наличие интервалов с признаками перерывов в седиментации не установлено, что является важным для проведения полноценных циклостратиграфических и палеомагнитных исследований, учитывающих полноту геологической летописи в разрезах. В лабораторных условиях макроскопические исследования отложений были подкреплены изучением пород в шлифах на микроскопическом уровне.



**Рисунок 9.3 – Литологическая колонка разреза Коп-Такыл (а). Обозначения: 1 – глина, 2 – известняковая глина, 3 – глина с тонкими песчаными слоями, 4 – карбонатные конкреции, 5 – карбонатные слои, 6 – границы слоев. Кривые вариаций магнитных характеристик от глубины разреза Н: естественная остаточная намагниченность NRM (b), естественная остаточная намагниченность NRM20 после размагничивания переменного поля 20 мТл (c), магнитная восприимчивость  $\chi$  (d), остаточная коэрцитивная сила Bcr (e), коэрцитивная сила Bc – (f)**

Для получения данных по циклостратиграфии в камеральных условиях имеющиеся определения магнитной восприимчивости пород были обработаны с помощью программы PAST [Schulz and Mudelsee, 2002], позволяющей проводить спектральный анализ первичных данных с построением Lomb-Scargle и REDFIT периодограмм, а также Wavelet распределений. В результате была получена основа для дальнейшего анализа замеров К с помощью программы AnalySeries, позволяющей использовать фильтр Гаусса.



Спектральный анализ замеров магнитной восприимчивости пород тархана позволил выявить три интервала частот с резко выраженными пиковыми значениями. В одном из них выделяется единичный частотный пик. Этот пик превышает уровень спектральных шумов (95% Confidence level), что указывает на высокую степень достоверности выявленных циклических колебаний. Рассматриваемый пик частоты отвечает циклу протяженностью около 2,77 м (на REDFIT периодограмме). На других интервалах выделяются также циклы длиной около 5,77 и 20 м, которые имеют меньшую степень достоверности. Установленный цикл длиной 2,77 м отвечает периодическим колебаниям прецессии длительностью 19 000, 21 000 и 24 000 лет. Предполагаемая длительность накопления рассматриваемых отложений составляет около с 385 000 до 490 000 лет.

За отчетный период в ходе камеральных работ были получены данные по петромагнитным и палеомагнитным характеристикам отложений тархана разреза Коп-Такыл. Для этого вида анализов были использованы ориентированные по магнитному меридиану штуфы (44 штук), отобранные по напластованию пород из свежерасчищенных вертикальных стенок. Число изученных образцов равнялось 125. Для проведения термомагнитного анализа были выпилены образцы с ребром 1 см по два образца с уровня.

Были измерены и исследованы стандартные магнитные параметры: естественная остаточная намагниченность NRM, магнитная восприимчивость  $\chi$ , коэрцитивная  $B_c$  и остаточная коэрцитивная сила  $B_{cr}$ . Было выполнено три вида термомагнитного анализа: по температурной зависимости магнитного момента насыщения  $M_s(T)$ , магнитной восприимчивости  $\chi(T)$ , остаточного магнитного момента  $M_r(T)$ .

Для изучения состава магнитных минералов – носителей естественной остаточной намагниченности была отобрана пилотная коллекция, состоящая из 10 образцов (по два дубля) объемом  $\sim 1\text{ см}^3$ , на которой был выполнен термомагнитный анализ: 1) на вибромагнитометре конструкции Виноградова Ю. К. по зависимости  $M_s(T)$  в магнитном поле 0,7 Тл; 2) на каппаметре Multi-Function Kappabridge (AGICO, Чехия) по  $\chi(T)$  на порошкообразных пробах массой  $\sim 1$  г; 3) по зависимости остаточного магнитного момента, созданного в поле 0,2 Тл от температуры.

В результате установлено, что основными магнитными минералами – носителями естественной остаточной намагниченности в данных породах, возможно, являются магнетит и моноклинный пирротин. Наличие магнетита в изучаемых породах позволило выполнить определение доменной структуры этого минерала. Из диаграммы Дея видно по



результатам изучения большей части исследуемых образцов, что доменная структура магнетита – псевдооднодоменная (PSD).

#### **Список использованных источников**

Cornell R. M., Schwertmann U. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. – New York: Wiley, 2003.

Hays J. D., Imbrie I., Shackleton N. J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages // Science. – 1976. – 194. – PP. 1121–1132.

Kodama K. P., Hinnov L. A. Rock Magnetic Cyclostratigraphy. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. – PP. 99–127. DOI:10.1002/9781118561294.

Malki M., González-Toril E., Sanz J. L., Gómez F., Rodríguez N., Amils R. Importance of the iron cycle in biohydrometallurgy // Hydrometallurgy. – 2006. – Vol. 83. PP. 223–228. DOI:10.1016/j.hydromet.2006.03.053.

Maher B. A., Prospero J., Mackie D., Gaiero D. M., Hesse P. P., Balkanski Y. Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum // Earth Sci. Rev. – 2010. – Vol. 99. – PP. 61–97. DOI:10.1016/j.earscirev. 2009.12.001.

Matthews M. D., Perlmutter M. A. Global cyclostratigraphy: an application to the Eocene Green River Basin // IAS Spec. Publ. – 1994. – Vol. 19. – PP. 459–481.

Schulz M., Mudelsee M. Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series // Computers and Geosciences. – 2002. – Vol. 28. P. 421–426.

## 10 Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности

Грант РФФИ: 20-35-70054

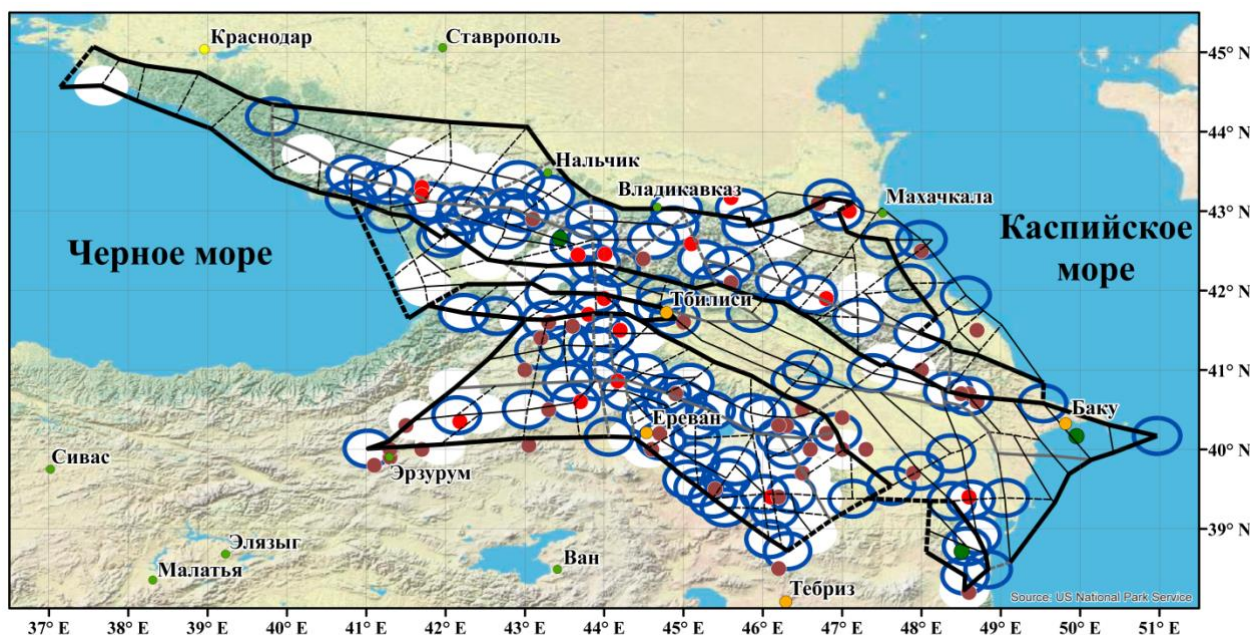
Номер регистрации: АААА-А20-120012090122-8

Руководитель: зав. лаб., в.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов

В 2020 г. исследования в рамках Проекта были направлены на дальнейшее развитие созданных в Геофизическом центре РАН методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

На примере регионов Алтай-Саяны-Прибайкалье и Кавказ построена совместная интерпретация мест возможного возникновения сильных (с  $M \geq 6,0$ ) землетрясений, распознанных [Гвишиани и др., 2020] по одному («чистому») и двум («чистому» и «смешанному») классам обучения [Гвишиани и др., 2021]. Интерпретация базируется на композиции конструкции нечеткого множества и результатов, полученных независимо алгоритмом «Барьер-3» [Дзедобов и др., 2019; Dzeboev et al., 2019] и классической дихотомией «Кора-3» [Гвишиани и др., 1988; Гвишиани и др., 2020].

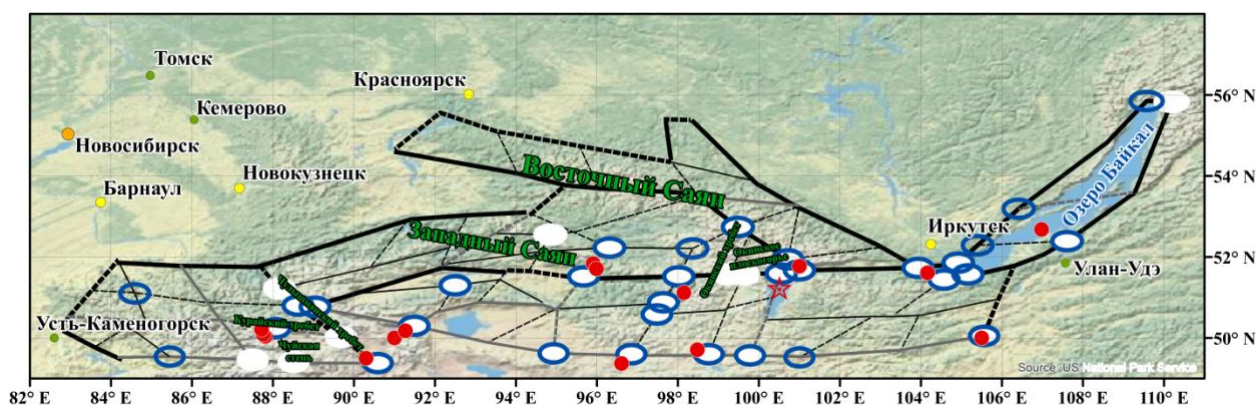
Отметим, что на Кавказе [Соловьёв и др., 2016; Dzeboev et al., 2019] и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье [Горшков и др., 2018; Дзедобов и др., 2019] результаты распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» хорошо согласуются между собой (рис. 10.1). Так на Кавказе пересечения линеаментов, расположенные на продольных линеаментах II-го ранга и независимо классифицированные обоими алгоритмами как высокосейсмичные в Центральном и Юго-Восточном сегментах Большого Кавказа образуют протяженные зоны вдоль оси Главного хребта. Хорошее совпадение результатов наблюдается в восточном секторе Малого Кавказа и на Армянском вулканическом нагорье. Совокупность пересечений линеаментов, расположенных на поперечных линеаментах II-го ранга и отнесенных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» к высокосейсмичному классу, образует в пределах Транскавказского поперечного поднятия протяженную субмеридиональную зону, соединяющую места возможного возникновения сильных землетрясений на Большом и Малом Кавказе. Достаточно хорошая согласованность высокосейсмичных зон наблюдается в районе Талышских гор. Отметим, что значительная часть известных в регионе сильных землетрясений произошла в окрестности объектов, образующих описанные зоны.



**Рисунок 10.1 – Сравнение результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  на Кавказе, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» (пустые эллипсы с синими границами – «Барьер-3», белые эллипсы – «Кора-3», белые эллипсы с синими границами – оба алгоритма), эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$ : коричневые круги – до 1900 г., красные круги – за период 1900–1992 гг., темно-зеленые круги – начиная с 2013 г.**

В регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье некоторые различия в классификации пересечений линеаментов алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» наблюдаются в Чуйской степи и предгорьях Курайского и Чулышманского хребтов на Восточном Алтае (рис. 10.2). Различия также наблюдаются на Окинском плоскогорье, ограниченном Окинским хребтом и южной частью Восточных Саян, и на северном и западном побережьях озера Байкал. Если в качестве мест возможного возникновения сильных землетрясений рассматривать объединение подмножеств пересечений линеаментов, классифицированных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как опасные, то потенциально высокосейсмичные зоны группируются вдоль границ горных систем. Так высокосейсмичным является продольный линеамент II-го ранга, отделяющий изучаемый регион от Монгольского Алтая. Аналогично высокосейсмичным является поперечный линеамент I-го ранга, отделяющий Восточный Алтай от Западных Саян. Сейсмоопасным признан продольный линеамент I-го ранга, обрамляющий западное побережье озера Байкал (рис. 10.2).





**Рисунок 10.2 – Схема сравнения результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» (обозначения как на рисунке 10.1). Красные круги – эпицентры коровых землетрясений с  $M \geq 6,0$ . Красная звезда – эпицентр корового землетрясения, произошедшего 11 января 2021 г. с  $M = 6,7$**

Предложенный в Проекте новый подход к классификации пересечений линеаментов базируется на определении нечеткого множества. Это дает возможность интегральной интерпретации единого результата (композиции) распознаваний высокосейсмичных зон, выполненных независимо алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3».

Конструкция нечеткого множества была применена для построения интегрального результата, равноценный вклад в который вносят алгоритмы «Барьер-3» и «Кора-3». Искомое нечеткое множество пересечения линеаментов определено как множество пар пересечений и их функций принадлежности к пересечениям, в окрестности которых возможно возникновение сильных землетрясений. Функция принадлежности определена следующим образом: 1 – если пересечение распознано обоими алгоритмами; 0,5 – если пересечение распознано только одним алгоритмом; 0 – если пересечение не распознано ни одним из алгоритмов. Таким образом, интегральный результат распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений может быть интерпретирован как непустое нормальное нечеткое множество. Высокосейсмичными пересечениями в интегральном результате будем считать пересечения, для которых функция принадлежности имеет значения больше 0. Иными словами, необходимо найти пересечения, принадлежащие носителю построенного нечеткого множества.

Оценена согласованность полученных нечетких интегральных результатов с эпицентрами известных сильных землетрясений. В регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье в силу полученных результатов распознавания (рис. 10.2) все используемые для формирования обучающей выборки высокосейсмичного класса эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$  располагаются в окрестностях объектов, отнесенных к высокосейсмичному





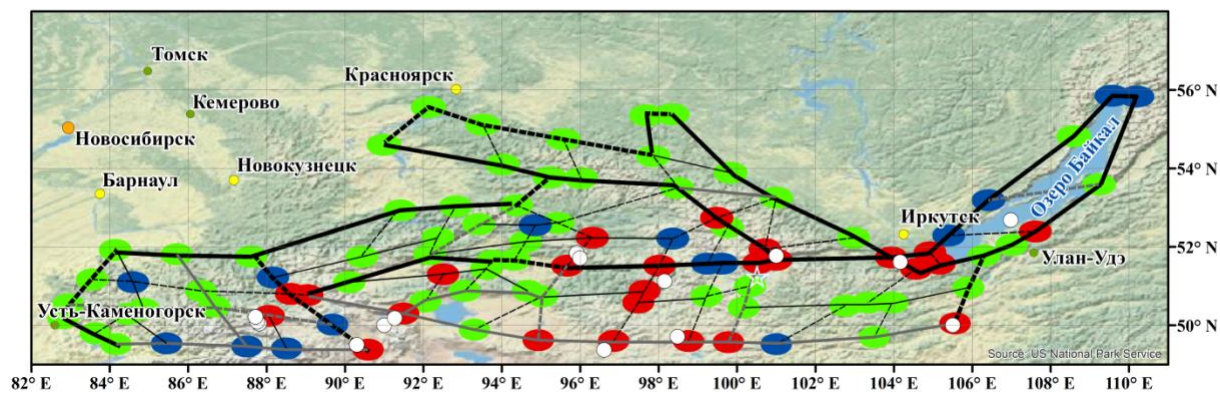
классу обоими алгоритмами. Вне зависимости от того, считать эпицентр землетрясения 2021 года ошибкой «пропуск цели» или нет, количество «пропусков цели» распознавания, полученного с помощью нечеткой функции (рис. 10.3а), такое же, как и у каждого из алгоритмов в отдельности (рис. 10.2). В данном случае лишь увеличивается количество искомых высокосейсмичных объектов, где сильные землетрясения до настоящего времени не были зарегистрированы.

Иная ситуация имеет место на Кавказе. Подход с помощью нечеткой функции априорно улучшает здесь качество результата. На рис. 10.1 из 62 эпицентров рассматриваемых землетрясений с  $M \geq 6,0$  вне высокосейсмичных зон, распознанных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», находятся 8 и 9 эпицентров соответственно. При этом всего 4 эпицентра находятся за пределами зон, определенных как высокосейсмичные в интегральном результате (красные и синие эллипсы на рис. 10.3б).

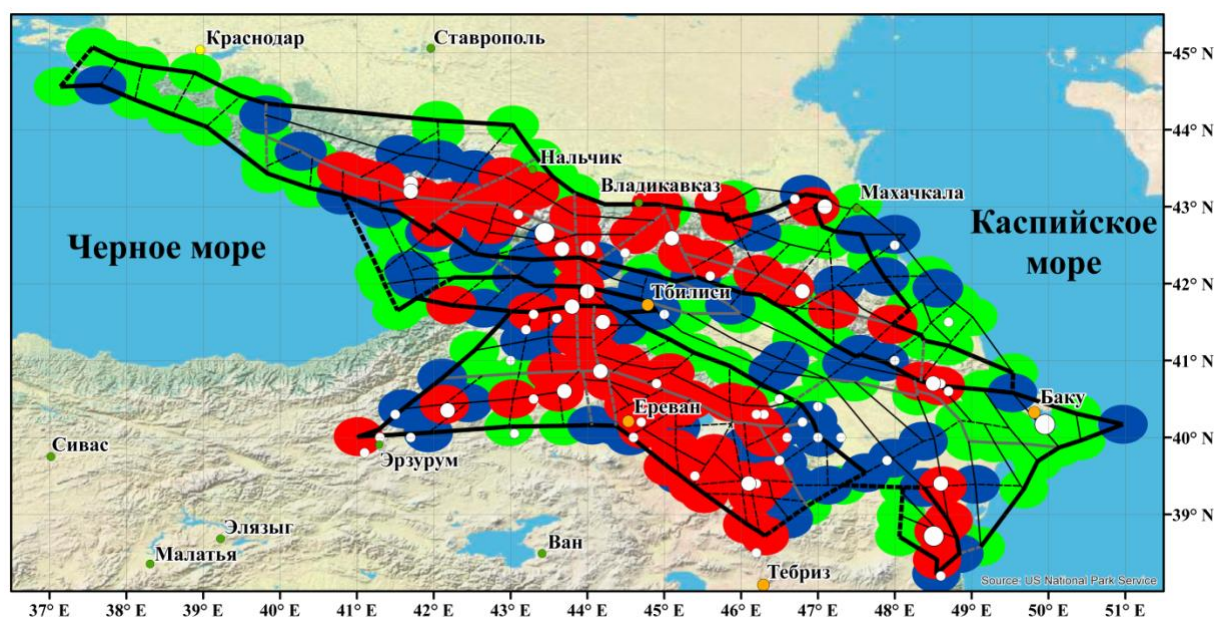
Заметим, что в интегральном результате (рис. 10.3) высокосейсмичными объявлены 41,2% объектов в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье и 59,9% на Кавказе. При этом в изучаемой проблеме, как правило, результат считается нетривиальным, если не более 60% объектов классифицированы как высокосейсмичные [Гвишиани и др., 1988]. Новое распознавание (рис. 10.3) для обоих регионов удовлетворяет этому условию. В тоже время это позволяет получить новый нетривиальный результат для обоих регионов и вдвое уменьшить количество «пропусков цели» на Кавказе.

Улучшение результата связано с тем, что использование нечеткой математики позволяет интегрировать воедино различные критерии двух независимых распознаваний, выполненных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Это позволяет в какой-то мере компенсировать неполноту, а иногда и дефектность исходных данных.

Предложенная в Проекте математическая конструкция, представляющая собой композицию нечеткого множества и классификаций высокосейсмичных зон, независимо распознанных с обучением по одному и двум классам, является шагом на пути к созданию инструмента системного анализа. Этот инструмент может оказаться весьма полезным для дальнейшего изучения проблемы определения мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.



а)



б)

**Рисунок 10.3 – Представление интегрального результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» как нечеткого множества окрестностей пересечений линеаментов (красными, синими и зелеными эллипсами показаны окрестности пересечений линеаментов с функцией принадлежности 1, 0,5 и 0 соответственно): а) регион Алтай-Саяны-Прибайкалье (белые круги – эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$  (1900–2012 гг.), белая звезда – эпицентр землетрясения 11.01.2021); б) Кавказ (белые круги – эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$ : маленькие – до 1900 г., средние – 1900–1992 гг., большие – после 1992 г.)**

В начале 2010-х в Геофизическом центре РАН на базе Дискретного Математического Анализа (ДМА) [Гвишиани и др., 2008; Гвишиани и др., 2010; и др.] был создан системно-аналитический метод FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2016; и др.]. FCAZ позволяет эффективно проводить распознавание мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений на базе кластеризационного исследования (топологической фильтрации) эпицентров слабых землетрясений. Таким образом, в качестве объектов FCAZ-распознавания используются эпицентры землетрясений, начиная с некоторого магнитудного порога.



Ранее во FCAZ-исследованиях использовались эпицентры всех землетрясений из используемых инструментальных каталогов. При этом оставался вопрос, в какой степени на получаемые результаты влияют имеющиеся в каталогах форшоковые и афтершоковые последовательности. Исследования в рамках Проекта, в том числе, были посвящены изучению данного вопроса. Для целей установления вклада форшоковых и афтершоковых последовательностей в формирование конечного результата определения высокосейсмичных зон методом FCAZ впервые в качестве объектов распознавания использовались эпицентры из декластеризованных каталогов землетрясений. Это исследование проведено на примере Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и региона Калифорнии [Dzeboev *et al.*, 2020].

На Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка, не смотря на почти вдвое уменьшение количества объектов распознавания (эпицентров слабых землетрясений), вызванного декластеризацией используемого инструментального каталога, значения FCAZ-параметров и процента классифицированных как высокосейсмичные объектов, вычисленных при распознавании на базе декластеризованного каталога, совсем незначительно отличается от значений, полученных при распознавании по полному каталогу землетрясений. Это может говорить о достаточно близких пространственных распределениях эпицентров землетрясений в используемых каталогах (полный каталог и декластеризованный каталог).

В отличие от Камчатки, в Калифорнии вычисленные значения FCAZ-параметров для случая декластеризованного каталога отличаются от значений этих же параметров, вычисленных для случая полного каталога. Объяснением этому может быть то, что после декластеризации каталога количество объектов распознавания сократилось на 68%, что привело к изменению количественно-пространственного распределения множества объектов распознавания. Вместе с тем результаты показывают, что это не привело к значительному изменению FCAZ-зон.

Сравнение FCAZ-зон возможного возникновения землетрясений на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка, распознанных с использованием эпицентров из полного и декластеризованного каталогов землетрясений, показало их достаточно хорошее совпадение. Площадь зон, распознанных с использованием эпицентров из декластеризованного каталога, на 12% больше площади зон, распознанных на базе полного каталога. Отношение площади пересечения зон к площади их объединения – 0,77.

В Калифорнии FCAZ-зоны, распознанные с использованием полного и декластеризованного каталогов землетрясений, имеют одинаковые площади. Отношение суммарной площади зон, распознанных с использованием эпицентров из декластеризованного каталога, к суммарной площади зон, распознанных на базе полного

каталога, равно 0,9937. При этом отношение площади пересечения FCAZ-зон, распознанных по разным каталогам, к площади их объединения – 0,69.

Полученные результаты убедительно показывают, что исключение из каталога землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты применения метода FCAZ. Этот вывод имеет теоретическое значение для дальнейшего развития метода FCAZ и дает дополнительные подтверждения достоверности полученных ранее с его помощью результатов распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

В рамках Проекта построена системно-математическая модель FCAZ-распознавания зон повышенной сейсмической опасности как сложной динамической системы. Из интерпретации распознавания как проблемы системного анализа сформулирован критерий выбора неравномерных отрезков времени для проведения повторных FCAZ-распознаваний. Построенная пространственно-временная модель FCAZ-распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений позволяет создать временной план выполнения дальнейших итераций по распознаванию зон повышенной сейсмической опасности.

В рамках реализации Проекта получила свое дальнейшее развитие созданная в Геофизическом центре РАН интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности.

Сегодня исходная информация, составляющая основу ГИС, включает следующий набор цифровых тематических слоев и геоданных:

- ☐ географическая основа регионов;
- ☐ города и населенные пункты;
- ☐ каталоги землетрясений;
- ☐ схемы морфоструктурного районирования;
- ☐ вспомогательные слои геолого-геофизических и геоморфологических данных, используемых в методе ЕРА для расчета характеристик объектов распознавания;
- ☐ места возможного возникновения землетрясений, распознанные классическим методом ЕРА;
- ☐ места возможного возникновения землетрясений, распознанные алгоритмом «Барьер-3» в качестве блока распознавания метода ЕРА;
- ☐ места возможного возникновения землетрясений, распознанные системно-аналитическим методом FCAZ;
- ☐ значения коэффициентов Общего закона подобия землетрясений в узлах регулярной сетки и в точках пересечения осей морфоструктурных линеаментов;
- ☐ результаты моделирования динамики блоковой структуры;
- ☐ и др.





ГИС-система позволяет осуществлять онлайн-просмотр данных, полученных различными независимыми методами оценки сейсмической опасности территории, выполнение запросов к ГИС базе данных, расчет различных геолого-геофизических и геоморфологических характеристик в окрестности заданных точечных объектов и др. В настоящее время ГИС-система развивается путем расширения ГИС базы данных и функционала запросов к ней. Также создаются новые виджеты для улучшения и упрощения работы с ГИС-системой, оптимизируются ГИС-инструменты для ускорения расчетов и визуализации результатов.

### Список использованных источников

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. – 2008. – № 5. – С. 26–31.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьёв А. А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 109–125.

Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Ранцман Е. Я., Систернас А., Соловьёв А. А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. – М.: Наука, 1988. – 176 с.

Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Агаян С. М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. – 2016. – № 4. – С. 3–23. – DOI: 10.7868/S0002333716040013.

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

Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Агаян С. М., Белов И. О., Николова Ю. И. Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линеаментов на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье // Вулканология и Сейсмология. – 2021. – № 2. – С. 3–10. – DOI: 10.31857/S0203030621020036.

Горшков А. И., Соловьёв 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.

Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О., Татаринов В. Н., Агаян С. М., Барыкина Ю. В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье.  $M \geq 6,0$  // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 33–47. – DOI: 10.31857/S0002-33372019433-47.

Соловьёв Ал. А., Горшков А. И., Соловьёв 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.





Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V., Karapetyan J. K., Sergeeva N. A. Strong earthquake-prone areas recognition based on the algorithm with a single pure training class. II. Caucasus,  $M \geq 6,0$ . Variable EPA method // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). – 2019. – Vol. 19. – ES6005. – DOI: 10.2205/2019ES000691.

Dzeboev B. A., Karapetyan J. K., Aronov G. A., Dzeranov B. V., Kudin D. V., Karapetyan R. K., Vavilin E. V. FCAZ-recognition based on declustered earthquake catalogs // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). – 2020. – Vol. 20. – ES6010. – DOI: 10.2205/2020ES000754.



## **11 Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС**

Грант РФФИ: 19-55-80021 БРИКС\_т

Номер регистрации: АААА-А20-120061690061-2

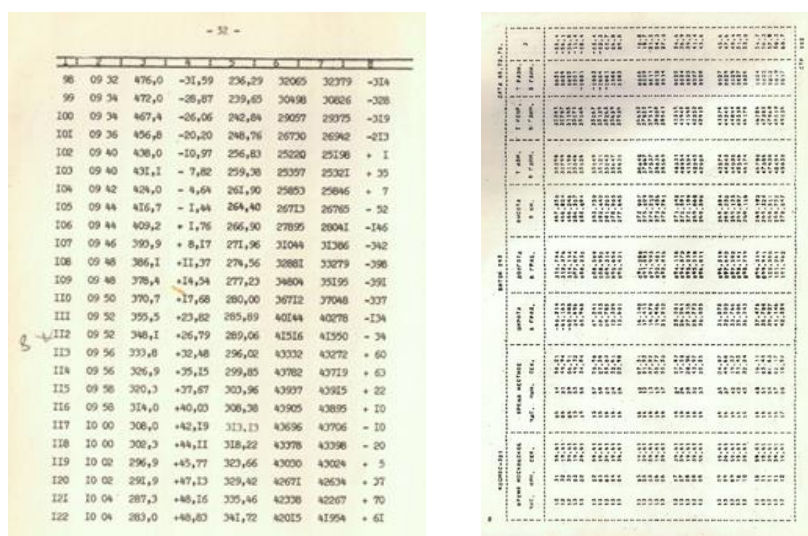
Руководитель: академик РАН В. Г. Бондур

Ответственный исполнитель: директор чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв

### **11.1 Оцифровка и преобразование в числовые массивы исторических спутниковых измерений геомагнитного поля и их интеграция в Мировую систему данных**

Первая спутниковая миссия СССР, направленная на получение прямых данных о пространственном распределении МПЗ состояла из двух космических аппаратов типа ДС-МГ (Днепропетровский спутник-МаГнитный), которые были обозначены как «Космос-26» и «Космос-49». Они были запущены 18.03.1964 и 24.10.1964 соответственно с космодрома Капустин Яр (Астраханская обл.). Конструкция и полезная нагрузка обоих космических аппаратов были идентичными и включали набор из двух абсолютных протонных прецессионных магнитометров, разработанных Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР (ИЗМИРАН) и изготовленных Специальным конструкторским бюро «Геофизика» Министерства геодезии СССР. Инструментальная точность магнитометров оценивалась на уровне 2–3 нТл. Характеристика суммарной погрешности, с которой «Космос-49» исследовал магнитное поле, была оценена на уровне 25–30 нТл. Приблизительно 62% из измеренных значений были зарегистрированы и доступны в каталоге, опубликованном ИЗМИРАН [Долгинов и др., 1967]. Последующая миссия, направленная на глобальную геомагнитную съемку, также состояла из двух космических аппаратов нового типа ДС-У2-МГ, обозначенных как «Космос-321» и «Космос-356», которые были запущены 20 января 1970 года и 10 августа 1970 г. с космодрома Плесецк (Архангельская обл.). Полезная нагрузка миссии включала в себя квантовый магнитометр с оптической накачкой в парах цезия. Инструментальная точность магнитометра была оценена на уровне 1,7 нТл. Цели миссии «Космос-49» были следующие: глобальное исследование МПЗ и составление карты его пространственного распределения; уточнение коэффициентов разложения магнитного потенциала; исследование векового хода МПЗ на высоте полета космического аппарата в магнитоактивные периоды. «Космос-49» работал 11 дней с 24 октября по 3 ноября 1964 г. Он совершил 162 оборота вокруг Земли и сделал 17 300 измерений, покрыв практически однородно 75% поверхности Земли. Наклон орбиты спутника 49°,

период обращения – 91,83 мин, апогей 484 км, а перигей 265 км. Собранные данные были использованы для получения международной аналитической модели МПЗ, получившей широкое мировое научное признание. Каталог данных представлен в виде таблицы с восемью столбцами со следующей информацией: (1) номер измерения; (2) московское время (часы и минуты, округленные до 2 мин); (3) высота в км; (4) широта (север со знаком «+») в градусах; (5) долгота (положительная от Гринвича на Восток) в градусах; (6) измеренные абсолютные значения магнитного поля в нТл; (7) значение магнитного поля, рассчитанное в соответствии с глобальной моделью [Adam et al. 1964] в нТл; (8) разница между измеренными и рассчитанными значениями в нТл (рис 11.1).



№	Время	Высота	Широта	Долгота	Измеренное поле	Рассчитанное поле	Разница
98	09 32	476,0	-31,59	236,29	32065	32379	-314
99	09 34	472,0	-26,87	239,65	30498	30826	-328
100	09 34	467,4	-26,06	242,04	29097	29375	-319
101	09 36	456,8	-20,20	248,76	26730	26942	-213
102	09 40	438,0	-10,97	256,83	25220	25198	+ 2
103	09 40	431,1	- 7,82	259,38	25397	25321	+ 76
104	09 42	424,0	- 4,64	261,90	25853	25846	+ 7
105	09 44	416,7	- 1,44	264,40	26713	26780	- 67
106	09 44	409,2	+ 1,76	266,90	27895	28041	-146
107	09 46	399,9	+ 8,17	271,96	31044	31386	-342
108	09 48	386,1	+11,37	274,56	30881	33279	-398
109	09 48	378,4	+14,54	277,23	34804	35199	-395
110	09 50	370,7	+17,68	280,00	36712	37048	-337
111	09 52	355,5	+23,82	285,89	40144	40278	-134
112	09 52	346,1	+26,79	289,06	41516	41590	- 74
113	09 56	333,8	+32,48	296,02	43332	43272	+ 60
114	09 56	326,9	+35,25	299,85	43782	43719	+ 63
115	09 58	320,3	+37,67	303,96	43997	43925	+ 72
116	09 58	314,0	+40,03	308,38	43905	43895	+ 10
117	10 00	308,0	+42,19	313,13	43696	43706	- 10
118	10 00	302,3	+44,11	318,22	43778	43798	- 20
119	10 02	296,9	+45,77	323,66	43000	43024	- 24
120	10 02	291,9	+47,13	329,42	42671	42634	+ 37
121	10 04	287,3	+48,16	335,46	42338	42267	+ 71
122	10 04	283,0	+48,83	341,72	42025	41994	+ 31

**Рисунок 11.1 – Образцы страниц каталога измерений «Космос-49» (слева) и «Космос-321» (справа).**

Основные цели миссии «Космос-321» были такими же, как у «Космос-49», но дополнены некоторыми другими задачами, например, сериями атмосферных экспериментов. Экспериментальная программа миссии была разработана ИЗМИРАН и Институтом космических исследований АН СССР. «Космос-321» работал с 20 января по 13 марта 1970 года и выполнил 823 оборота вокруг Земли, сделав более 600 000 измерений (в каталог вошли около 5000 значений), покрывающих 94% поверхности планеты. Наклон орбиты составлял 71°, период обращения – 92 мин с апогеем 507 км и перигеем 280 км. Измерения проводились с 2-х секундным интервалом. Первичное изучение данных показало, что они содержат сильные помехи (до 20 нТл), предположительно, от термоток в устройстве фиксации датчика. По этой причине каталог содержит данные только для ограниченного числа орбит, в общей сложности 5000 измерений. Как необработанные, так и исправленные данные представлены в каталоге [Долгинов и др., 1976]. Стоит отметить, что в каталоге используется интервал 20 с, а не 2 с как во время



реальных измерений. Пример страницы каталога можно увидеть на рис. 11.1. Он содержит девять столбцов со следующими данными: (1) Московское время (часы, минуты и секунды); (2) местное время; (3) широта (север со знаком «+») в градусах; (4) долгота (положительная, от Гринвича на Восток) в градусах; (5) высота в км; (6) измеренное абсолютное значение магнитного поля, нТл; (7) исправленное абсолютное значение магнитного поля, нТл; (8) разница между исправленным значением и значением, рассчитанным по глобальной модели [Cain and Sweeney, 1970], в нТл; (9) рассчитанное магнитное наклонение в градусах.

Таблицы данных миссий «Космос-49» и «Космос-321» занимали 648 страниц (три тома) [Долгинов и др., 1967] и 173 страницы [Долгинов и др., 1976], соответственно. Все данные были оцифрованы. Для предотвращения ошибок и опечаток при оцифровке все массивы данных были автоматически проверены. При помощи разработанного ПО для каждого изменения орбиты космического аппарата сопоставлялись временные интервалы, что позволяло строить графики для орбитального движения и для измеренных и рассчитанных геомагнитных данных. Были проверены их согласованность, однообразие, плавность и т. д. В случае расхождений в результатах расчета программного обеспечения проводилась ручная проверка с использованием печатных оригиналов. Эти операции минимизировали все возможные ошибки персонала при оцифровке. Оцифрованные каталоги доступны в текстовом формате ASCII.

Успех указанных спутниковых миссий позволил получить уникальные данные о пространственном распределении общей интенсивности МПЗ почти по всей поверхности планеты. Модель IGRF (для эпохи 1965,0) была основана на этих данных. Сравнение данных «Космос-49» и «Космос-321» позволило определить вековой ход МПЗ с высокой точностью за период 1965–1970 гг. Еще одной важной темой было изучение временных изменений МПЗ на высоте полета космического аппарата в магнитоактивные периоды («Космос-321» столкнулся с сильной магнитной бурей 8–10 марта 1970 г.). В результате были получены важные данные о механизмах магнитных бурь в полярных районах. Однако данные, зарегистрированные за этот период, не были включены в общедоступный каталог. Только некоторые «следы» этих данных можно найти в статье [Dolginov et al., 1972]. «Космос-321» впервые измерил вклад экваториального электроджета [Vanian et al., 1975]. Уникальность представленных данных подчеркивается тем фактом, что более старые глобальные спутниковые наблюдения МПЗ практически отсутствуют в свободном доступе.

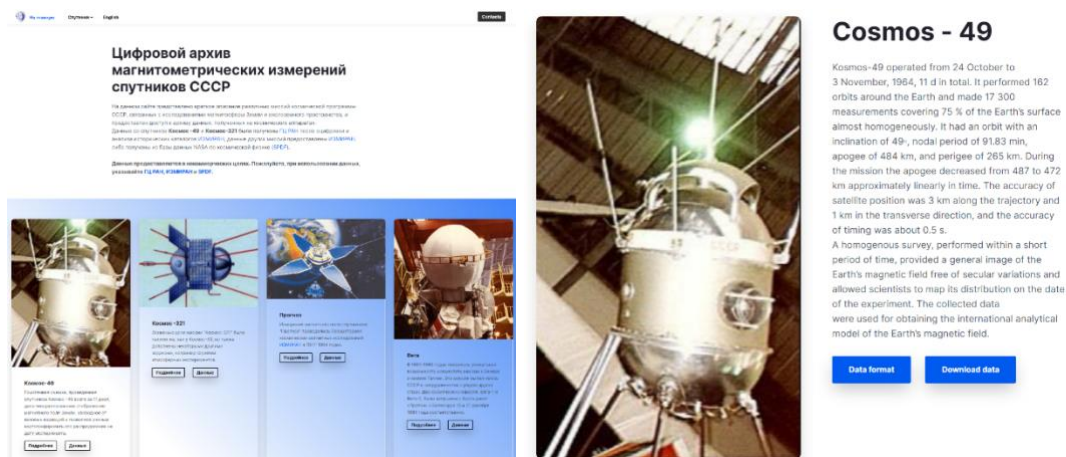
Целью создания цифрового архива являлось предоставление широкого, удобного и свободного доступа к данным, полученным ГЦ РАН в ходе оцифровки архивных материалов советских космических программ, а также дублирование архивных данных других советских спутниковых миссий 1964–1984 гг., в ходе которых проводились измерения МПЗ и межпланетного магнитного поля. Помимо данных «Космос–49» и «Космос–321» этот уникальный архив содержит данные миссий «Космос–1809», «Прогноз» и «Вега», полученные из ИЗМИРАН и других открытых источников (табл. 11.1).

Таблица 11.1. Временной диапазон доступных спутниковых данных

Миссия	Временной диапазон доступных данных
Космос-49	1964.10.24–1964.11.03
Космос-321	1970.02.08–1970.03.13
Космос-1809	1986.12.18–1993.05.21
Прогноз-6	1977.09.26–1978.01.22
Прогноз-7	1978.11.11–1979.05.30
Прогноз-9	1983.07.02–1984.02.10
Вега-1	1984.12.23–1986.05.31
Вега-2	1985.01.01–1986.03.13

Для удобства пользователей были созданы русская и английская версии сайта цифрового архива по адресу <http://usd.wdcb.ru> (рис. 11.2). Этот сайт обеспечивает доступ к данным всех миссий, которые хранятся на FTP-сервере в ГЦ РАН в виде текстовых ASCII файлов. Такой способ представления данных был выбран из-за его универсальности, поскольку исследователи пользуются разнообразными версиями программного обеспечения для обработки информации. Для каждой миссии сделана отдельная страница, содержащая краткое описание целей и задач миссии, характеристики орбиты спутникового аппарата и характер полученных на нем данных. По каждому массиву данных доступно подробное описание формата.





**Рисунок 11.2 – Скриншоты главной страницы сайта цифрового архива (слева) и англоязычной страницы, созданной для миссии «Космос–49» (справа)**

Интеграция созданного цифрового архива в систему Мирового центра данных по солнечно-земной физике (МЦД по СЗФ) позволила впервые пополнить ее уникальными спутниковыми данными по МПЗ и межпланетному магнитному полю, полученными путем оцифровки силами ГЦ РАН архивных материалов со спутников «Космос–49» и «Космос–321». Была проведена работа по приведению цифрового архива в соответствие требованиям Мировой системы данных для обеспечения более широкого доступа к уникальным данным.

## **11.2 Анализ возможности использования архива геомагнитных К-индексов с целью валидации исходных спутниковых данных**

В периоды повышенной магнитной активности, определяемые по значениям К- и К<sub>p</sub>-индексов, сигнал главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) в спутниковых данных в большей степени искажен и зашумлен. Поэтому для более точного выделения сигнала нужны данные за спокойные периоды. Для расчета К<sub>p</sub> используются К индексы 13 обсерваторий по всему миру, однако их распределение крайне неравномерно. Поэтому оценка уровня магнитной возмущенности только по К<sub>p</sub> и вычисленным из него спокойным (q) и возмущенным (d) дням может быть неудовлетворительной. Наличие же рассчитанных К-индексов по большому количеству дополнительных станций и их учет при расчете планетарного индекса позволит более точно отбирать периоды пониженной магнитной активности. Для выполнения этой задачи нами был вычислен расширенный планетарный К-индекс (К<sub>ре</sub>) с использованием дополнительных данных по К-индексам 17 обсерваторий СССР (табл. 11.2) из архива МЦД по СЗФ (г. Москва), выполнявших непрерывные наблюдения параллельно с временем полета «Космос–49» и «Космос–321» в 1964 и 1970 гг. соответственно. Всего архив МЦД по СЗФ содержит результаты

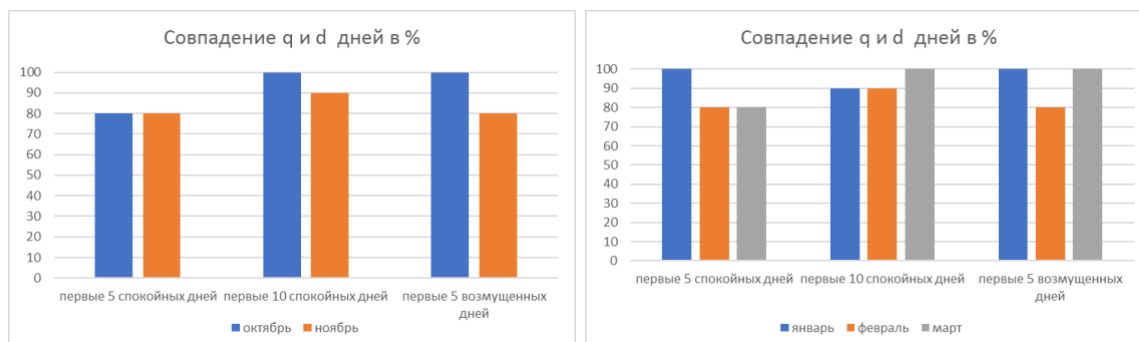
определения К индекса на 41 геомагнитной обсерватории бывшего СССР за период с июля 1957 г. по начало 1990-х гг.

Таблица 11.2. Список использованных станций из архива МЦД по СЗФ.

Код и название станции	Координаты	
	Широта	Долгота
DIK (Диксон)	73,543	80,562
HIS (Остров Хейса)	80,620	58,050
IRT (Иркутск)	52,167	104,450
KIV (Киев)	50,720	30,300
KZN (Казань)	55,830	48,850
LVV (Львов)	49,900	23,750
MIR (Мирный)	– 66,550	93,020
ММК (Лопарская)	68,250	33,080
MOS (Москва)	55,467	37,312
ODE (Одесса)	46,780	30,880
SVD (Свердловск)	56,730	61,070
TFS (Тбилиси)	42,080	44,700
TKT (Ташкент)	41,333	69,617
VLA (Владивосток)	43,697	132,160
VOS (Восток)	– 78,450	106,867
YAK (Якутск)	62,020	129,720
YSS (Южно-Сахалинск)	46,950	142,717

С использованием Кре по стандартной методике были определены 10 спокойных и 5 возмущенных дней для каждого месяца, совпадавшего с периодом работы спутниковых аппаратов, и было произведено сравнение полученных дней с определенными по стандартному Кр-индексу. На период работы спутника «Космос–49» (с 24 октября по 3 ноября 1964 г.) выпало 4 спокойных (25, 28, 30, 31 октября) и 2 возмущенных (26 октября, 1 ноября) дня (рис. 11.3). Кроме того, день 3 ноября попал в список q-дней по Кре индексу, но не попал в 10 самых спокойных дней для ноября по Кр-индексу. На период работы спутника «Космос–321» (с 20 января по 13 марта 1970 г.) выпало 14 спокойных (22, 23, 25, 26 января, 6–9, 11, 12, 20–22 февраля и 11 марта) и 9 возмущенных (30 января, 2, 4, 24, 28 февраля, 6–9 марта) дней (рис. 11.3). Стоит отметить, что в список первых 5 спокойных дней по Кре попало (под номером q5) 9 февраля, а по Кр под номером q5 – 11 февраля. Наоборот, под номером q6 в последнем случае числится 9 февраля, а по Кре – 11 февраля. Это говорит о том, что магнитная активность в эти дни была примерно на одном уровне. Кроме того, в список 10 q-дней по Кре попало 19 февраля (под номером q7) и не попало 25 февраля, которое стоит последним в списке 10 q-дней, вычисленных по Кр. В список 5 d-дней по Кре попало 17 февраля (под

номером d4) и не попало 14 февраля, которое стоит последним в списке 5 возмущенных дней, вычисленных по Кр.



**Рисунок 11.3 – Совпадение q- и d-дней, полученных по Кр- и Кре-индексам за октябрь–ноябрь 1964 г. (слева) и январь–март 1970 г. (справа)**

Анализ показал, что использование дополнительных станций для вычисления планетарного К-индекса влияет на результаты определения q- и d-дней, которые могут быть использованы в качестве дополнительной информации при валидации исходных спутниковых данных для построения моделей внутреннего МПЗ. При использовании более равномерного пространственного распределения данных обсерваторий по поверхности Земли точность определения q и d дней может повышаться.

### 11.3 Валидация альтиметрических спутниковых измерений

#### 11.3.1 Общие положения

Космический геодезический комплекс ГЕОИК находится в эксплуатации с мая 1985 г. Основной его элемент, космический аппарат ГЕОИК, является одним из спутников серии «Космос», предназначенных для изучения Земли и околоземного пространства. Космический аппарат (КА) выводится на близкруговую орбиту высотой около 1500 км и наклоном 74 или 83 градусов. По состоянию на 1996 г. было запущено 10 спутников, оснащенных как радиовысотомером (РВ), так и бортовой геодезической аппаратурой. При этом радиотехническая доплеровская система в течение 12 часов в сутки излучает сигналы на когерентных частотах 150 и 400 МГц для измерения радиальной скорости, а радиотехнический ретранслятор служат для отражения сигналов наземного лазерного дальномера и переизлучения сигналов наземного радиотехнического дальномера. Расположенная на наземных пунктах наблюдения аппаратура измеряет доплеровскую радиальную составляющую скорости движения спутника относительно пункта наблюдения с погрешностью 1–3 см/с, по световым вспышкам определяет положение КА относительно звезд с погрешностью 1–1,5", измеряет дальности до КА лазерами

и радиотехническим дальномерами с погрешностями, соответственно, 0,5–1 и 1–2 м. Основными научными результатами программы ГЕОИК являются: модели геопотенциала ПЗ-90 до 36-й степени разложения и ПЗ-200 до 200-й степени; уточненные координаты пунктов мировой космической геодезической сети (КГС), а также каталог высот геоида на акватории Мирового океана. По состоянию на май 1996 г. выполнение этой программы обеспечило получение десятию КА 19,3 млн радиовысотомерных измерений. Фактическое время активного существования каждого КА составляло от нескольких недель до 18 месяцев. Список спутников и их характеристики приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3. Список спутников программы ГЕОИК

Номер спутника	Дата запуска	Наклонение, град.	Интервал набора информации	Точность, см	Калибровочная поправка, м
1	14.06.85	73,6	08.07.85–31.10.86	60	– 17,0
2	11.02.86	73,6	03.03.86–28.03.86	140	– 25,0
3	02.12.86	83,6	21.12.86–15.12.87	166	– 36,5
4	19.02.87	73,6	09.03.87–12.10.87	105	– 26,0
5	30.05.88	73,6	20.06.88–27.07.90	88	– 22,9
6	28.08.89	73,6	18.09.89–26.09.90		
7	30.07.90	73,6	19.08.90–05.03.93		
8	10.01.93	73,6	10.01.93–23.07.93		– 29,79
9	18.12.94	73,6	18.12.94–28.07.95		– 25,42

При обработке результатов высотомерных измерений (РВИ) наиболее важными этапами являлись расчет эфемерид КА, введение поправок и вычисление высот уровня моря. Исследования показали, что погрешность расчета эфемерид по радиусу-вектору на 5-суточных дугах составляет 1 м. Оценка радиальной составляющей погрешности расчета эфемерид по расхождениям высот морской поверхности в точках пересечения радиовысотомерных трасс подтверждает приведенную оценку. Некоторые выбросы могут объясняться качаниями антенны высотомера. Номинальная точность ориентации антенны составляет 1°.

### 11.3.2 Формирование наборов альтиметрических высот морской поверхности

Из спутниковых радиовысотомерных измерений после их обработки формировались наборы альтиметрических высот морской поверхности. При этом обработка радиовысотомерных измерений сопровождалась расчетом океанических приливов и отклонений от геоида квазистационарного уровня моря. Учитывая невысокую точность РВИ, программой ГЕОИК не было предусмотрено обеспечение поправок



в измеренные высоты морской поверхности за влияние внешней среды (тропосферной и ионосферной поправок, поправки за высоты волн и т.д.). Вычисление высот морской поверхности сопровождалось расчетом поправки за высоту морских приливов, вычисленной по модели Швидерского для 8 основных составляющих, заданных на узлы пересечения параллелей и меридианов с шагом 1 градус. Программой расчета высот приливов предусмотрено введение поправочных членов за влияние долгопериодических приливов и приливов в твердой Земле с учетом нагрузки и самопритяжения. Значения высот морской поверхности вычислялись попарно на 5-суточных дугах, как разность высотной составляющей эфемерид КА и РВИ с сопутствующей информацией в виде поправок и значения модельной высоты геоида. При получении эфемерид КА использовалась модель геопотенциала ПЗ-90. При вычислении высот геоида над эллипсоидом использовалась модель ПЗ-200 до 200-й степени разложения. При создании каталога аномалий силы тяжести (АСТ) был разработан метод комплексирования радиовысотомерной и гравиметрической информации, основанной на локальной аппроксимации ГПЗ системой точечных масс. В результате получено 56840 значений АСТ. Оставшиеся 7960 аномалий были вычислены с привлечением зарубежных данных (модель GPM-2).

### **11.3.3 Определение калибровочной поправки**

Постоянная инструментальная ошибка РВ определялась геодезическим (орбитальным) методом по невязкам измерений. При этом допускалось, что на достаточно большом интервале осредняются как ошибки радиовысотомерных измерений, так и ошибки эфемерид и априорных высот геоида. Для ГЕОИК-1, -5 и -6 калибровочные поправки (КП) были определены в процессе динамического решения задачи при получении системы согласованных параметров Земли (ПЗ-90). Они составили – 17, – 25 и – 36,5 м соответственно. Эти значения являются достаточно стабильными на всем интервале функционирования этих КА. Однако для объектов ГЕОИК-6 и -7 разброс невязок стал достигать десятков метров. Это скорее всего связано с переключениями полуккомплектов бортового радиовысотомера и генератора частоты. Для указанных двух объектов потребовалось более тщательное определение КП на этапе уточнения эфемерид. Скачкообразные изменения в значении КП, превышающие 3 м, дали возможность разделить весь период на 6 групп.

### **11.3.4 Создание новой версии данных**





Содержание данных версии А соответствует аналогичным форматам записи данных альтиметра GEOSAT. Высота спутника Н над отсчетным эллипсоидом системы ПЗ-90 определяется как:  $H \text{ (см)} = \text{Высота орбиты (ПЗ-90) (см)} + 100000 \times 1500 \text{ (км)}$ . Для приведения данных в соответствие современным требованиям, предъявляемым к данным спутниковой альтиметрии, а также для проведения кросс-калибровки с данными спутников GEOSAT и ERS-1 необходимо калибровочную поправку разбить на следующие: «сухая» тропосферная поправка, поправка на влажность, ионосферная поправка (табл. 11.4).

Таблица 11.4. Формат данных версии В записи данных ГЕОИК ПЗ-90

Поле	Параметр	Размерность	Размер
1	Всемирное время (от начала 1985 года)	с	4
2	Дополнительное время	мкс	4
3	Широта	мкград	4
4	Долгота	мкград	4
5	Высота орбиты (ПЗ-90)	см	4
6	Высота морской поверхности, осредненная за одну секунду	см	2
7	Высота геоида (EGM96)	см	2
8	Высота геоида (EGM2008)	см	2
9	«Сухая» тропосферная поправка по реанализу NASA MERRA-2	см	2
10	Поправка на влажность по реанализу NASA MERRA-2	см	2
11	Поправка на влажность по данным СВЧ-радиометров SSMI	см	2
12	Ионосферная поправка по модели IRI-2007	см	2
13	Поправка за океанические приливы по модели Швидерского	см	2
14	Поправка за океанические приливы по модели GOT 4.7	см	2
15	Поправка за океанические приливы по модели GOT 4.8	см	2
16	Поправка за океанические приливы по модели FES2004	см	2
17	Поправка на нагрузку на океанич. дно по модели GOT 4.8	см	2
18	Поправка на нагрузку на океанич. дно по модели FES2004	см	2
19	Поправка на полюсный прилив	см	2
20	Поправка на приливы в земной коре	см	2
21	Калибровочная поправка	см	2
22	Признак подстилающей поверхности: 0 – вода, 1 – земля, 2 – лед, 3 – брак		2
23	Номер спутника (1–9)		2
Длина записи в байтах			56

В ходе исследований был создан архив данных атмосферных реанализа NASA MERRA-2 за период с 1.6.1985 по 31.10.1986, соответствующий времени работе на орбите



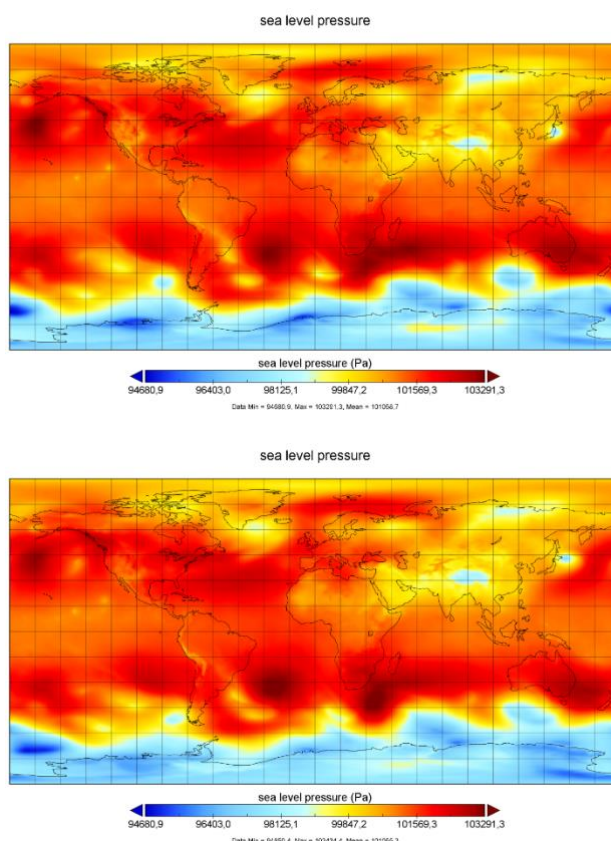
спутника ГЕОИК-1. Также был сформирован банк данных среднесуточных измерений на метеостанциях за период 1985–1995 гг.

### 11.3.5 Обоснование выбора моделей реанализа

Для расчета «сухой» поправки и поправки на влажность при обработке данных используют результаты расчетов по моделям атмосферы Национального центра прогноза окружающей среды (NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR) и модели Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (ECMWF). Сравнительный анализ данных реанализов:

- NASA MERRA-2 на сетке  $0,5^\circ$  ш.  $\times$   $0,625^\circ$  д. за период 1980–2020 гг.,
- NOAA CIRES 20th Century Global Reanalysis Version 2c на сетке  $2^\circ \times 2^\circ$  за 1851–2014 гг.,
- ECMWF ERA-20C на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  за период 1900–2010 гг.,
- JMA JRA-55 на сетке  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  за период 1958–2013 гг.,
- NCEP/NCAR Reanalysis на сетке  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  за период 1948–2018 гг.,
- NCEP-DOE на глобальной Гауссовой сетке T62 ( $192 \times 94$ ) за период 1980–2013 гг.,
- ERA-Interim на сетке  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  за период 1980–2016 гг.
- NCEP-CFSR на сетке  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  за период 1980–2016 гг.

показал, что межгодовые изменения метеорологических параметров за 1985–1995 гг. оказались хорошо коррелированы друг с другом. Рассчитаны матрицы кросс-корреляций изменений метеорологических параметров без сглаживания и с годовым скользящим сглаживанием между различными реанализами за единый для всех период 1985–1995 гг. Наиболее близкими к остальным источникам данных оказались реанализы MERRA-2 с высоким разрешением за период спутниковых наблюдений и NCEP/NCAR с более низким разрешением за более продолжительный период. Поэтому для расчетов «сухой» тропосферной поправки и поправки на влажность будут использованы данные реанализа NASA MERRA-2 на сетке  $0,5^\circ$  ш.  $\times$   $0,625^\circ$  д. На рис. 11.4 представлены поля атмосферного давления на уровне моря на 00 и 12 часов 1 июля 1985 г. по данным этого реанализа.



**Рисунок 11.4 – Поля атмосферного давления на уровне моря на 00 и 12 часов 1 июля 1985 г. по данным реанализа NASA MERRA-2**

В качестве основных моделей расчета поправки на океанические приливы выбраны две современные модели GOT4.8 и FES2004. Приливы в твердой земной коре будут рассчитываться по модели земных приливов ATLANTIDA3.1\_2014, разработанной в ИФЗ РАН. Поправку на океанические приливы предполагается рассчитывать по более современным моделям, чем модель Швидерского: GOT4.8 и FES2004. Однако для проведения кросс-калибровки данных спутников ГЕОИК и GEOSAT приливную поправку, рассчитанную по модели Швидерского, необходимо оставить. В свою очередь необходимо рассчитать поправку на океанические приливы по модели GOT4.7 для кросс-калибровки альтиметрических измерений спутников серии ГЕОИК с данными спутника ERS-1.

#### **Список использованных источников**

Долгинов Ш. Ш., Наливайко В. И., Орлов В. П. и др. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряжённости геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-49». М.: ИЗМИРАН, 1967. Ч. 1. 245 с. Ч. 2. 238 с. Ч. 3. 206 с.

Долгинов Ш. Ш., Козлов А. Н., Наливайко В. И. и др. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряжённости геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-321». М.: Наука. 1976. 180 с



Dolginov, Sh. Sh., Zhigalov, L. N., Strunnikova, L. V., Fel'dshteyn, Ya. I., Cherevko, T. N., and Sharova, V. A.: Magnetic storm of March 8–10, 1970, According to ground-based and Kosmos-321 observations, *Geomagn. Aeronomy*, 12, 909–918, 1972.

Adam, N. V., Osipov, N. K., Tyurmina, L. O., and Shlyakhtina, A. P.: Spherical harmonic analysis of world magnetic charts for the 1960 epoch, *Geomagn. Aeronomy*, 4, 878–879, 1964.

Cain, J. C. and Sweeney, R. E.: Magnetic field mapping of the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.-Space*, 75, 4360–4362, <https://doi.org/10.1029/JA075i022p04360>, 1970.

Vanian, L. L., Fainberg, E. B., and Genis, N. E.: Deep sounding of the Earth by ground-based and satellite measurements of the magnetic field of the equatorial electrojet, *Geomagn. Aeronomy*, 15, 112–116, 1975

## 12 Международная деятельность ГЦ РАН в 2020 году

В 2020 г. Геофизический центр РАН (ГЦ РАН) продолжал вести активную международную деятельность в кооперации с зарубежными коллегами и институтами-партнерами.

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав руководящих органов международных научных организаций:

- Директор ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв является вице-председателем Комиссии по данным и информации (UCDI) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG); российским национальным делегатом в Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA) IUGG; председателем Междивизионной комиссии по истории в IAGA и представителем IUGG в Комитете по данным для науки и техники CODATA (Committee on Data for Science and Technology).
- Научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани является председателем Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики; членом Коллегии экспертов Европейского научного фонда (ESF College of Expert Reviewers); членом Научного совета по геодезии и геофизике при Международной ассоциации академий наук (МАН); членом Международного консультативного совета Новосибирского государственного университета.
- Заместитель директора по развитию, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина является Вице-президентом CODATA и членом исполнительного комитета UCDI.
- Главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований, д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова занимала пост представителя IUGG в Научном комитете по солнечно-земной физике SCOSTEP.

В 2020 г. продолжилась работа по совершенствованию магнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, поддерживаемых ГЦ РАН. Развивается научное сотрудничество между ГЦ РАН и Институтом ионосферы (г. Алма-Ата, Республика Казахстан). Успешно функционирует канал обмена данными между обсерваторией «Алма-Ата» и сервером Российско-украинского центра геомагнитных данных. Данные передаются в оперативном режиме. Осуществляется обмен историческими данными по линии Мировых центров данных, функционирующих в ГЦ РАН.

В 2020 г. в рамках российского сегмента международной сети геомагнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ успешно функционировала разработанная специалистами





ГЦ РАН алгоритмическая система, с применением аппарата нечеткой логики для геомагнитных измерений, которая позволяет получать очищенные от выбросов магнитограммы из предварительных записей практически без участия человека.

В 2020 г. проводились пуско-наладочные работы на новой геомагнитной обсерватории «Гюлагарак» в Армении. Проект выполняется Институтом геофизики и инженерной сейсмологии Республики Армения (ИГИС НАН РА) и Комитетом по науке Армении совместно с ГЦ РАН. Строительство осуществила армянская сторона, а за оснащение магнитной обсерватории в соответствии с международными стандартами отвечает ГЦ РАН.

В 2020 г. научным руководителем ГЦ РАН, академиком РАН А. Д. Гвишиани и директором ГЦ РАН, членом-корреспондентом РАН А. А. Соловьёвым опубликована книга «Наблюдения, моделирование и системный анализ в интерпретации геомагнитных данных» (Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation). Книга издана Springer Nature Switzerland AG.

В июле 2020 г. в журнале «Options» опубликовано интервью «Building the foundation for a world of open data and open science» вице-президента CODATA и заместителя директора по развитию ГЦ РАН, заведующей лабораторией инновационных проектов к. г.-м. н. А. И. Рыбкиной. В ходе интервью были обсуждены актуальные вопросы политики открытых данных и открытой науки – их важность, перспективы развития, а также совместные инициативы Комитета по данным для науки и техники CODATA и Международного института прикладного системного анализа (International Institute of Applied Systems Analysis, IIASA).

В январе 2020 г. в ГЦ РАН состоялась рабочая встреча с крупнейшим специалистом по геофизической турбулентности и физике планетарных пограничных слоёв в атмосфере и гидросфере, профессором Финского метеорологического института Сергеем Зилитинкевичем. Целями встречи были знакомство и обсуждение возможного сотрудничества в области анализа Больших Данных.

В 2020 г. лабораторией геофизических данных ГЦ РАН совместно с лабораторией электронных публикаций продолжилась 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.

Важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах, которые состоялись в 2020 г.:

- Научный руководитель ГЦ РАН, председатель Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики, академик РАН А. Д. Гвишиани принял участие в Международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» в Санкт-Петербурге, посвященной 100-летию со дня образования Государственного научного центра Российской Федерации Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Сегодня институт заслуженно признан флагманом российских научных полярных исследований.
- Заместитель директора по развитию ГЦ РАН, заведующая лабораторией инновационных проектов Рыбкина А. И. выступила с приглашенным докладом на международном семинаре «Unisa Open Access Webinar», организованном Университетом Южной Африки (University of South Africa – UNISA). В докладе «Building Foundation for a World of Open Data and Open Science» освещалась актуальность политики открытых данных и открытой науки – их важность, перспективы развития. Материалы доклада и видео запись семинара доступны по ссылке <http://www.unisa.ac.za>.
- Директор ГЦ РАН А. А. Соловьёв выступил с пленарным докладом на Всероссийской конференции с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», посвященной 90-летию со дня рождения академика Николая Павловича Лавёрова.
- Научный руководитель Геофизического центра РАН, председатель Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики, академик РАН А. Д. Гвишиани выступил на пленарном заседании X Международного форума «Арктика: настоящее и будущее» с докладом: «Большие Данные в перспективных Арктических исследованиях».



### 13 Деятельность Национального геофизического комитета РАН

Национальный геофизический комитет Российской академии наук (НГК РАН) осуществляет представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе (IUGG) и его восьми ассоциациях. НГК 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 является Геофизический центр РАН. Председателем НГК РАН является научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани. Состав Бюро Комитета утвержден Постановлением Бюро Отделения наук о Земле РАН № 13000/1-2 от 19 февраля 2019 г.

Деятельность секций НГК РАН в 2020 г. была направлена на подготовку к участию российских ученых и специалистов в предстоящих крупных научных мероприятиях, проводимых под эгидой IUGG и его ассоциаций, запланированных на 2021 год. Ключевыми являются научные ассамблеи ассоциаций IUGG:

- IAG, Пекин, Китай, 28 июня – 02 июля 2021 г. (<https://www.iag-aig.org/events/19>);
- IAGA–IASPEI, Хайдарабад, Индия, 21–27 августа 2021 г. (<http://iaga-iaspei-india2021.in/>);
- IAVCEI, Роторуа, Новая Зеландия, 20–24 января 2022 г. (<https://confer.eventsair.com/iaxcei2022/>);
- IAHS, Монпелье, Франция, 30 мая – 03 июня 2022 г. (<http://www.iahs2021.org/>).

В связи с тяжелой эпидемиологической ситуацией научные ассамблеи IAHS и IAVCEI были перенесены на 2022 г. Совместная ассамблея IAMAS–IACS–IAPSO, запланированная на июль 2021 г. в Пусане (Республика Корея), была отменена. Вместо нее будет организована серия онлайн-симпозиумов, которые пройдут 19–23 июля 2021 г. Ассамблея IAGA–IASPEI пройдет в режиме видеоконференцсвязи.

25 ноября 2020 г. по инициативе УМС РАН состоялось координационное совещание с руководством российских национальных комитетов, осуществляющих представительство в международных научных организациях. Впервые с начала 1990-х годов в совещании приняли участие представители всех российских национальных комитетов международных научных организаций. В рамках совещания обсуждались актуальные проблемы, связанные с деятельностью национальных комитетов. Наиболее важным являлся вопрос продвижения российских ученых, особенно молодых, в



руководящие, исполнительные и рабочие органы международных организаций. В дальнейшем планируется организовывать подобные совещания на регулярной основе.

В 2020 г. регулярные заседания секций НГК РАН проводились в режиме видеоконференций. Исключением было заседание Секции геодезии НГК РАН, которое состоялось 11 февраля 2020 г. в очном формате.

В 2020 г. председатель НГК РАН академик РАН А. Д. Гвишиани принимал активное участие в деятельности Совета IUGG в качестве национального делегата от РФ.

В июле 2020 г. по результатам голосования членов Совета IUGG директор ГЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв (Секция геомагнетизма и аэрономии) был единогласно избран на должность представителя IUGG в Комитете по данным для науки и техники CODATA (Committee on Data for Science and Technology). Назначение действительно до 28 Генеральной Ассамблеи IUGG, которая состоится в 2023 г.

В феврале 2020 г. в очном режиме было организовано заседание Секции геодезии. Важным вопросом, который рассматривался на заседании, было обсуждение текущего состояния спутниковой навигационной группировки ГЛОНАСС и перспектив его развития. Г.н.с., д.т.н. В. И. Кафтан представил доклад «Итоги 2019 г. и текущие проблемы».

Несмотря на существующие сложности в конце 2020 г. была инициирована работа программного комитета совместной научной ассамблеи IAGA–IASPEI в Хайдарабаде (Индия), запланированной на август 2021 г. Члены Секции геомагнетизма и аэрономии приняли активное участие в формировании научной программы. Чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв выступил в качестве ко-конвинера сессии, посвященной вопросам сбора, хранения, лицензирования и цитирования данных. Учёный секретарь НГК РАН Р. И. Краснощёков выступит ко-конвинером сессии, посвященной актуальным вопросам развития международной сети геомагнитных наблюдений и интеграции наземных и спутниковых данных.

XIX IAGA Workshop, который планировалось провести 6–12 июля 2020 г. на базе геомагнитной обсерватории «Казань» Казанского (Приволжского) федерального университета был перенесен на 2021 г.

В рамках международного симпозиума ESA SWE Service Network Workshop, который прошел 12–14 октября 2020 г. в режиме видеоконференции, под эгидой IAGA была организована сессия Future and Ongoing Expansion of Geomagnetic Monitoring



(Будущее и продолжающееся расширение геомагнитного мониторинга). В ее работе приняли участие члены Секции.

При поддержке Секции молодые ученые В. Е. Чинкин (ГЦ РАН) и И. А. Фирсов (ГЦ РАН/UGA) прошли отбор для участия в 5-й летней школе IAGA для молодых учёных, которая пройдет в августе 2021 г. в Хайдарабаде (Индия).

Члены Секции принимали активное участие в деятельности по развитию геофизических обсерваторий, данные которых в будущем будут использованы как для научных исследований, так и для обеспечения и поддержки различных технологических процессов, в том числе в области недропользования и геоэкологии. На геодезическом пункте обсерватории «Климовская» установлен высокоточный ГНСС-приемник и настроена ежесуточная передача данных ГНСС в ГЦ РАН. Результаты обработки данных ГНСС с данного пункта и ближайших пунктов IGS показывают удовлетворительное качество данных. Новый пункт ГНСС находится в процессе стабилизации. Развертывание данного пункта проводилось при поддержке Секции геодезии.

В российский сегмент геомагнитных обсерваторий включены 4 полярных геофизических станции, расположенных в Арктической зоне РФ (ЯНАО) и поддерживаемых ИЗМИРАН. Также начато строительство магнитной обсерватории «Остров Самойловский» (дельта р. Лены).

Завершено строительство павильонов магнитной обсерватории «Михнево» (Московская обл.), запуск которой предварительно запланирован на 2021 г. В перспективе данная обсерватория сможет заменить обсерваторию «Москва» (ИЗМИРАН, г. Троицк), данные которой подвержены техногенным помехам.

Выполнена аэромагнитная съемка с территории магнитной обсерватории «Казань» с БПЛА, показавшая практическое отсутствие источников крупных аномалий в ее окрестностях.

### **Представители России в Международном геодезическом и геофизическом союзе и его ассоциациях в 2020–2022 гг.**

#### **Национальный геофизический комитет РАН**

<i>Председатель:</i>	ГВИШИАНИ Алексей Джерменович (ГЦ РАН)
<i>Заместитель председателя:</i>	МОРОЗОВ Евгений Георгиевич (ИО РАН)
<i>Заместитель председателя:</i>	ЛЮБОВЦЕВА Юлия Сергеевна (ГЦ РАН)
<i>Ученый секретарь:</i>	КРАСНОПЁРОВ Роман Игоревич (ГЦ РАН)



**Национальные представители России в ассоциациях IUGG**

ГЛИКО Александр Олегович,  
академик РАН  
председатель Секции сейсмологии и  
физики недр Земли  
национальный представитель в IASPEI  
Отделение наук о Земле РАН

ДЖАМАЛОВ Роальд Гамидович,  
д.г.-м.н.  
председатель Секции гидрологических  
наук  
национальный представитель в IAHN  
Институт водных проблем РАН

ЗАВЬЯЛОВ Петр Олегович,  
чл.-корр. РАН  
председатель Секции физических наук об  
океане  
национальный представитель в IAPSO  
Институт океанологии  
им. П. П. Ширшова РАН

КОТЛЯКОВ Владимир Михайлович,  
академик РАН  
председатель Секции криосферных наук  
национальный представитель в IACS  
Институт географии РАН

МОХОВ Игорь Иванович,  
академик РАН  
председатель Секции метеорологии и  
атмосферных наук  
национальный представитель в IAMAS  
Институт физики атмосферы  
им. А. М. Обухова РАН

ОЗЕРОВ Алексей Юрьевич,  
д.г.-м.н.  
председатель Секции вулканологии и  
химии недр Земли  
национальный представитель в IAVCEI  
Институт вулканологии и сейсмологии  
ДВО РАН

САВИНЫХ Виктор Петрович,  
академик РАН  
председатель Секции геодезии  
национальный представитель в IAG  
Московский государственный  
университет геодезии и картографии

СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович,  
чл.-корр. РАН  
национальный представитель в IAGA  
Геофизический центр РАН



## Список основных научных публикаций за 2020 год

### Монографии

1. Gvishiani, A., Soloviev, A. (2020). Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation. *Springer International Publishing*. 311 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58969-1>

### Статьи в журналах

2. Ощенко А. А., Сидоров Р. В., Соловьёв А. А., Соловьёва Е. Н. Обзор применения меры аномальности для оценки геомагнитной активности. *Геофизические исследования*, 21(4), 5–19., <https://doi.org/10.21455/gr2020.4-4>
3. Побединский Г. Г., Кафтан В. И. (2020). Системы координат глобальные, континентальные, региональные, национальные: состояние, проблемы, перспективы. *Науки о Земле*, 3, 4–59.
4. Побединский Г. Г., Кафтан В. И., Савиных В. П. (2020) Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании, *Геопрофи*, 3, 42–51., <https://doi.org/->
5. Побединский Г. Г., Кафтан В. И., Савиных В. П. (2020) Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании, *Геопрофи*, 4, 41–52., <https://doi.org/->
6. Agayan, S. M., Bogoutdinov, Sh. R., Bulychev, A. A., Soloviev, A. A., & Firsov, I. A. (2020). A Projection Method for Solving Systems of Linear Equations: *Gravimetry Applications*. *Doklady Earth Sciences*, 493(1), 530–534., <https://doi.org/10.31857/S2686739720070051>
7. Agayan, S. M., Tatarinov, V. N., Gvishiani, A. D., Bogoutdinov, Sh. R., Belov, I. O. (2020). FDPS algorithm in stability assessment of the Earth's crust structural tectonic blocks. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–14., <https://doi.org/10.2205/2020ES000752>
8. Aleshin I. M., Ivanov S. D., Koryagin V. N., Matveev I. V., Perederin F. V., Solovyov A. A., Kholodkov K. I. (2020), IT-infrastructure of geomagnetic observatory network. *Geophysical Research*, 21(3), 50–65., <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-4>
9. Aleshin, A., Soloviev, A., Aleshin, M., Sidorov, R., Solovieva, E., Kholodkov, K. (2020). Prospects of Using Unmanned Aerial Vehicles in Geomagnetic Surveys. *Seismic Instruments*, 56(5), 522–530., <https://doi.org/10.21455/std2019.3-3>
10. Bedanokov, M. K., Chich, S. K., Chetyz, D. Yu., Trepet, S. A., Lebedev, S. A., & Kostianoy, A. G. (2020). Physicogeographical Characteristics of the Republic of Adygea. *In the Handbook of Environmental Chemistry*. Springer Berlin Heidelberg, 1–37, [https://doi.org/10.1007/698\\_2020\\_637](https://doi.org/10.1007/698_2020_637)
11. Chinkin, V. E., Soloviev, A. A., & Pilipenko, V. A. (2020). Identification of Vortex Currents in the Ionosphere and Estimation of Their Parameters Based on Ground Magnetic Data. *Geomagnetism and Aeronomy*, 60(5), 559–569., <https://doi.org/10.31857/S001679402005003X>
12. Dobrovol'sky, N. N., Dobrovol'skii, M. N., Dobrovol'skii, N. M., Balaba, I. N., Rebrova, I. Yu. (2019). Dirichlet series algebra of a monoid of natural numbers. *Chebyshevskii Sbornik*, 20(1), 179–194, <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1-179-194>

13. Dobrovolsky, M., Kudin, D., & Krasnoperov, R. (2020). Unified Geomagnetic Database from Different Observation Networks for Geomagnetic Hazard Assessment Tasks. *Data Science Journal*, 19(1), 1–7, <https://doi.org/10.5334/dsj-2020-034>
14. Dzeboev, B. A., Karapetyan, J. K., Aronov, G. A., Dzeranov, B. V., Kudin, D. V., Karapetyan, R. K., Vavilin, E. V. (2020). FCAZ-recognition based on declustered earthquake catalogs. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–9., <https://doi.org/10.2205/2020ES000754>
15. Fedorov, E. N., Mazur, N. G., Pilipenko, V. A., & Vakhnina, V. V. (2020). Modeling ELF Electromagnetic Field in the Upper Ionosphere from Power Transmission Lines. *Radio Science*, 55(7), <https://doi.org/10.1029/2019RS006943>
16. Gavrilov, B. G., Pilipenko, V. A., Poklad, Y. V., & Ryakhovsky, I. A. (2020). Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–8., <https://doi.org/10.2205/2020ES000748>
17. Getmanov, V. G., Sidorov, R. V., Dobrovolsky, M. N., Yashin, I. I., Dmitriev, A. N., Perederin, F. V. (2020). Two-Dimensional Filtering Method Using Systems of Local Model Functions for Muonogram Analysis. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 30(3), 460–459., <https://doi.org/10.1134/S1054661820030062>
18. Golubkov, G. V., Manzhelii, M. I., Berlin, A. A., Eppelbaum, L. V., Lushnikov, A. A., Morozov, I. I., et al. (2020). The Problems of Passive Remote Sensing of the Earth's Surface in the Range of 1.2–1.6 GHz. *Atmosphere*, 11(6), 650., <https://doi.org/10.3390/atmos11060650>
19. Golubkov, G. V., Maslov, T. A., Bychkov, V. L., Borschevkina, O. P., Adamson, S. O., Dyakov, Yu. A., Lushnikov, A. A., Golubkov, M. G. (2020). Atomic Oxygen in the Ionospheric E Layer. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 14(5), 853–861., <https://doi.org/10.1134/S199079312005019X>
20. Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Bogoutdinov, S. R. (2019). Investigation of systems of real functions on two-dimensional grids using fuzzy sets. *Chebyshevskii Sbornik*, 20(1), 94–111., <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1-94-111>
21. Gvishiani, A. D., Lyubovtseva, Y. S., Kedrov, E. O., & Barykina, Y. V. (2020). The history of the research of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2014. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 12(1), 1–20., <https://doi.org/10.2205/2020NZ000363>
22. Gvishiani, A. D., Soloviev, A. A., & Dzeboev, B. A. (2020). Problem of Recognition of Strong-Earthquake-Prone Areas: a State-of-the-Art Review. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 56(1), 1–23., <https://doi.org/10.31857/S0002333720010044>
23. Gvishiani, A. D., Tatarinov, V. N., Kaftan, V. I., Manevich, A. I., Dzeboev, B. A., & Losev, I. V. (2020). The Velocities of Modern Horizontal Movements of Earth Crust in the South Sector of Yenisei Ridge According to GNSS Observations. *Doklady Earth Sciences*, 493(1), 544–547., <https://doi.org/10.31857/S2686739720070075>
24. Gvishiani, A., Dzeboev, B., Nekhoroshev, S. (2020). Recognition of Earthquake-Prone Areas for Seismic Hazard Evaluation. In *Disaster and Risk Research: GADRI Book Series* (pp. 9–24). *Springer Singapore*., [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4320-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4320-3_2)
25. Ishkov, V. N., Sergeeva, N. A., Zabarinskaya, L. P., Kedrov, E. O., Nesilevich, M. V., & Krerylova, T. A. (2020). Observational data for the study of solar active phenomena and space weather. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 12(4), 1–11., <https://doi.org/10.2205/2020NZ000365>



26. Ismail-Zadeh, A., Adamia, S., Chabukiani, A., Gvishiani, A. et al. (2020). Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus. *Earth-Science Reviews*, 207, 103222., <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103222>
27. Kaftan, V. I., Tatarinov, V. N., Manevich, A. I., Prusakov, A. N., Kaftan, A. V. (2020). Accuracy estimation of GNSS observations at a reference basis as a means of testing the measuring equipment of local geodynamic monitoring. *Geodesy and Cartography*, 961(7), 37–46., <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46>
28. Kamnev E. N., Karamushka V. P., Seleznev A. V., Morozov V. N., Hiller A. (2020). Ecology of uranium mine closure: problems and solutions (in terms of Russia, CIS countries and Germany). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 5, 26–39, <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-26-39>
29. Karapetyan J. K., Sargsyan R. S., Kazaryan K. S., Dzeranov B. V., Dzeboev B. A., Karapetyan, R. K. (2020). Current state of exploration and actual problems of tectonics, seismology and seismotectonics of Armenia. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(2), 1–14., <https://doi.org/10.2205/2020ES000709>
30. Khokhlov, A. V., Pilipenko, V. A., Krasnoperov, R. I., Nikolova, Yu. I., & Dobrovolsky, M. N. (2020). Geomagnetic Field Variability Analysis Based on Polar Diagrams. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 56(6), 854–863., <https://doi.org/10.31857/S0002333720060034>
31. Khokhlov, A. V., Shcherbakov, V. P., & Lhuillier, F. (2020). Using the Giant Gaussian Process model from paleodirectional and paleointensity data to investigate paleomagnetic secular variation. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–15., <https://doi.org/10.2205/2020ES000710>
32. Kiseleva, S. V., Korinevich, L. A., & Lebedev, S. A. (2020). Renewable Energy Potential in the Republic of Adygea. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–28., [https://doi.org/10.1007/698\\_2020\\_504](https://doi.org/10.1007/698_2020_504)
33. Klyuev, R. V., Bosikov, I. I., Revazov, V. C., Krysanov, K. S., & Dzeranov, B. V. (2020). A comprehensive analysis of the properties of reservoir rocks to determine the productive oil horizons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 952, 012017., <https://doi.org/10.1088/1757-899X/952/1/012017>
34. Komitov, B., Kaftan, V. (2019). Annual Beech (*Fagus sylvatica*) Growth Rings and Solar-Related Climate Variations in the Central and Western Balkans in the 18th–21st Centuries. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(7), 926–934., <https://doi.org/10.1134/S001679321907017X>
35. Komitov, B., Kaftan, V. (2020). Climate Oscillations in Southern Bulgaria and Solar Activity: Analysis of Annual Rings of Needle Samples. *Geomagnetism and Aeronomy*, 60(8), 1180–1186., <https://doi.org/10.1134/S0016793220080101>
36. Kozyreva O. V., Pilipenko V. A. (2020). On the relationship of geomagnetic disturbances and seismic activity for Alaska region, *Geophysical Research*, 21(1), 33–49, <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-3>
37. Kozyreva, O., Pilipenko, V., Krasnoperov, R., Baddeley, L., Sakharov, Y., & Dobrovolsky, M. (2020). Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents. *Annals of Geophysics*, 63(2), GM219, 1–21., <https://doi.org/10.4401/ag-8198>
38. Krasnoperov, R., Peregoudov, D., Lukianova, R., Soloviev, A., & Dzeboev, B. (2020). Early Soviet satellite magnetic field measurements in the years 1964 and 1970. *Earth System Science Data*, 12(1), 555–561., <https://doi.org/10.5194/essd-12-555-2020>

39. Kronberg, E. A., Gastaldello, F., Haaland, S., Smirnov, A., Berrendorf, M., Ghizzardi, S., et al. (2020). Prediction and Understanding of Soft-proton Contamination in XMM-Newton: A Machine Learning Approach. *The Astrophysical Journal*, 903(2), 89., <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbb8f>
40. Kudin, D. V., Uchaikin, E. O., Gvozdev, A. Y., Kudryavtsev, N. G., Krasnoperov, R. I., Szollosy, J., Hegymegi, L. (2020). Development and testing of a portable «noise-meter» for areal magnetic noise survey. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(3), 1–9., <https://doi.org/10.2205/2020ES000713>
41. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. (2020). Investigation of seasonal and interannual variability of water exchange through the Middle Caspian based on satellite altimetry. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17(6), 103–109., <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-103-109>
42. Lebedev, S. A., & Kravchenko, P. N. (2020). Soil Degradation in the Republic of Adygea Under Exogenous Geological Processes. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–17., [https://doi.org/10.1007/978\\_2020\\_651](https://doi.org/10.1007/978_2020_651)
43. Lebedev, S. A., Gunina, G. N., Ashinov, Y. N., & Kravchenko, P. N. (2020). Ecological Conditions of Soils in the Republic of Adygea. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–22., [https://doi.org/10.1007/978\\_2020\\_640](https://doi.org/10.1007/978_2020_640)
44. Lebedev, S. A., Korinevich, L. A. (2020). Development of Exogenous Geological Processes in the Territory of the Republic of Adygea. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–31., [https://doi.org/10.1007/978\\_2020\\_558](https://doi.org/10.1007/978_2020_558)
45. Lebedev, S. A., Kostianoy, A. G., & Kravchenko, P. N. (2020). Digital Elevation Model of the Republic of Adygea. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–27., [https://doi.org/10.1007/978\\_2020\\_656](https://doi.org/10.1007/978_2020_656)
46. Lebedev, S. A., Kostianoy, A. G., Soloviev, D. M., Kostianaia, E. A., & Ekba, Y. A. (2020). On a relationship between the river runoff and the river plume area in the northeastern Black Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 41(15), 5806–5818., <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1685723>
47. Lebedev, S. A., Shevyakova, O. P., & Bedanokov, M. K. (2020). Seasonal and Interannual Variability of the Krasnodar Reservoir Water Level Based on Satellite Altimetry Data. In the Handbook of Environmental Chemistry. *Springer Berlin Heidelberg*. 1–20., [https://doi.org/10.1007/978\\_2020\\_588](https://doi.org/10.1007/978_2020_588)
48. Lukianova R., Kozlovsky A. (2020). Electron density in the polar F region ionosphere during solar minimum: modeling, radar and ionosonde observations, *Russ. J. Earth Sci.*, 20(1), ES1004., <https://doi.org/10.2205/2019ES000699>
49. Lushnikov, A. A. (2020). Cyclization in bipartite random graphs. *Physical Review E*, 101(3), <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.101.032306>
50. Lyubovtseva, Y. S., Gvishiani, A. D., Soloviev, A. A., Samokhina, O. O., & Krasnoperov, R. I. (2020). Sixtieth anniversary of the International Geophysical Year (1957–2017) – contribution of the Soviet Union. *History of Geo- and Space Sciences*, 11(2), 157–171., <https://doi.org/10.5194/hgss-11-157-2020>
51. Manevich A. I. (2020). Analysis and monitoring modern Earth's surface deformation velocity for local geodynamic polygons with scale effect. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 6–1, 194–203., <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-194-203>





52. Marshalko, E., Kruglyakov, M., Kuvshinov, A., Murphy, B. S., Rastätter, L., Ngwira, C., & Pulkkinen, A. (2020). Exploring the Influence of Lateral Conductivity Contrasts on the Storm Time Behavior of the Ground Electric Field in the Eastern United States. *Space Weather*, 18(3), <https://doi.org/10.1029/2019SW002216>
53. Martines-Bedenko, V. A., Pilipenko, V. A., Fedorov, E. N., Nahayo, E., & Yizengaw, E. (2020). Low-Latitude Pi2 Waves according to Observations on SWARM Satellites and Ground Stations. *Cosmic Research*, 58(1), 1–11., <https://doi.org/10.1134/S0023420620010057>
54. Mazurov, B. T., Kaftan, V. I. (2020). Reviewing the development of geodynamics and geodesic methods for solving geodynamic tasks. *Geodesy and Cartography*, 81(2), 25–39, <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39>
55. Morozov, V. N., Tatarinov, V. N., & Manevich, A. I. (2020). Simulating the State of Stress and Strain in the Epicentral Zone of a Large Earthquake in Turkey (Izmit, 1999, M 7.4). *Journal of Volcanology and Seismology*, 14(2), 105–114., <https://doi.org/10.31857/S0203030620020042>
56. Odintsova, A., Rybkina, A., Nikolova, J., Korolkova, A. (2020). GIS Project ROSA: FAIR Principles in the Petroleum Industry. *Data Science Journal*, 19(13), 1–7, <https://doi.org/10.5334/dsj-2020-013>
57. Olenchenko, V. V., Tsibizov, L. V., Osipova, P. S., Charginov, T. T., Viola, B. T., Kolobova, K. A., & Krivoschapkin, A. I. (2020). Peculiarities of Using 2D Electrical Resistivity Tomography in Caves. *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 48(4), 67–74., <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2020.48.4.067-074>
58. Peregoudov D. V., Solovyev A. A., Yashin I. I., Shutenko V. V. (2020). Galactic cosmic ray anisotropy modelling. *Solnechno-zemnaya fizika*, 6(1), 36–42., <https://doi.org/10.12737/szf-61202003>
59. Peregoudov, D. V. (2020). Relativistic length contraction and time dilation as dynamical phenomena. *European Journal of Physics*, 41(1), 15602., <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab454a>
60. Peregudov, D. V. (2020). Upper and lower bounds of average elastic constants of an anisotropic polycrystalline medium: calculations and a priori estimates. *Russian Geology and Geophysics*, 61(1), 110–118, <https://doi.org/10.15372/GiG2019096>
61. Petrov, V. G., & Krasnoperov, R. I. (2020). The aspects of K-index calculation at Russian Geomagnetic Observatories. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–7., <https://doi.org/10.2205/2020ES000724>
62. Pilipenko, O. V., Filina, E. V., Rostovtseva, Yu. V., & Novruzov, Z. (2020). Petromagnetism and paleomagnetism of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch Peninsula). *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(3), 1–13., <https://doi.org/10.2205/2020ES000712>
63. Presnyakov, S., Boyarshinov, G., Odintsova, A., Rybkina, A. (2020). Spherical Visualization Database Prototype for Education and Scientific Research: Designing and Managing. *Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (GraphiCon 2020)*. Part 2, 2744. 1–15., <https://doi.org/10.51130/graphicon-2020-2-3-12>

64. Rostovtseva, Yu. V. (2020). Depositional Environments in the Eastern Paratethys during the Final Middle Miocene Transgression (Kura Basin, Eastern Georgia). *Lithology and Mineral Resources*, 55(6), 486–495., <https://doi.org/10.31857/S0024497X20060063>
65. Rostovtseva, Yu. V., Koiava, K. P., Rybkina, A. I. (2020). The Cyclostratigraphy of the Konkian Deposits of Eastern Georgia (Eastern Paratethys, Kura Basin). *Moscow University Geology Bulletin*, 75(6), 579–588., <https://doi.org/10.3103/S0145875220060101>
66. Soloviev, A. A. (2020). Mathematical methods for processing geomagnetic flows ground and satellite based measurements for expanding knowledge of the Earth's magnetic field. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 12, ISR2001, <https://doi.org/10.2205/2020ISR012>
67. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Enikeev T. A., Vorobeva G. R. (2020). Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations. *Computer Optics*, 44(5), 782–790., <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-707>
68. Vorobev, A. V., Pilipenko, V. A., Krasnoperov, R. I., Vorobeva, G. R., & Lorentzen, D. A. (2020). Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the «virtual globe» technology. *Russian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1–9., <https://doi.org/10.2205/2020ES000721>
69. Vorobev, A. V., Pilipenko, V. A., Reshetnikov, A. G., Vorobeva, G. R., & Belov, M. D. (2020). Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters. *Scientific Visualization*, 12(3), 108–118., <https://doi.org/10.26583/sv.12.3.10>

#### Тезисы докладов

1. Бадулин С. И., Григорьева В. Г., Шабанов П. А., Шармар В. Д., Лебедев С. А., Костяной А. Г. (2020). О некоторых дополнительных возможностях мониторинга субполярных акваторий методами спутниковой альтиметрии. 18 всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 16–20 ноября 2020 г.
2. Белаховский В. Б., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. (2020). Вклад суббуревых возмущений в рост геомагнитно- индуцированных токов, регистрируемых в линиях электропередач. 15 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 10–14 февраля 2020 г.
3. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Козырева О. В., Евдокимова М. А. (2020). Новые региональные геомагнитные индексы для российского сектора. 15 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 10–14 февраля 2020 г.
4. Гвишиани А. Д. (2020). Арктический регион – полигон системного анализа Больших Данных. V Международная конференция «Арктика: шельфовые проекты и устойчивое развитие регионов» (Арктика–2020), 19–20 февраля 2020 г.
5. Гвишиани А. Д. (2020). Большие Данные в перспективных Арктических исследованиях. X Международный форум «Арктика: настоящее и будущее», 10 декабря 2020 г.
6. Гвишиани А. Д. (2020). Глобальная система геомагнитных наблюдений и магнитометрическая система обсерваторий РФ. Дальневосточный энергетический форум «Нефть и газ Сахалина 2020», СахГУ, 30 сентября - 01 октября 2020 г.
7. Гетманов В. Г., Чинкин В. Е., Гвишиани А. Д., Яшин И. И., Ковыляева А. А. (2020). Исследование вариаций мюонных потоков в матричных наблюдениях мюонного



- годоскопа с применением двумерной скользящей фильтрации. 36 Всероссийская конференция по космическим лучам (ВККЛ), НИИЯФ МГУ, 28.09-02.10.2020
8. Захарова Н. Б., Агошков В. И., Лебедев С. А., Лезина Н. Р., Пармузин Е. И., Фомин В. В., Шелопут Т. О., Шутяев В. П. (2020). Вариационная ассимиляция данных ЦКП «ИКИ-мониторинг» в задаче моделирования динамики Черного и Азовского морей. 18 всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 16–20 ноября 2020 г.
  9. Кафтан В. И. (2020). Миграция деформации земной поверхности, как триггер серии землетрясений Риджкрест (июль 2019 г.). Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5–9 октября 2020 г., г. Москва. М.: ИФЗ. 2020. – С.439–445
  10. Кудин Д. В. (2020). Развитие геомагнитных наблюдений в Архангельской области. Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», ФИЦКИА РАН, 2–5 ноября 2020 г.
  11. Лебедев С. А. (2020). Введение в дистанционные методы зондирования Земли. 11 Международная школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли». ИКИ РАН, Таруса, 16–20 марта 2020 г.
  12. Лебедев С. А. (2020). Идентификация положения кромки льда в Баренцевом море по данным спутниковой альтиметрии и межгодовая изменчивость ее положения 11 Международная школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли». ИКИ РАН, Таруса, 16–20 марта 2020 г.
  13. Лебедев С. А. (2020). Оценка климатической изменчивости водообмена между частями Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии. 11 Международная школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли». ИКИ РАН, Таруса, 16–20 марта 2020 г.
  14. Лебедев С. А. (2020). Спутниковая альтиметрия - основы метода и приложения в науках о Земле. 11 Международная школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли». ИКИ РАН, Таруса, 16–20 марта 2020 г.
  15. Лебедев С. А., Захарова Н. Б., Пармузин Е. И., Агошков В. И., Шутяев В. П. (2020), Верификация по данным спутниковой альтиметрии результатов вариационной ассимиляции температуры поверхности моря по данным ЦКП «ИКИ-мониторинг» в задаче моделирования динамики Черного моря. 18 всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 16–20 ноября 2020 г.
  16. Лебедев С. А., Костяной А. Г., Кравченко П. Н., Шевякова О. П. (2020). Исследование сезонной и межгодовой изменчивости индекса NDVI на территории Республики Адыгея. 18 всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 16–20 ноября 2020 г.
  17. Лебедев С. А., Костяной А. Г., Серых И. В., Костяная Е. А., Кравченко П. Н. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости ветрового и волнового режима Белого моря по данным спутниковой альтиметрии. 18 всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», 16–20 ноября 2020 г.
  18. Лосев И. В. (2020). ГИС-ориентированная база данных для оценки геодинамической устойчивости Нижнеканского массива. В книге: Научная конференция молодых

- ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции. Москва, ИФЗ РАН, 28–29 октября 2020 г. М.: ИФЗ РАН, 2020. с. 41
19. Лосев И. В., Шевчук Р. В. (2020). ГИС-ориентированная база данных для оценки геодинамической безопасности Нижнеканского массива. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 23–24 ноября 2020 г.) / ВГУ, 2020. с. 233–235.
20. Лосев И. В., Шевчук Р. В. (2020). Разработка 3D-модели участка енисейский нижнеканского массива для обеспечения геоэкологической безопасности захоронения РАО. IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы геомеханики и геотехнологии добычи полезных ископаемых».
21. Маневич А. И. (2020). Моделирование поля скоростей горизонтальных движений Нижнеканского массива по данным ГНСС-наблюдений. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции. Москва, ИФЗ РАН, 28–29 октября 2020 г. М.: ИФЗ РАН, 2020. с. 44
22. Маневич А. И., Коликов К. С., Татаринов В. Н. (2020). Мониторинг и анализ полей деформаций локального геодинамического полигона на основе ГНСС систем. XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка–2020». 27–31 января 2020 г.
23. Маневич А. И., Урманов Д. И. (2020). Нейросетевое моделирование поля скоростей горизонтальных движений Нижнеканского массива по данным ГНСС-наблюдений. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 23–24 ноября 2020 г.) / ВГУ, 2020. с. 240–243.
24. Маневич А. И., Урманов Д. И., Лосев И. В. (2020). Геоинформационное моделирование напряженно-деформированного состояния геологической среды для обеспечения безопасной подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах России» (Воронеж, 23–24 ноября 2020 г.) / ВГУ, 2020. с. 343–346.
25. Маневич А. И., Шевчук Р. В. (2020). Регрессионный анализ скоростей деформаций земной поверхности локальных геодинамических полигонов. IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы геомеханики и геотехнологии добычи полезных ископаемых».
26. Маневич, А. И. (2020). Анализ и мониторинг скоростей деформаций земной поверхности мест размещения геоэкологически опасных объектов. Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции 23–25 апреля 2020 г., Москва: РУДН. Т.1. 404–408.
27. Пилипенко В. А., Федоров Е. Н., Мазур Н. Г. (2020). Проникновение в верхнюю ионосферу электромагнитного излучения линий электропередач и установки Зевс. 15 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 10–14 февраля 2020 г.
28. Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Нисилевич М. В., Крылова Т. А. (2020). Исторические данные о магнитном поле земли для науки. 15 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» ИКИ РАН, 10–14 февраля 2020 г.



29. Соловьёв А. А. (2020). Геомагнитное сопровождение высокотехнологичной деятельности нефтегазовой отрасли в Арктике. Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики», ФИЦКИА РАН, 2–5 ноября 2020 г.
30. Фирсов И. А., Богоутдинов Ш. Р., Агаян С. М. (2020). Применение проекционного метода к обратной задаче гравиразведке на примере норильского месторождения. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции. Москва, ИФЗ РАН, 28–29 октября 2020 г. М.: ИФЗ РАН, 2020. с. 68
31. Чинкин В. Е. (2020). Метод определения характеристик вихревых структур в высокоширотной ионосфере, ассоциированных с геоиндуцированными токами. Молодежная конференция школы-семинара «Аппроксимационные подходы и анализ геофизических данных». ИФЗ РАН - НТУ «Сириус», 13–18 июня 2020 г.
32. Чинкин В. Е., Соловьёв А. А., Пилипенко В. А. (2020). Метод обработки сигналов сети магнитных станций для определения параметров вихревых структур в ионосфере, ассоциированных с геоиндуцированными токами. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции. Москва, ИФЗ РАН, 28–29 октября 2020 г. М.: ИФЗ РАН, 2020. с. 69
33. Badulin S., Grigorieva V., Shabanov P., Sharmar V., Karpov I., Lebedev S., Kostianoy A. (2020). Case Study of Wind-Driven Waves in the White Sea During the Tandem Phase of Jason-2 and Jason-3 Missions. 12th Coastal Altimetry Workshop 4–7 February 2020 ESA–ESRIN
34. Chinkin V. E., Getmanov V. G., Gvishiani A. D., Yashin I. I., Kovylyaeva A. A. (2020). Calculation of the functions of variations in the intensities of muon fluxes for time series of the URAGAN hodoscope matrix data. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 5–9 October 2020
35. Dobrovolsky M. N., Getmanov V. G., Chinkin V. E., Butyrsky E. Yu., Yashin I. I., Osetrova N. V. (2020). Search for anisotropy regions in matrix data of the URAGAN muon hodoscope using the decision rule technology. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 5–9 October 2020
36. Dobrovolsky M. N., Getmanov V. G., Sidorov R. V., Soloviev A. A., Chinkin V. E., Borog V. V., Dmitrieva A. N., Yashin I. I. (2020). Investigation of the Hardware Functions of the URAGAN Muon Hodoscope Using Mathematical Modeling. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 5–9 October 2020
37. Getmanov V. G., Chinkin V. E., Soloviev A. A., Yashin I. I., Dmitrieva A. N. (2020). Estimating the URAGAN muon hodoscope hardware function using the two-stage optimization procedure. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 5–9 October 2020
38. Gvishiani A. D. (2020). Big, Open and FAIR Data in Arctic Studies. Международная научная конференция «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики». ААНИИ. СПб
39. Gvishiani A. D. (2020). Big, Open and FAIR Data in Arctic Studies. First meeting of Arena for the gap analysis of the existing Arctic Science Co-Operations – AASCO, 2–3 November 2020.
40. Gvishiani A. D. (2020). Big Data, FAIR Data and Open Data for Systems Analysis. IIASA Workshop: Big Data and Systems Analysis, 25–24 февраля 2020 г.



41. Komitov B., Kaftan V. (2020). The beech tree ring widths, solar-climatic relationships and solar dynamo regime changes. *Proceedings of Twelfth Workshop «Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere»*. Primorsko, Bulgaria, June, 2020. p. 141–146., <https://doi.org/10.31401/WS.2020.proc>
42. Komitov B., Kaftan V. (2020). The Volcanic and Solar Activity Relationship during the Last ~ 460 Years. Could a Significant Part of the «Sun-Climate» Relationship. Goes Through Lithosphere? *Proceedings of Twelfth Workshop «Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere»*. Primorsko, Bulgaria, June, 2020. p. 135–140., <https://doi.org/10.31401/WS.2020.proc>
43. Kostianoy A, Lebedev S, Badulin S., Grigorieva V, Kouraev A., Tcepelev V. (2020). CFOSAT Mission: A Proposal for Testing Sites in the North-Western Russia. 12th Coastal Altimetry Workshop 4–7 February 2020 ESA–ESRIN
44. Kozyreva, O., Pilipenko, V., Sokolova, E., Sakharov, Y., & Epishkin, D. (2019). Geomagnetic and Telluric Field Variability as a Driver of Geomagnetically Induced Currents. In *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences* (pp. 297–307). Springer International Publishing., [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_26)
45. Lebedev S., Kostianoy A., Soloviev D. (2020). Identification Sea Ice Edge Position based on Satellite Altimetry. 12th Coastal Altimetry Workshop 4–7 February 2020 ESA–ESRIN
46. Lebedev S. A. (2020). Recalculation plan for altimetry measurements of Russian GEO-IK satellites No 1–9 (1985–1995). 12th Coastal Altimetry Workshop 4–7 February 2020 ESA–ESRIN
47. Massaro S., Costa A., Sulpizio R., Coppola D., Capra L., Soloviev A. (2020). Detecting cyclic behaviour at calcalkaline volcanoes: the case of Fuego de Colima (Mexico) and Santiaguito lava dome complex (Guatemala). AGU Fall Meeting, 1–17 December 2020.
48. Massaro S., Costa A., Sulpizio R., Coppola D., Soloviev A. (2020). Detection of multi-term periodicity from secular effusive activity: the case of Santiaguito lava dome (Guatemala). 4th National Rittmann Conference (12–15 February 2020, Catania, Italy)
49. Presnyakov S., Boyarshinov G., Odintsova A., Rybkina A. (2020). Spherical Visualization Database Prototype for Education and Scientific Research: Designing and Managing. 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision «GraphiCon 2020 Computer Graphics and Machine Vision», 20–25 сентября 2020 г.
50. Rybkina A. (2020). Building Foundation for a World of Open Data and Open Science. Unisa Open Access Webinar. 21 October 2020. UNISA, South Africa. <http://uir.unisa.ac.za/handle/10500/26725>
51. Sidorov R. V., Dobrovolsky M. N., Getmanov V. G., Chinkin V. E., Osetrova N. V., Yakovleva E. I., Yashin E. I. (2020). Search for heliospheric disturbances and Forbush decreases in time series of matrix data of the URAGAN hodoscope using decision rules for sequences of confidence intervals. The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 5–9 October 2020
52. Soloviev A., Krasnoperov R., Grudnev A., Khokhlov A. Kudin D., Sidorov R., Vavilin E. (2020). Geomagnetic Monitoring Progress in Russia and Near-Abroad Countries. ESA SWE Service Network Workshop. 12–14 October 2020
53. Soloviev A., Smirnov A. (2020). Solar quiet daily (Sq) geomagnetic variation during minimum of solar cycle 23/24. EGU General Assembly 2020, Online 4–8 May 2020.



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

### Программы для ЭВМ

1. Богоутдинов Ш. Р., Агаян С. М. Сглаживание системы временных рядов на основе регрессионных производных / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664360 от 12 ноября 2020 г.
2. Богоутдинов Ш. Р., Агаян С. М., Соловьёв А. А., Сидоров Р. В. ДМА-интерполяция на сфере / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664620 от 16 ноября 2020 г.
3. Богоутдинов Ш. Р., Агаян С. М., Фирсов И. А. Программа для решения систем линейных уравнений проекционным методом / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664415 от 12 ноября 2020 г.
4. Бояршинов Г.С., Пресняков С. В., Рыбкина А. И. ORBUS Web 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664622 от 16 ноября 2020 г.
5. Гетманов В. Г., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа вычисления индикаторных матриц для временных рядов матричных наблюдений мюонного годоскопа / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664551 от 13 ноября 2020 г.
6. Гетманов В. Г., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа вычисления модельных временных рядов матричных наблюдений мюонного годоскопа / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664477 от 13 ноября 2020 г.
7. Гетманов В. Г., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа вычисления оценок доверительных интервалов для математических ожиданий и функций аномальностей для временных рядов случайных пуассоновских чисел / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664599 от 16 ноября 2020 г.
8. Гетманов В. Г., Добровольский М. Н., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа нелинейной пространственно-временной фильтрации индикаторных матриц временных рядов наблюдений мюонного годоскопа / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664478 от 13 ноября 2020 г.
9. Гетманов В. Г., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа двумерной фильтрации на основе локальных кусочно-параболических аппроксимационных моделей со взвешенным усреднением / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664414 от 12 ноября 2020 г.
10. Гетманов В. Г., Сидоров Р. В., Чинкин В. Е. Программа одномерной фильтрации на основе локальных кусочно-параболических аппроксимационных моделей и взвешенного усреднения / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664364 от 12 ноября 2020 г.
11. Гетманов В. Г., Чинкин В. Е. Программа расчета вариаций интенсивностей мюонных потоков годоскопа «Ураган» на основе функций нормированных вариаций / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664667 от 16 ноября 2020 г.



12. Добровольский М. Н. Программа конвертации файлов SuperMAG / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664668 от 16 ноября 2020 г.
13. Колесников И. Ю., Татаринев В. Н., Татарина Т. А. Программа расчета напряженно-деформированного состояния в изгибаемом пластинчатом слое геологической среды методом выборочно-сокращенного интегрирования «FE\_GEOPLATE-W.SR-01» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664550 от 13 ноября 2020 г.
14. Кудин Д. В., Груднев А. А. Программа для предварительной обработки и загрузки данных телеметрии в БД МАГНУС / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666630 от 44176 г.
15. Кудин Д. В., Груднев А. А. Программа для сбора и временной привязки данных в реальном времени / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666629 от 44176 г.
16. Кудин Д. В., Сидоров Р. В. Веб-сервис расчета абсолютных измерений геомагнитных обсерваторий / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664365 от 12 ноября 2020 г.
17. Нечитайленко В. А., Кедров Э. О. MILES-2 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664574 от 16 ноября 2020 г.
18. Перегудов Д. В. Программа расчёта резонансных частот и добротностей мод прямоугольного резонатора с прямоугольным волноводом / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664367 от 12 ноября 2020 г.
19. Рыбкина А. И., Пресняков С. В., Самохина О. О., Краснощёков Р. И. GCRASpublications / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664818 от 18 ноября 2020 г.
20. Чинкин В. Е., Гетманов В. Г. Программа синтеза низкочастотного цифрового квазигауссовского КИХ-фильтра с положительными коэффициентами / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664366 от 12 ноября 2020 г.

### **Базы данных**

21. Лосев И. В., Гвишиани А. Д., Татаринев В. Н., Маневич А. И. База данных по геодинамике Нижнеканского массива (Geodynamic DataBase) / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622380 от 23 ноября 2020 г.
22. Пилипенко В. А., Лукьянова Р. Ю., Богоутдинов Ш. Р. База данных по продольным токам, полученная по данным SWARM и центра космических данных NASA / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622288 от 16 ноября 2020 г.
23. Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Нисилевич М. В., Кудин Д. В., Хафизов А. С. Геомагнетизм – значения индекса К геомагнитной активности / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622252 от 12 ноября 2020 г.