

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

—

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

—

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук

О Т Ч Е Т

о деятельности Геофизического центра РАН за 2021 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 2021
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 2021. 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 2021.

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 31.08.2022

Layout Production:

E. O. Kedrov

<https://doi.org/10.2205/2022BS056>

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2022), Report of Geophysical Center RAS for 2021. Results of Scientific Research and International Projects, Geoinf. Res. Papers, Vol. 10, No. 1, BS1001, <https://doi.org/10.2205/2022BS056>

M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 2022, 181 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2022 Geophysical Center RAS



В настоящем издании содержатся сведения о научной деятельности Геофизического центра Российской академии наук в 2021 году. 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 2021 году.

Ответственные редакторы:

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

Р. И. Краснощёров, учёный секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

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

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Утверждено к печати 31.08.2022 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

<https://doi.org/10.2205/2022BS056>

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснощёров (ред.) (2022) Отчет о деятельности Геофизического центра РАН за 2021 год. Результаты научных исследований и международных проектов. М.: Исследования по геоинформатике, т. 10, №1 (BS1001), <https://doi.org/10.2205/2022BS056>

М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 2022, 181 с.

ISSN 2308-5983

© ГЦ РАН, 2022

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.....	21
3 Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства.....	37
4 Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных.....	53
5 Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений	84
6 Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа.....	98
7 Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов.....	104
8 Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса.....	113
9 Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта	122
10 Исследование и совместная валидация информационных продуктов дистанционного зондирования Земли из разных источников для обмена информацией в странах БРИКС	134
11 Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности	147
12 Системный анализ особенностей характера распространения COVID-19 для стран Европы и регионов России опасности	154
13 Международная деятельность ГЦ РАН в 2021 году	160
14 Деятельность Национального геофизического комитета РАН	164
Список основных научных публикаций за 2021 год	168
Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН.....	179



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 2021 года. была сосредоточена на выполнении государственного задания № 075-00684-21-00, утвержденного 24 декабря 2020 года с дополнениями от 10 декабря 2021 года.

Исследования проводились в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы).
Направление науки: 1.5. Науки о Земле.

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

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

Системный №	FMGN-2019-0001
РН НИОКТР №	122012500332-9
Структурное подразделение:	Лаборатория геодинамики
Руководитель:	д.т.н. В. Н. Татаринов
- 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 №	FMGN-2019-0003
РН НИОКТР №	122012500331-2
Структурное подразделение:	Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований
Руководитель:	чл.-корр. РАН А. А. Соловьев
- 3 Тема НИР: «Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных»

Системный №	FMGN-2019-0004
РН НИОКТР №	122012500333-6
Структурное подразделение:	Лаборатория геофизических данных; Лаборатория электронных публикаций; Лаборатория инновационных проектов
Руководитель:	д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобов



- 4 Тема НИР: «Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений»
- Системный № FMWG-2019-0006
- РН НИОКТР № 122012500330-5
- Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Лаборатория геодинамики
- Руководитель: к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров

1.2 Проекты научных фондов

В 2021 году в ГЦ РАН выполнялись исследования по 3 грантам РФФИ и 4 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 РАН В. Г. Бондур
- 2 Грант РФФИ № 20-35-70054: «Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности»
- РН НИОКТР № АААА-А20-120012090122-8
- Руководитель: д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев
- 3 Грант РФФИ № 20-35-70054_ИИАСА: «Системный анализ особенностей характера распространения COVID-19 для стран Европы и регионов России»
- РН НИОКТР № 121032900088-0
- Руководитель: к.г.-м.н. А. И. Рыбкина
- 4 Грант РНФ № 17-17-01215-П: «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа»
- РН НИОКТР № 122052300076-0
- Руководитель: чл.-корр. РАН А. А. Соловьев
- <https://rscf.ru/project/17-17-01215/>
- 5 Грант РНФ № 18-17-00241-П: «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»
- РН НИОКТР № 122052300071-5
- Руководитель: академик А. Д. Гвишиани
- <https://rscf.ru/project/18-17-00241/>



- 6 Грант РФФИ № 19-77-10075: «Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса»
РН НИОКТР № АААА-А19-119082190032-6
Руководитель: к.г.-м.н. А. И. Рыбкина
<https://rscf.ru/project/19-77-10075/>
- 7 Грант РФФИ № 21-77-30010: «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»
РН НИОКТР № 121041200191-6
Руководитель: д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко
<https://rscf.ru/project/21-77-30010/>

1.3 Важнейшие результаты фундаментальных научных исследований

Модель механизма формирования разрыва на примере землетрясения

Хансин-Авадзи 17.01.1995 М 6,9 (Япония)

Д.т.н. В. Н. Морозов, А. И. Маневич

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

На основе рассчитанных данных напряженно-деформированного состояния разработана новая модель формирования сейсмотектонического разрыва на примере сильного землетрясения Хансин-Авадзи (Япония). Показано, что зарождение разрыва происходит в области аномально высокой интенсивности напряжений и отношения главных напряжений. Установлено, что разрыв распространяется в направлении максимального градиента интенсивности напряжений. Результаты моделирования согласуются с сейсмологическими данными косейсмических смещений при распространении разрыва. Разработанная модель дает новые возможности в прогнозе места и магнитуды сильных коровых землетрясений. Она также позволит планировать геофизические исследования в зонах наиболее вероятного зарождения разрыва (рис. 1.1).

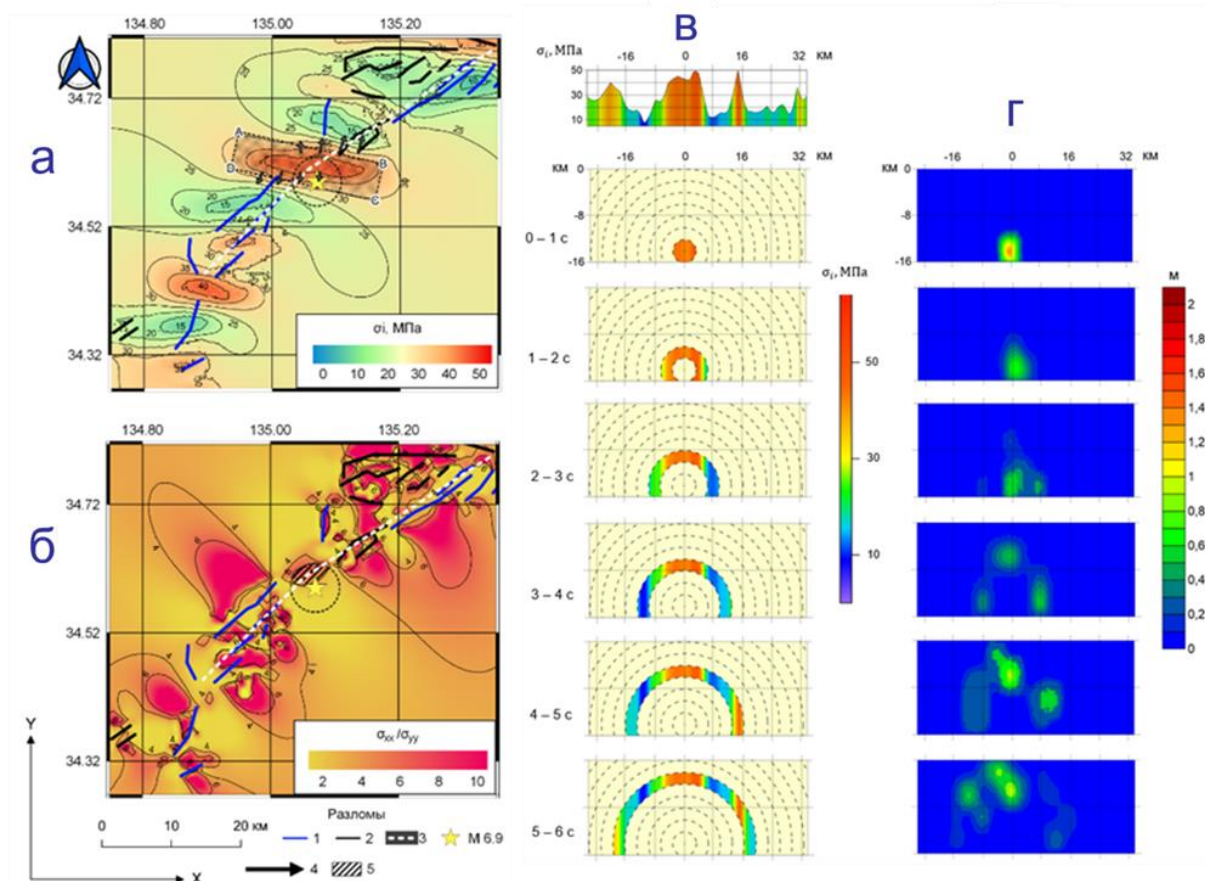


Рисунок 1.1 – а) Интенсивность напряжений. б) Отношение главных напряжений. в) Распространение интенсивности напряжений в плоскости разрыва. г) Распространения смещений в интервале 0–6 секунд от начала землетрясения по сейсмологическим данным

Морозов В. Н., Маневич А. И. Механизм формирования разрыва землетрясения Хансин-Авадзи (г. Кобе, Япония) 17.01.1995 М 6,9 // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. №2. С. 151–158. DOI: 10.31857/S2686739721080089

Модифицированная феноменологическая модель коронального выброса массы, удовлетворяющая всем уравнениям Максвелла

Чл.-корр. РАН А. А. Соловьев, к.ф.-м.н. Д. В. Перегудов

(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»)

Наиболее реалистичной феноменологической моделью магнитного поля коронального выброса массы (КВМ) является модель 3DCORE. Она описывает КВМ в форме конического тора и использует неортогональные эйлеровы координаты для его

представления (рис. 1.2). Обнаружено, что магнитное поле 3DCORE нарушает оба уравнения Максвелла: закон Гаусса для магнитного поля (отсутствие магнитных монополей) и закон электромагнитной индукции Фарадея для вмороженного в плазму поля. Вместе с тем, необходимо учитывать ограничения, накладываемые МГД-уравнениями, при разработке феноменологической модели КВМ. Показано, что это достижимо, если использовать лагранжево представление движения плазмы и вмороженного в нее магнитного поля. Предложена модификация модели магнитного поля Земли 3DCORE. Полученный результат дает возможность использовать такое магнитное поле в истинно трехмерном смысле для расчета рассеяния космических лучей от КВМ с целью отслеживания КВМ за пределами солнечной короны, при моделировании магнитного потока в солнечной конвективной зоне и др.

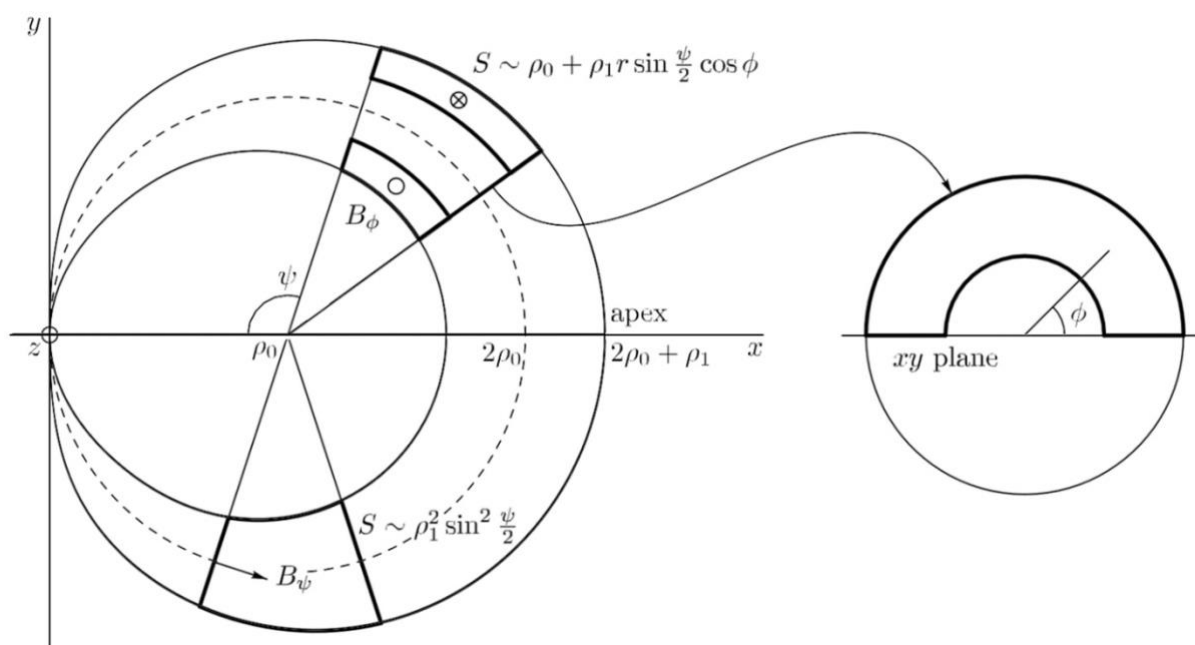


Рисунок 1.2 – Геометрия КВМ в виде конического тора, ось тора показана пунктирной линией. Слева – проекция на плоскость xy , справа – поперечное сечение $\psi = \text{const}$. Жирным выделены поверхности для расчета магнитных потоков. Показаны направления магнитного поля B и площади ортогональных сечений.

Перегудов Д. В., Соловьев А. А. и др. Моделирование анизотропии галактических космических лучей // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 1. С. 36–42. DOI: 10.12737/szf-61202003

Peregoudov D. V. On the construction of phenomenological coronal mass ejection models // Space Weather. 2021. Vol. 19. No. 3. PP. 1–9. DOI: 10.1029/2020SW002659

К-индекс: исторические данные советских магнитных обсерваторий, 1957–1992 годов

К.ф.-м.н. Н. А. Сергеева, акад. РАН А. Д. Гвишиани, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев, Л. П. Забаринская, к.г.-м.н. Т. А. Крылова, М. В. Нислевич, к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов

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

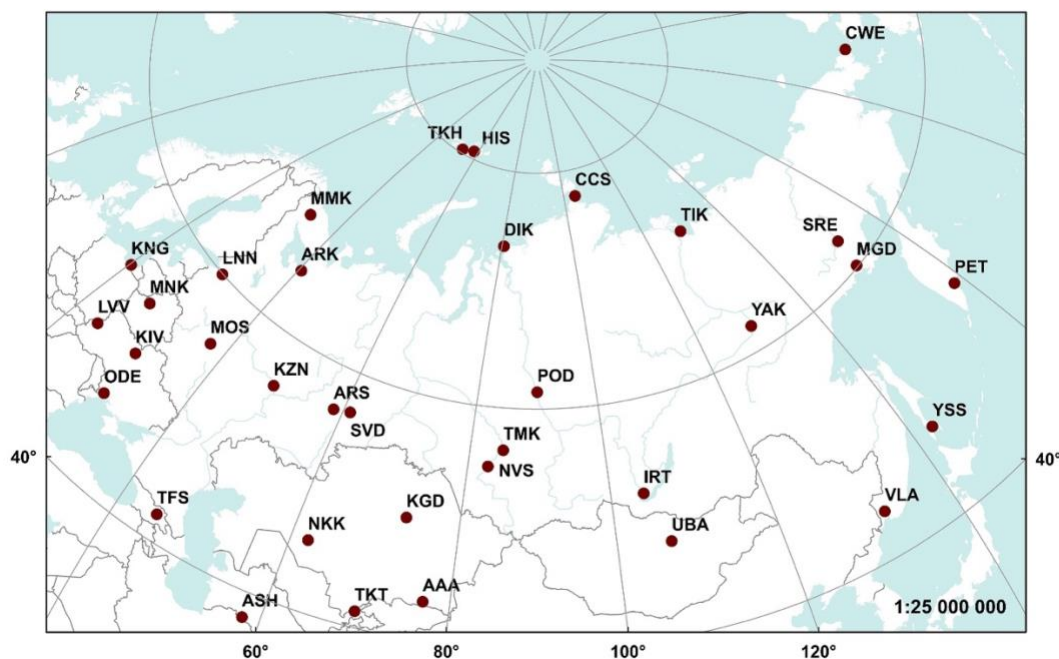


Рисунок 1.3 – Карта советских обсерваторий (северное полушарие), по данным которых сформирована база по К-индексу

К-индекс – один из старейших стандартизированных и широко используемых индексов геомагнитной активности, введенный Юлиусом Бартельсом в 1938 году. До настоящего времени в хранилищах данных по всему миру накоплены многолетние временные ряды однородных записей К-индекса. Практика его применения делает К-индекс незаменимым источником информации для ретроспективного анализа солнечно-земного взаимодействия на протяжении почти восьми солнечных циклов. При изучении исторических данных о магнитном поле Земли стандартизированные таблицы К-индекса в некоторых случаях гораздо проще для автоматизированного анализа, чем традиционные аналоговые магнитограммы. Мировым центром данных по солнечно-земной физике (ГЦ РАН) сформирована уникальная база данных с результатами определения К-индекса на 41 геомагнитной обсерватории бывшего СССР (рис. 1.3) за период с июля 1957 года по



начало 1990-х годов. Эти исторические данные могут быть использованы для ретроспективного изучения геомагнитных событий, исследования их корреляций с параметрами космической погоды и прогноза экстремальных явлений в магнитосфере Земли.

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 // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. No. 5. P. 1987–1999. DOI: 10.5194/essd-13-1987-2021.

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. DOI: 10.1594/PANGAEA.922233

Развертывание пункта высокоточных ГНСС-измерений на территории геофизической обсерватории «Климовская»

Д.т.н. В. И. Кафтан, д.т.н. В. Н. Татаринов, к.т.н. Д. В. Кудин, А. А. Груднев, И. А. Лосев, А. И. Маневич, Р. В. Шевчук, к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов, В. В. Кабров (Тема НИР «Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений»)

Введен в эксплуатацию новый пункт ГНСС-измерений на геофизической обсерватории «Климовская» (Коношский район Архангельской области) (рис. 1.4). Новый комплект оборудования обеспечивает прием практически всех существующих навигационных сигналов и частот – GPS (США); ГЛОНАСС (РФ); Galileo (ЕС); Beidou (КНР) с частотой до 20 Гц. Также оборудование имеет интерактивный веб-интерфейс для удаленного доступа. В настоящий момент оборудование осуществляет запись и сохраняет на FTP-сервер ГЦ РАН два потока данных с дискретностью 30 с и 1 с. Развитие новых пунктов высокоточных ГНСС-наблюдений позволит получить данные для геодезических, геодинамических, ионосферных и других исследований, а также для задач навигации и еще целого ряда технических приложений.



Рисунок 1.4 – Пункт ГНСС-наблюдений геофизической обсерватории «Климовская»

1.4 Защита диссертаций. Аспирантура. Академические достижения сотрудников. Премии

20 мая в ИФЗ РАН состоялась защита диссертации Б. А. Дзедоева «Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Научный консультант – академик РАН А. Д. Гвишиани.

М.н.с. В. Е. Чинкин поступил в аспирантуру ИФЗ РАН. Научным руководителем его работы является г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов.

25 августа на церемонии награждения Международной ассоциации геомагнетизма и аэрномии (IAGA) в.н.с. лаборатории геофизических данных, директору Мирового центра данных по солнечно-земной физике к.ф.-м.н. Н. А. Сергеевой была вручена «Медаль IAGA за многолетнюю работу» (IAGA Long Service Award) (рис. 1.5). Церемония проводилась в удаленном режиме.



Рисунок 1.5 – Медаль Международной ассоциации геомагнетизма и аэронамии (IAGA) за многолетнюю работу вручена к.ф.-м.н. Н. А. Сергеевой

Ведущему научному сотруднику лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований д.ф.-м.н. С. А. Лебедеву и коллективу авторов монографии «Окружающая среда Республики Адыгея» Главой Республики Адыгея М. К. Кумпиловым вручена Государственная премия Республики Адыгея в области науки (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Глава Республики Адыгея М. К. Кумпилов и д.ф.-м.н. С. А. Лебедев на церемонии вручения Государственной премии Республики Адыгея в области науки



В 2021 году сотрудники ГЦ РАН были удостоены высоких ведомственных наград Минобрнауки России. Научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани был удостоен награды «Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации» (рис. 1.7). Директору ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьеву и заведующему лабораторией геодинамики д.т.н. В. Н. Татаринovu были вручены медали «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития» (рис. 1.8). Заместителю директора по развитию к.г.-м.н. А. И. Рыбкиной была вручена медаль «За безупречный труд и отличие» III степени (рис. 1.9).



Рисунок 1.7 – Директор ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев поздравляет академика РАН А. Д. Гвишиани с вручением награды Минобрнауки России «Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации»



Рисунок 1.8 – Директору ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьеву и заведующему лабораторией геодинамики д.т.н. В. Н. Татаринovu вручены медали Минобрнауки России «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития»



Рисунок 1.9 – Заместителю директора по развитию к.г.-м.н. А. И. Рыбкиной вручена медаль Минобрнауки России «За безупречный труд и отличие» III степени

1.5 Договорная деятельность

В 2021 году договорная деятельность ГЦ РАН включала выполнение обязательств по 7 договорам.

- 1 2 договора на оказание услуг.

Предмет: Консультационные услуги по сопровождению развертывания геомагнитной обсерватории в пос. Сабетга.

Заказчик: Технологическая компания «Шлюмберже».

- 2 2 договора на выполнение НИР.

Предмет: Проведение исследований геодинамических режимов и разработка предложений (программы работ) по сейсмическому и геодинамическому изучению условий размещения пункта глубинного захоронения РАО.

Заказчик: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.

- 3 Договор на выполнение НИР.

Предмет: Изучение возможного влияния космической погоды на надежность функционирования транспортных и энергетических систем на высоких широтах.

Заказчик: АО «НИИАС».



4 Договор на ОКР.

Предмет: Разработка аппаратно-программного комплекса со сферическим демонстрационным экраном для визуализации геопространственных данных с диаметром экрана один метр.

Заказчик: Санкт-Петербургский горный университет.

5 Договор на выполнение НИР.

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

Заказчик: АО «ЦНИИмаш».

1.6 Экспедиции и полевые работы

В 2021 году сотрудники ГЦ РАН приняли участие в целом ряде экспедиций и выезжали на научные полевые работы. Среди прочих следует выделить:

- Магнитная обсерватория «Михнево», Московская обл. (май, август, октябрь).

Участники: Нисилевич М. В., Ощенко А. А., Петрухненко К. К., к.ф.-м.н. Сидоров Р. В., Уваров Д. Н.

Задачи: Магнитные исследования обсерваторских павильонов.

- Село Удабно, Грузия (июнь, октябрь).

Участники: Одинцова А. А., к.г.-м.н. Рыбкина А. И.

Задачи: Геологическая экспедиция по исследованию процессов осадконакопления Восточного и Центрального Паратетиса.

- Нижнеканский геодинамический полигон, Красноярский край (июнь–июль, август).

Участники: Забродин С. М., Маневич А. И., Шевчук Р. В.

Задачи: Проведение геодезических и геодинамических изысканий.

- Магнитная обсерватория «Климовская», Архангельская обл. (июль, август, сентябрь).

Участники: Груднев А. А., Красноперов Р. И., Кудин Д. В., Маневич А. И., Пасишниченко М. А., Сидоров Р. В., Соловьев А. А., Соловьева Е. Н.

Задачи: Технические и ремонтные работы. Обновление сетевой и силовой инфраструктуры. Установка нового ГНСС-приемника. Установка метеостанции и камеры.



- Таманский п-ов, Краснодарский край (август–сентябрь).
Участники: Кудашин А. С., Одинцова А. А., Пилипенко О. В., Ростовцева Ю. В., Сальная Н. В., Уваров Д. Н.
Задачи: Геологическая экспедиция по исследованию процессов осадконакопления Восточного и Центрального Паратетиса.
- Научная станция «Снежинка», Ямало-Ненецкий АО (октябрь)
Участники: Нисилевич М. В., Сидоров Р. В., Шевчук Р. В.
Задачи: Исследование перспективных мест строительства обсерваторских павильонов.
- Научная база «Александровка» (МГУ им. М. В. Ломоносова), Калужская обл. (октябрь)
Участники: Пасишниченко М. А., Сидоров Р. В., Соловьев А. А.
Задачи: Изучение геомагнитной инфраструктуры научной базы.

1.7 Популяризация науки

С 20 по 21 сентября 2021 года на базе Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова (САФУ) в городе Архангельске прошла I Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (<https://school2021.gcras.ru/>). В школе приняли участие 37 слушателей – студентов, аспирантов и молодых ученых в возрасте до 35 лет включительно (рис. 1.10). В рамках программы школы слушателям были представлены лекции ведущих российских ученых, членов Российской академии наук, учёных САФУ и специалистов в области сейсмологии, геомагнетизма и аэрономии, геофизики, климатологии, гидрологии и океанологии, дистанционного зондирования, геоинформатики, системного анализа, экологии и других смежных дисциплин.

Школа была организована при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 21-77-30010 «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы».



Рисунок 1.10 – Лекторы и слушатели I Всероссийской школы молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике»

Ряд федеральных и региональных изданий опубликовали новостные материалы об этом событии: Научно-информационный портал «Поиск» (<https://poisknews.ru/geofizika/nasiyayushhih-prostorah-budushhim-issledo/>); Вестник ОНЗ РАН (<https://onznews.wdcb.ru/oct21/zavershilas-vserossijskaya-shkola-molodykh-uchjonykh-sistemnyj-analiz-dinamiki-prirodnikh-protsessov-v-rossijskoj-arktike.html>); BezFormata.Com – «Новости Архангельска и Архангельской области» (<https://arhangelsk.bezformata.com/listnews/prirodnih-protcessov-v-rossiyskoj-arktike/97750614/>); «Северная Двина online» (<https://sevdvina.online/2021/09/20/v-cafy-issledovateli-obсуждают-динам/>); «Архангельская область online» (<https://arhangel.online/news/news-36044>); Научно-образовательная площадка «Арктик-фонд» (<https://arctic.narfu.ru/main/news/1890-v-safu-nachala-svoyu-rabotu-shkola-sistemnyj-analiz-dinamiki-prirodnikh-protsessov-v-rossijskoj-arktike>).

В 2021 году сотрудники ГЦ РАН также вели активную работу в сфере популяризации и широкого распространения научного знания в СМИ.

- На телеканале «Россия 1. Новосибирск» вышел сюжет о развитии Научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» (дельта р. Лены, Якутия) (<https://youtu.be/18PKpQIYgms>).
- Д.ф.-м.н. Б. А. Дзобоев дал интервью телеканалу «Москва-24», посвященному 10-й годовщине катастрофы на японской АЭС «Фукусима», вызванной землетрясением Тохоку, произошедшим 11 марта 2011 года (<https://youtu.be/sSzW1VxvG5Y?t=218>).



- Д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко дал интервью научно-информационному portalу «Поиск»: «В авроральном режиме. Как уберечь технику в Арктике» (<https://poisknews.ru/news/v-avroralnom-rezhime/>).
- Научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А. Д. Гвишиани дал интервью на аналитической программе Вольного экономического общества России «Дом Э» (https://www.youtube.com/watch?v=aZ_IVx0LLFA&t=1444s).
- Д.ф.-м.н. Б. А. Дзэбоев дал интервью югоосетинскому информационному portalу Sputnik (<https://sputnik-ossetia.ru/20210601/Molodoy-osetinskiy-uchenny-Boris-Dzeboev-nauchnaya-rabota--etotvorcheskiy-protsess-12304838.html>) и республиканскому новостному изданию «Северная Осетия» (<http://sevosetia.ru/Article/Index/462035>). В интервью Б. А. Дзэбоев рассказал о своей научной работе в ГЦ РАН.
- В октябре состоялась совместная научная экспедиция ГЦ РАН, МФТИ и Российского центра освоения Арктики «РЦОА» (Российский центр освоения Арктики) в Ямало-Ненецкий АО на месте строительства будущей научной станции «Снежинка». Информация об экспедиции была опубликована Вестником ОНЗ РАН (<https://onznews.wdcb.ru/oct21/zavershilas-sovmestnaya-magnitometriceskaya-ekspeditsiya-gts-ran-mfti-i-np-rtsoa-na-sever-priuralskogo-rajona.html>); Институтом арктических технологий МФТИ (<https://www.arctic-mipt.com/tpost/boc1yxsf1-magnitnaya-syomka-na-territorii-mas-snez>); изданием «Север-Пресс» (<https://severpress.ru/2021/10/19/v-arkticheskoy-stancii-snezhinka-oborudujut-geomagnitnuju-observatoriju/>) и изданием «Комсомольская правда» (<https://www.kp.ru/online/news/4483232/>).
- 8 октября 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 в ИСГЗ: FMGN-2019-0001

Номер госрегистрации: АААА-А19-122012500332-9

Руководитель: 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

Цель работы – фундаментальные исследования, направленные на создание новых геоинформационных методов мониторинга и прогнозирования устойчивости геологической среды для выявления природных и техногенных угроз объектам использования атомной энергии, включая захоронение высокоактивных радиоактивных отходов. В 2021 году исследования были направлены на решение задач, являющихся заголовками приведенных ниже разделов.

2.1 Сравнение точности ГНСС-мониторинга в наблюдательных сетях с разным составом измерений при определении современных движений и деформаций земной поверхности в зонах активных тектонических нарушений и сейсмически опасных зонах

Использование глобальных и региональных систем отсчета при ГНСС-наблюдениях *нерационально для изучения целого ряда локальных геодинамических процессов*, таких как скольжение бортов сейсмогенерирующих разломов, движения и деформации земной поверхности в районах вулканической активности, на подрабатываемых территориях месторождений полезных ископаемых, в местах захоронения радиоактивных отходов и др. В тоже время при создании локальных сетей ввиду ряда причин (зелесенность, отсутствие дорог, рельеф и др.) обеспечить оптимальную конфигурацию сети не всегда удается. Поэтому было исследовано влияние конфигурации сети на точность определения движений и деформаций при ГНСС-наблюдениях на локальных полигонах [*Кафтан, 2021; Кафтан и др., 2021, Кафтан и Татаринов, 2021*].

Для оценки вклада длинных базовых линий в точность определения смещений была создана тестовая локальная сеть ГНСС-наблюдений (рис. 2.1). Характеристики тестовой сети представлены в табл. 2.1. Порядок обработки ГНСС измерений заключался в следующем. На первом этапе по суточным сеансам ГНСС измерений в режиме «статика» методом двойных фазовых разностей определялись точные значения векторов базовых линий. Из каждого суточного решения формировались два варианта набора векторов:

полный и сокращенный. Непрерывные измерения выполнялись 196 суток.

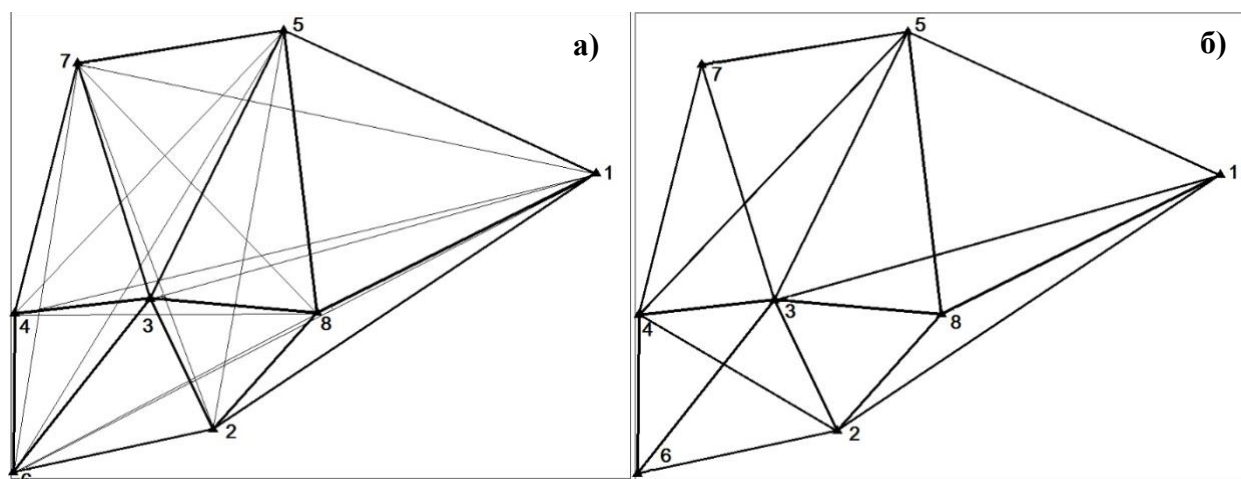


Рисунок 2.1 – Конфигурация наблюдательной сети. а) Полная сеть. б) Сокращенная оптимизированная сеть. Черные треугольники – ГНСС станции. Черные линии – измененные базовые линии

Таблица 2.1 – Характеристики вариантов наблюдательной сети

Характеристики сетей	Длины базовых линий (м)			Число линий	Число избыточных измерений	СКО единицы веса μ (мм)
	min	max	Средняя			
Полная (вариант 1)	326	2118	981	28	60	1.10
Сокращенная (вариант 2)	326	1587	782	18	30	0.75

На втором этапе выполнялось уравнивание $i-1$ разностей пространственных 3D векторов базовых линий, полученных вычитанием из векторов текущей эпохи измерений i векторов начальной эпохи. Особенностью обработки являлось то, что сеть уравнивалась как свободная от ошибок исходных данных без внешних опорных пунктов с использованием главной псевдообратной матрицы нормальных уравнений по методу получения локальной «внутренней» системы отсчета.

В результате уравнивания по методу наименьших квадратов полной (вариант 1) и сокращенной (вариант 2) сети были получены векторы смещений от начальной эпохи до текущей dx и вычислены оценки дисперсии разности наблюдений с единичным весом μ^2 . Средние значения стандартов единицы веса μ для каждого из вариантов представлены в последнем столбце табл. 2.1.

Сравнению были подвергнуты обобщенные оценки точности изменения горизонтальных смещений и эффективности их определения на уровне ошибок измерений. Средние квадратические ошибки единицы веса измерения получали по формуле:

$$\mu^2 = \frac{v^T Q_l^+ v}{n-m}, \quad (1)$$

где v – поправки в измеренные разности компонент векторов базовых линий, Q_l – обратная весовая матрица измерений, n – общее число измерений, m – число избыточных измерений.

Эффективность определения деформаций оценивали с помощью дисперсионного отношения:

$$F = \frac{dx^T N dx}{v^T P v}, \quad (2)$$

где dx – вектор определяемых смещений пунктов ГНСС, N – матрица коэффициентов нормальных уравнений, P – весовая матрица.

Результаты *сравнения двух вариантов обработки* представлены на рис. 2.2.

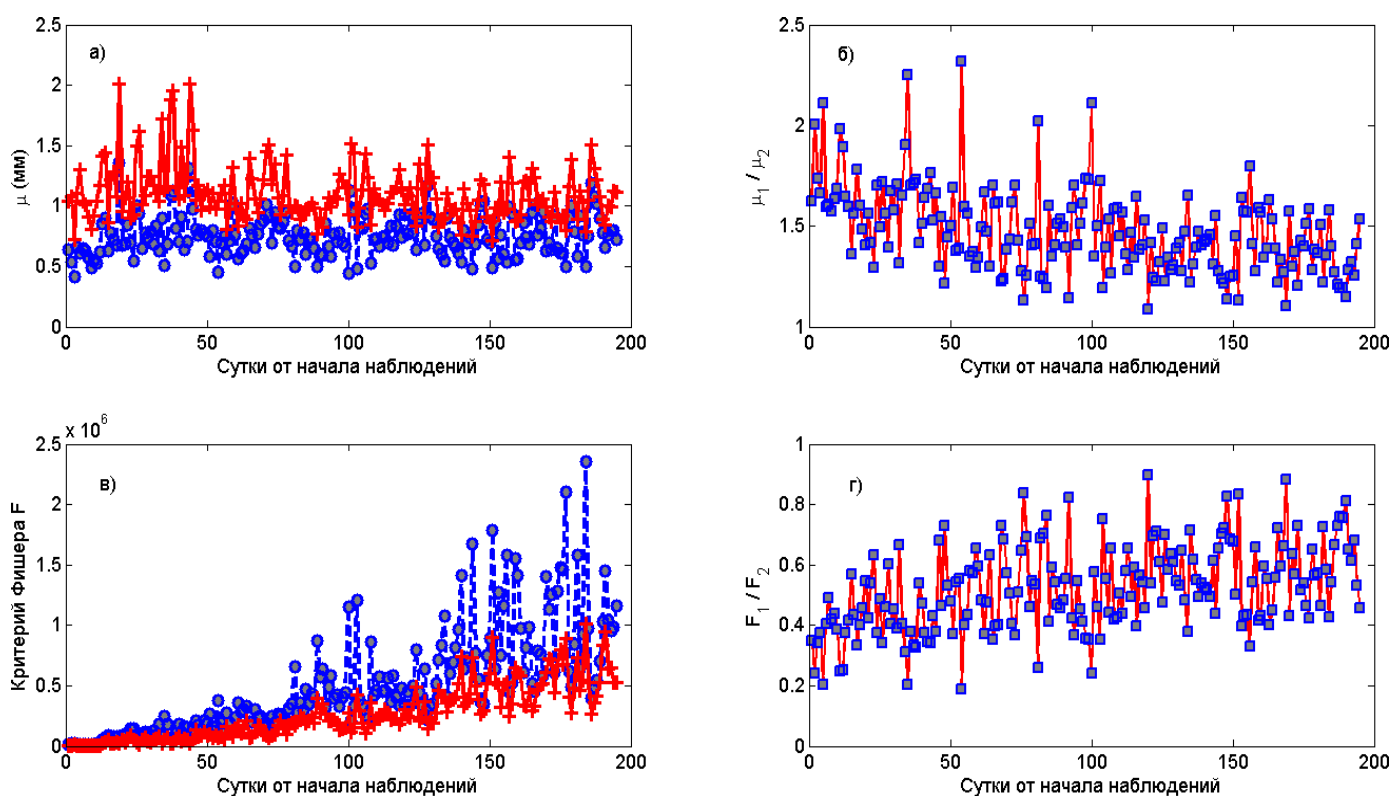


Рисунок 2.2 – Результаты сравнения оценок точности обработки локальной сети в полном и сокращенном вариантах. а) Сравнение стандартных ошибок единицы веса полной (красный цвет) и сокращенной (синий цвет) сетей. б) Отношение стандартной ошибки единицы веса μ_1 к μ_2 . в) Значения статистик Фишера полной сети (красный цвет) и сокращенной (синий цвет). г) Отношения статистик Фишера F_1 к F_2

Из них следует, что все стандартные ошибки единицы веса для полной сети всегда превышают соответствующие оценки для сокращенной сети. Значения μ_1 превышают значения μ_2 от 1,1 до 2,3 раз (рис. 2.2 б). Значения критерия Фишера в случае полной сети всегда ниже таковых для сокращенной сети (рис. 2.2 в, г).



Разработанные методики полевых ГНСС-наблюдений, обработки и интерпретации ГНСС-данных проходили практическое опробование на геодинамическом полигоне, созданном в северной части Нижнеканского массива. Программа исследований в районе строящейся подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) включает использование спутниковой геодезической сети для изучения деформационных процессов и прогноза длительной устойчивости геологической среды. В этой связи в 2022 году предусмотрена модернизация геодинамического полигона (ГДП), в связи с чем был выполнен анализ опыта наблюдений на локальных геодинамических полигонах в районах расположения ряда зарубежных ПИЛ [Татаринов и др., 2021]. Результаты анализа организации локальных ГНСС-сетей на зарубежных ПИЛ были использованы при составлении «Программы работ по исследованию геодинамических условий района строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Нижнеканском массиве», подготовленной в рамках выполнения ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года», ч. 2.1 «Строительство объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов (пункта глубинного захоронения РАО) 1-го и 2-го классов (Красноярский край, Нижнеканский массив)» совместно с ИБРАЭ РАН [Кишкина и др., 2021].

Из схемы на рис. 2.3 видно, что существовавшая в 2020 году ГНСС-сеть не охватывала южную часть района по отношению к ПИЛ. Цифрами на рис. 2.3 обозначены 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. Участок «Енисейский» и место строительства ПИЛ показаны красным контуром. При изучении геодинамического режима района крайне важно, чтобы исследуемый объект находился внутри геодезической сети. В этой связи было рекомендовано увеличение количества геодезических пунктов для ГНСС-мониторинга в южной части района. В результате полевых работ в 2019–2020 годах, финансируемых из других источников, но на основе единой методической базы, разработанной в рамках выполнения Госзадания в ГЦ РАН, была проведена рекогносцировка новых мест возможного размещения пунктов. В результате было выбрано 8 новых перспективных мест для установки новых ГНСС-пунктов [Маневич и др., 2021].

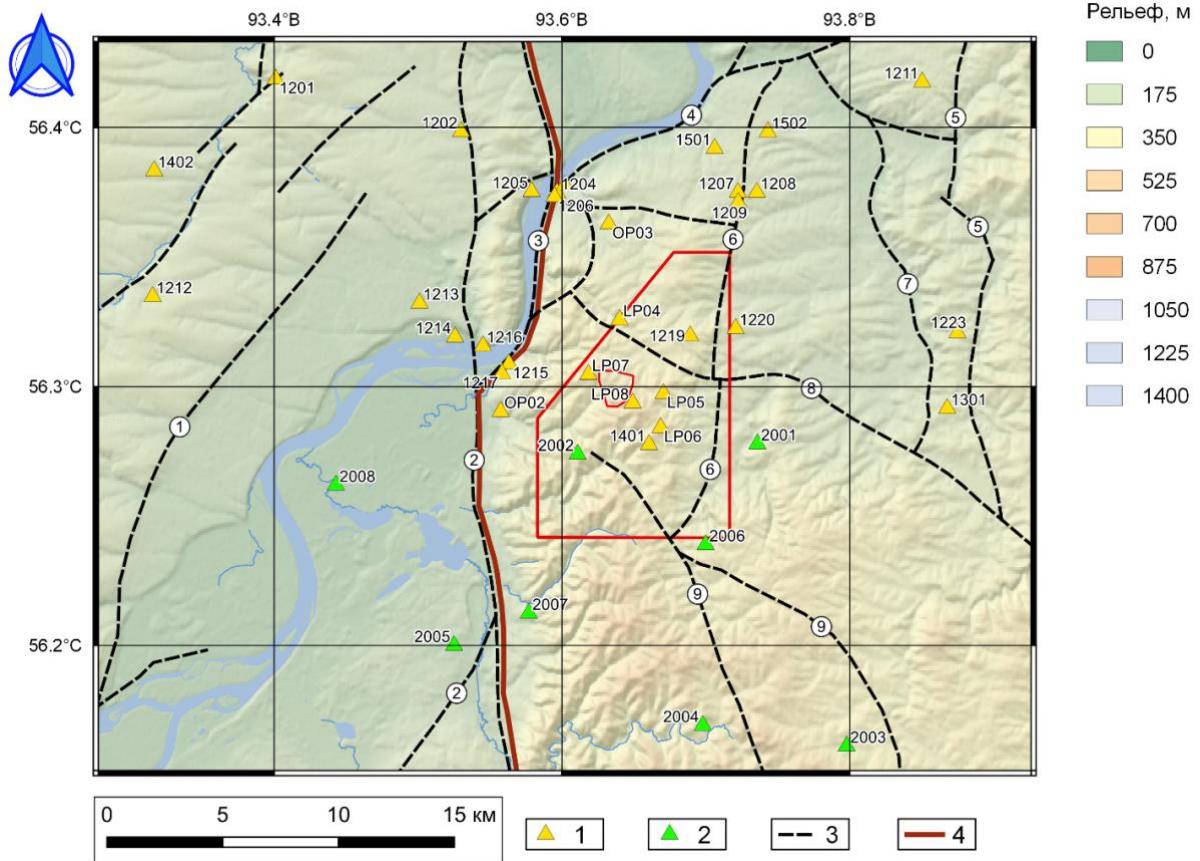


Рисунок 2.3 – Структурно-тектоническая схема и пункты ГНСС измерений геодинамического полигона Нижнеканского массива. 1 – действующие геодезические пункты; 2 – планируемые для строительства геодезические пункты; 3 – основные тектонические разломы; 4 – граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты

Конфигурация сети ГНСС наблюдений имеет большое значение для обеспечения высокой точности определения деформации земной поверхности, особенно на локальных полигонах. Наилучшим подходом к формированию конфигурации сети является триангуляция Делоне. Триангуляция Делоне максимизирует минимальный угол среди всех углов всех построенных треугольников, тем самым избегаются «тонкие» треугольники, также максимизирует сумму радиусов вписанных окружностей. На плоскости она обладает минимальной суммой радиусов окружностей, описанных около треугольников, среди всех возможных триангуляций. Для ГНСС-сети в районе ПИЛ была реализована процедура построения триангуляции Делоне. Для этой задачи были использованы значения геодезических координат пунктов, преобразованные на плоскость в универсальной проекции Меркатора UTM. Далее для каждого треугольника был вычислен критерий отношения радиуса описанной окружности к вписанной R/r [Татаринов и др., 2021; Шакиров и др., 2021], визуализация результатов представлена на рис. 2.4.

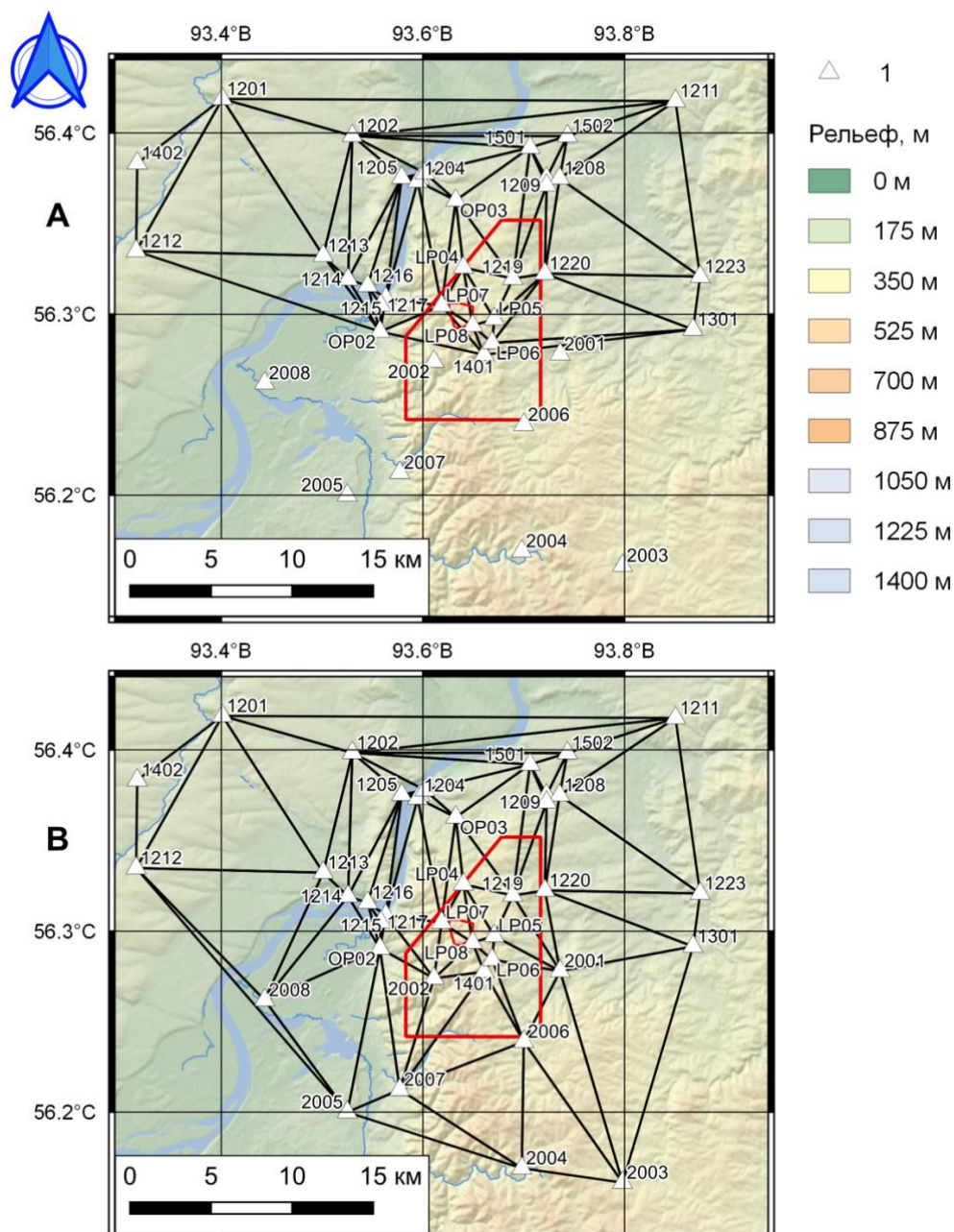


Рисунок 2.4 – Триангуляция Делоне сети Нижнеканского ГДП. А – действующая геодезическая сеть; В – расширенная геодезическая сеть; 1 – ГНСС пункты

2.2 Исследование развития тектонического процесса в зонах активного орогенеза, построение моделей напряженно-деформированного состояния в эпицентральных зонах коровых землетрясений

На рис. 2.5 представлены результаты расчета интенсивности тектонических напряжений σ_i и отношения главных напряжений σ_{xx}/σ_{yy} в эпицентральной зоне землетрясения Хансин-Авадзи в 17.01.1995 году с М 6,9 [Морозов и Маневич, 2021].

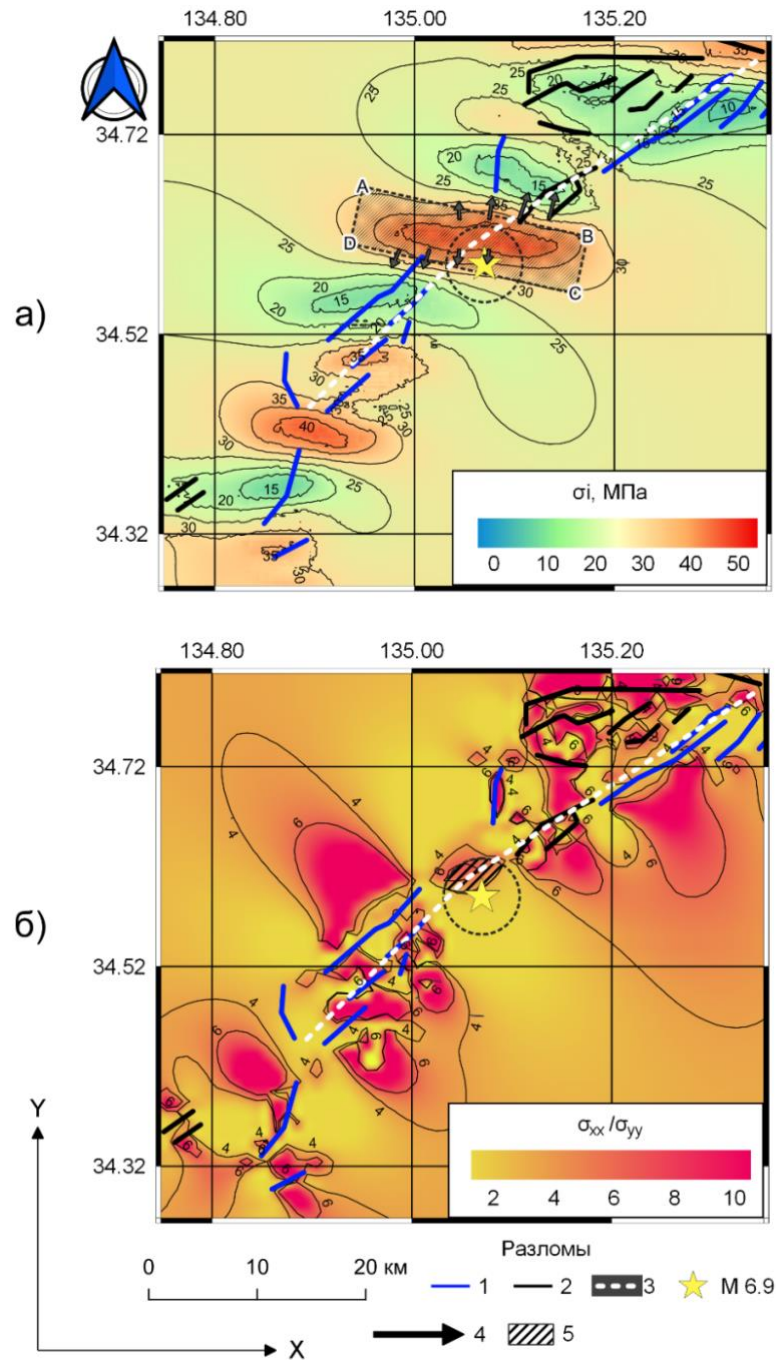


Рисунок 2.5 – Напряженно-деформированное состояние эпицентральной зоны землетрясения Хансин-Авадзи. а – интенсивность напряжений; б – отношение главных действующих напряжений; 1,2 –разломы; 3 – образовавшийся разрыв; 4 – направление максимального градиента интенсивности напряжений; 5 – область зарождения разрыва

Если полагать, что причиной возникновения разрыва является аккумулированная энергия в пределах площади ABCD, то она определяется формулой (при средней мощности сейсмогенерирующего слоя 20 км и средней интенсивности напряжений $\sigma_i = 35$ МПа):

$$U_{\phi} = \frac{1+\bar{\nu}}{3 \times \bar{E}} \times \sigma_i^2 \Delta V = 2,86 * 10^{16} \text{ Дж}, \quad (3)$$

где \bar{E} и $\bar{\nu}$ – средние модули упругости, ΔV – объем сейсмогенерирующего слоя.

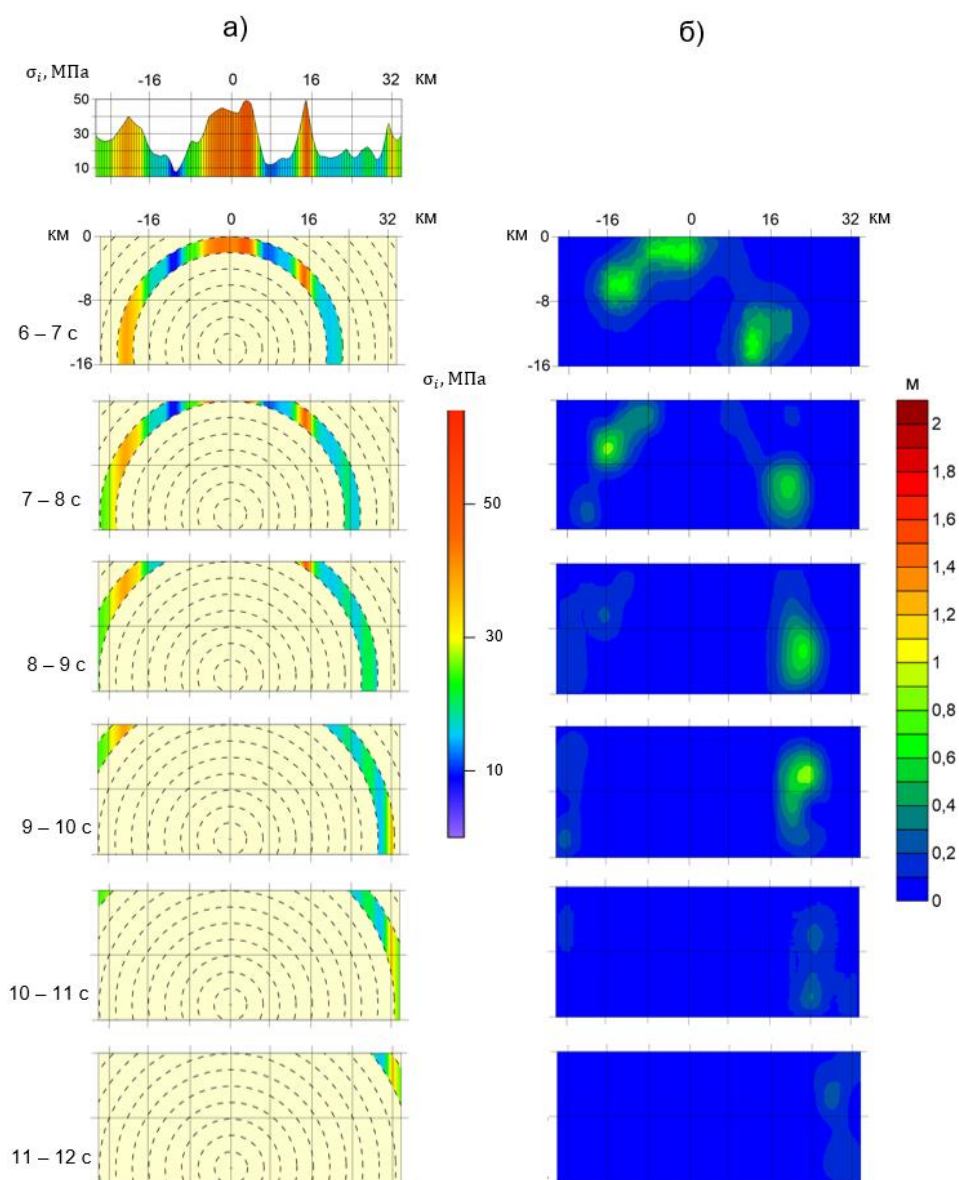


Рисунок 2.6 – Модель профиля распространения разрыва в интервале 6–12 секунд от начала землетрясения. Профили соответствуют трассе сейсмического разрыва, показанного на рис. 2.5 пунктиром. а – интенсивность напряжений σ_i , МПа (пунктирные изолинии соответствуют скорости распространения разрыва 3 м/с); б – экспериментальные данные смещений в плоскости разрыва

На рис. 2.6 показана модель профиля распространения разрыва в сопоставлении с экспериментальными данными. Протяженность разрыва зависит от удаленности зон высокой концентрации потенциальной энергии тектонических напряжений, способных поддержать его распространение. Разрыв землетрясения Хансин-Авадзи, распространяясь к поверхности в аномально напряженной зоне, вызывает максимальный сброс напряжений, сопровождающийся максимальными смещениями по разрыву. При достижении разрывом аномальных зон высокой σ_i , максимальные смещения были зарегистрированы именно в зонах северо-восточнее и юго-западнее эпицентра землетрясения, которые находятся на расстоянии 15–20 км, и им соответствуют аномально высокие отношения $\sigma_{xx} / \sigma_{yy}$.

Таким образом, формирование межразломной зоны высокой интенсивности напряжений согласуется с сейсмологическими данными и дает новое представление о механизме очага землетрясения, объясняя наличие областей максимальных смещений в косейсмическом эффекте сильных землетрясений.

2.3 Анализ долгопериодических движений и деформаций земной коры по суточным определениям координат ГНСС-пунктов для выявления деформационных предвестников землетрясений и поиска неподвижных запертых зон разломов на примере землетрясений Кумамото 2016 года (Япония) M_w 6,4–7,3

Серия землетрясений Кумамото 2016 года состояла из двух сильных форшоков 14 апреля (M_j 6,5) и 15 апреля (M_j 6,4) и последующего главного толчка 17 апреля (M_j 7,3) с гипоцентром на глубине 10 км. Тектоника района определяется двумя зонами разломов Хинагу и Футагава (рис. 2.7), к сочленению которых под острым углом приурочены рассматриваемые сейсмические события.

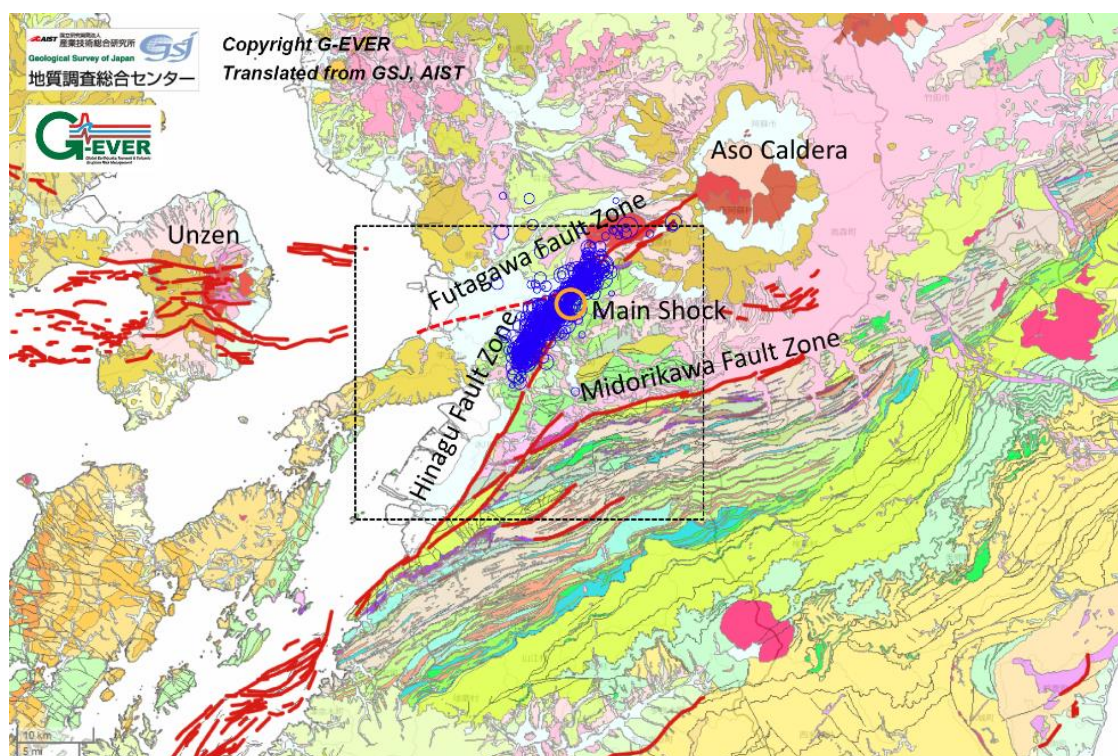


Рисунок 2.7 – Карта активных разломов в районе по данным геологической службы Японии [http://g-ever1.org/quick/index_en.html]

На территории имеется плотная сеть непрерывных ГНСС наблюдений GEONET. На пунктах наблюдательной сети перед возникновением землетрясений накоплены



измерительные данные на интервалах около 7 лет с частотой один раз в сутки. Для изучения сейсмо-деформационного процесса перед землетрясением были использованы данные непрерывных GPS-наблюдений 70 станций с суточным интервалом регистрации. Временные ряды координат наблюдательных пунктов были получены с использованием стратегии точного определения местоположения – Precise Point Positioning (PPP) с использованием точных эфемерид и поправок часов спутников GPS.

Начальная эпоха T_0 определения движений и деформаций по данным ГНСС была зафиксирована на 1 января 2009 года, то есть интервал анализируемых наблюдений составлял более 6 лет до возникновения землетрясений.

Основой для вычисления горизонтальных смещений ГНСС-пунктов явились временные ряды, полученные Геодезической лабораторией Невады [Кафтан, 2021]. Горизонтальные смещения U_n и U_e вычислялись на каждые сутки по отношению к начальной эпохе T_0 как разность плановых координат n и e в проекции UTM по следующим формулам:

$$U_{n_i} = n_i - n_0, \quad U_{e_i} = e_i - e_0, \quad (4)$$

где индекс i обозначает текущую эпоху измерений.

Смещения пунктов ГНСС, выраженные в глобальной системе отсчета, демонстрируют в первую очередь тенденции движения глобальной тектонической плиты, на которой находится пункт наблюдения. Этот эффект затрудняет отслеживание меньших по амплитуде движений, связанных с локальными изменениями, такими как медленное накопление упругих деформаций земной коры вблизи эпицентра будущего события. В этом случае *более показательными являются смещения пунктов, представленные в локальной (внутренней) системе отсчета*, хорошо отражающие взаимные разнонаправленные движения бортов локальных разрывных нарушений. Такую локальную (внутреннюю) систему отсчета смещений легко получить вычитанием из каждого смещения U_j в глобальной системе отсчета среднего значения \bar{U} , характеризующего общую для всех пунктов сети тенденцию глобальной тектоники, для каждой эпохи измерений:

$$u_{n_j} = U_{n_j} - \bar{U}_n, \quad u_{e_j} = U_{e_j} - \bar{U}_e, \quad (5)$$

где индекс j является порядковым номером пункта ГНСС наблюдений.

На каждые сутки наблюдений по значениям смещений нами были получены цифровые модели распределения горизонтальных деформаций полного сдвига и дилатации.

Для вычисления деформаций конечных элементов был использован тензор горизонтальной деформации (оси n и e направлены на север и восток):

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_n & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{en} & \varepsilon_e \end{pmatrix} \quad (6),$$



элементы которого были равными $\varepsilon_n = \frac{\partial u_n}{\partial n}$, $\varepsilon_e = \frac{\partial u_e}{\partial e}$ и

$$\varepsilon_{en} = \varepsilon_{ne} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_n}{\partial e} + \frac{\partial u_e}{\partial n} \right), \text{ соответственно,}$$

где $\frac{\partial u_n}{\partial e} - \frac{\partial u_e}{\partial n} = \gamma_{ne} = \gamma_{en}$ – относительный сдвиг.

Элементы тензора деформации представлены частными производными смещений u_n и u_e по осям координат n и e .

Для изучения пространственно-временного распределения горизонтальных деформаций были рассчитаны следующие инвариантные характеристики:

Главные деформации ε_1 и ε_2

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_n + \varepsilon_e \pm \sqrt{(\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2} \right] \quad (7)$$

Полный сдвиг:

$$\gamma = ((\varepsilon_n - \varepsilon_e)^2 + \gamma_{ne}^2)^{1/2} \quad (8)$$

Дилатация:

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (9)$$

Полученные визуализации расчетов представлены на рис. 2.8–2.10. На рис. 8 мы видим медленное накопление горизонтальных смещений, достигающих около 10 см за сутки перед первым форшоком с M 6,4, закономерно направленных на северо-запад. Наиболее интересными фактами явились правосторонний сдвиг по оси разломной зоны Футугава с амплитудой смещений более 1 м, одновременно с удалением территорий по обе стороны от разрыва на расстояние до 1 м.

Поведение деформации полного сдвига показано на рис. 2.9. Очевидно, что до моментов возникновения сильных форшоков накопления существенных сдвиговых деформаций не обнаружено. Их проявление на уровне 5×10^{-6} имеет место в северо-западной и юго-восточной окраинах исследуемой территории. Деформация полного сдвига достигла $1,2 \times 10^{-4}$ сразу после главного сейсмического события (рис. 2.10, f). Применение локальной (внутренней) системы отсчета по отношению к накоплению смещений станций ГНСС позволяет обнаруживать зоны минимальных взаимных смещений. Эти зоны маркируют места локально неподвижных участков земной поверхности, характерные для запертых зон сейсмогенерирующих разломов.

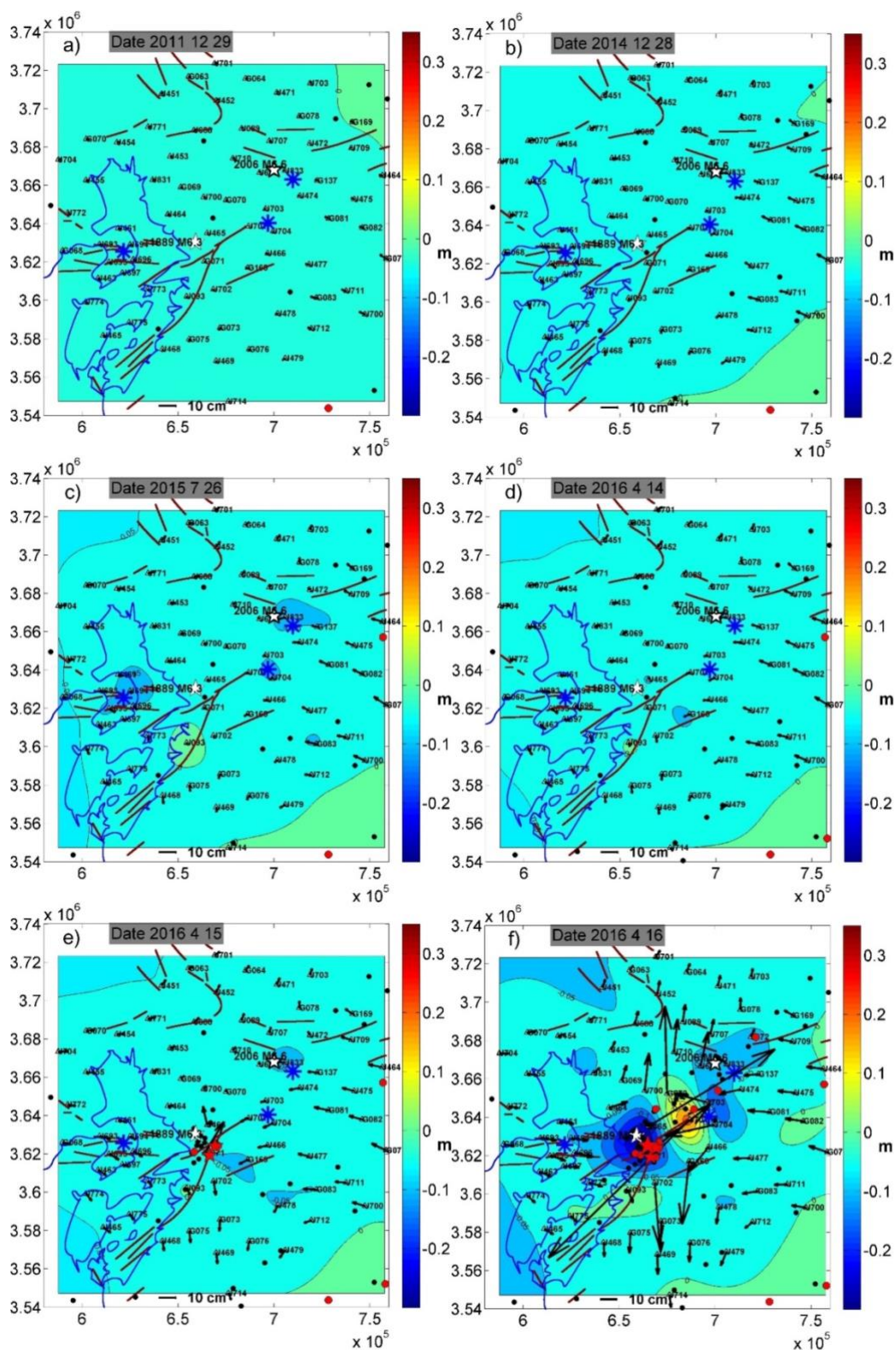


Рисунок 2.8 – Распределение накопленных горизонтальных и вертикальных смещений перед землетрясениями Кумамото. Сечение изолиний вертикальных смещений – 5 см. Цветовые шкалы представлены справа от рисунков. Стрелки представляют собой векторы горизонтальных смещений пунктов. Черные окружности – слабые землетрясения

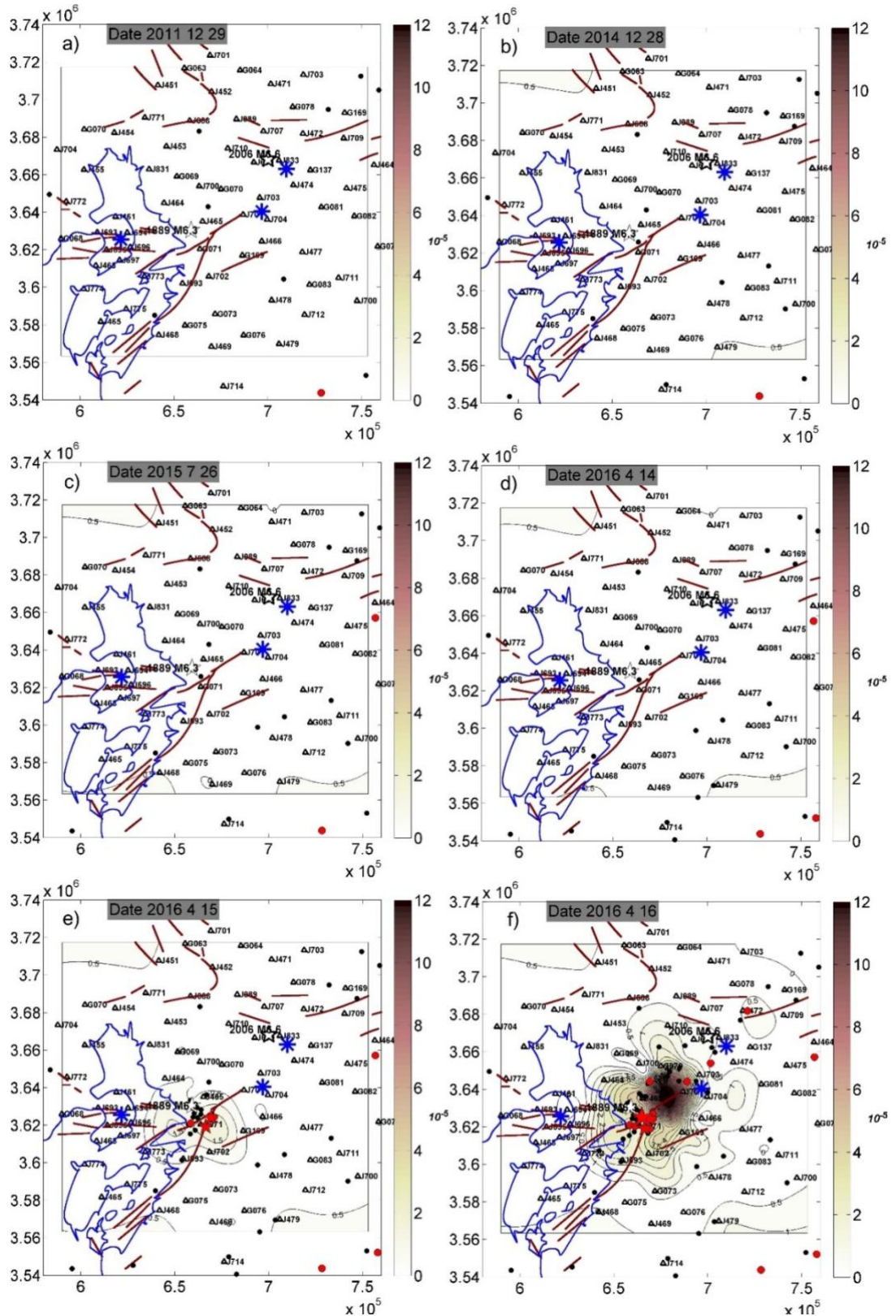


Рисунок 2.9 – Распределение накопленной деформации полного сдвига перед землетрясениями Кумамото. Сечение изолиний деформации 5×10^{-6} . Черные окружности – слабые землетрясения

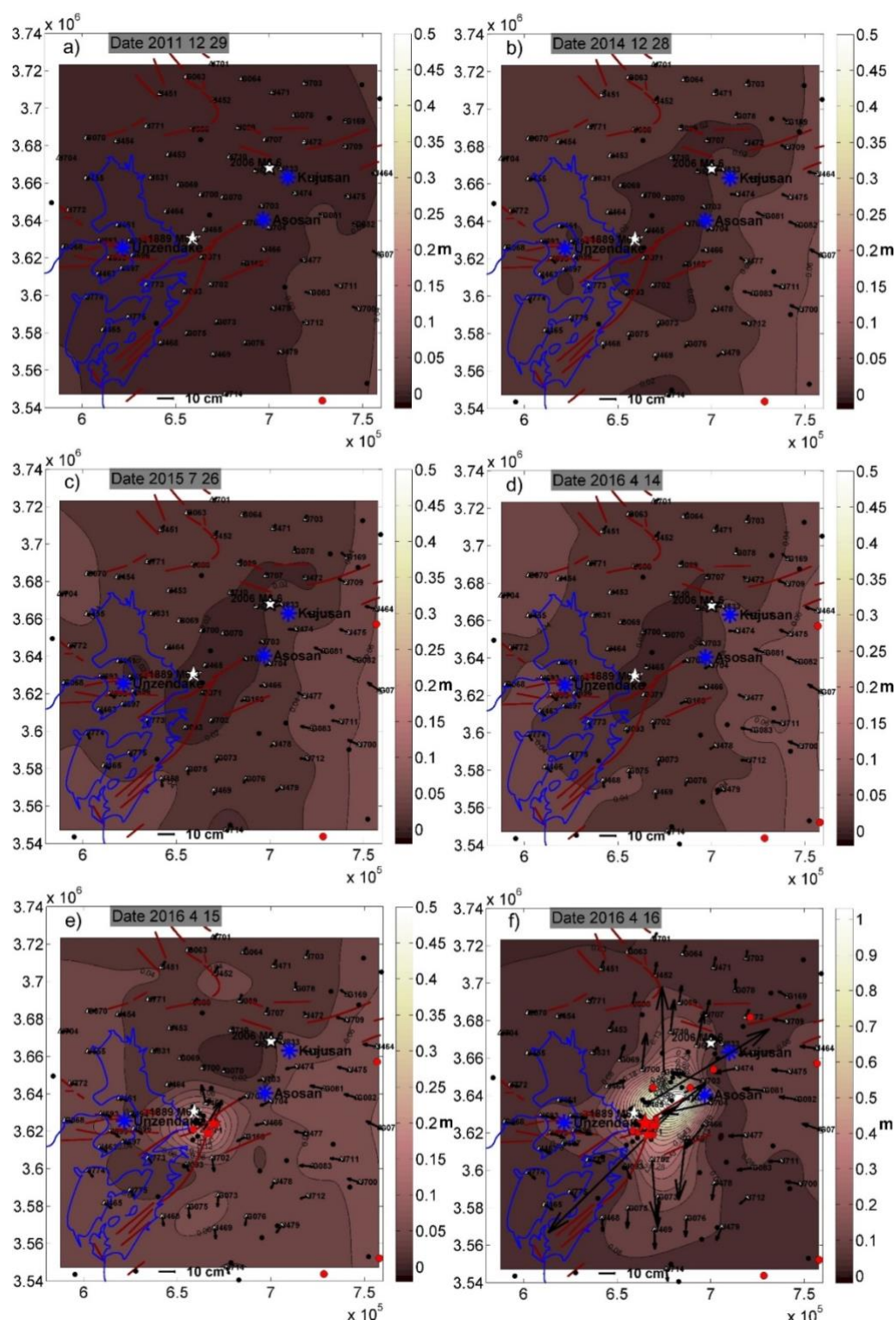


Рисунок 2.10 – Распределение накопленных полных смещений перед землетрясениями Куамото. Сечение изолиний полного смещения – 2 см (а-е) и 5 см (f). Стрелки представляют собой векторы горизонтальных смещений пунктов

Эволюция минимальных смещений перед наступлением серии Куамото показана на рис. 2.10. На протяжении накопления деформации в течение 7,3 лет перед главными сейсмическими событиями в области их будущих эпицентров образовалась зона минимальных смещений менее 0,02 м. Эти характеристики представляют собой модули



векторов накопленных смещений пунктов ГНСС, полученных по формуле:

$$u_j = \sqrt{u_{n_j}^2 + u_{e_j}^2} \quad (10)$$

После реализации крупных и сильных событий область минимальных смещений разрушается, образуя на полученных изображениях белые пространства. Эти проявления демонстрируют возможность регистрации области ожидания сильных сейсмических событий там, где вследствие землетрясения возникают интенсивные косейсмические сдвиговые деформации земной поверхности.

Таким образом, следуя гипотезе упругой отдачи Рейда, местом будущего события является “запертая” зона активного разлома, иначе говоря, зона минимальных деформаций в области подготовки землетрясения. Такую зону в сейсмоактивной области можно картировать по величинам полных смещений пунктов ГНСС, представляющих собой длины векторов горизонтальных смещений.

Чем меньше длина вектора смещения, тем менее подвижна земная поверхность территории его расположения. В сейсмоактивной области место минимальных движений, исходя из модели упругой отдачи, является местом максимальных напряжений.

Для расчетов компонент деформаций, их визуализации и расчета напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры на изгиб в рамках темы были разработаны программы, которые оформлены в виде РИДов [Колесников и др., 2021; Маневич и др., 2021; Шакиров и др., 2021].

Список использованных источников

- Кафтан В. И. Анализ движений и деформаций земной поверхности по тринадцатилетним GPS наблюдениям до и во время землетрясений Риджквест (июль 2019, США, Калифорния) // Вулканология и сейсмология. 2021. №2. С. 29–38. DOI: 10.31857/S0203030621010041.
- Кафтан В. И., Кафтан И., Гёк Е. Исследование движений и деформаций земной коры восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23 октября 2011 г., Mw=7,2) с использованием данных GPS наблюдений // Физика Земли. №3. 2021. С. 30–44. DOI: 10.31857/S0002333721030078.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Камнев Е. Н., Маневич А. И. Геодинамические аспекты захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (Нижнеканский массив) // Горный журнал. 2021. №3. С. 108–112. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05.
- Маневич А. И., Кафтан В. И., Лосев И. В., Шевчук Р. В. Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга территории размещения подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 2. С. 43–61. DOI: 10.21455/si2021.2-3.
- Морозов В. Н., Маневич А. И. Механизм формирования разрыва землетрясения Хансин-



Авадзи (г. Кобе, Япония) 17.01.1995 М 6,9 // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. №2. С. 151–158. DOI: 10.31857/S2686739721080089.

Кафтан В. И., Татаринев В. Н. Анализ возможностей сетей локального деформационного ГНСС мониторинга в сейсмоопасных районах // Вулканология и сейсмология. 2021в. №6. С. 21–29. DOI: 10.31857/S0203030621060043.

Кишкина С. Б., Татаринев В. Н., Бугаев Е. Г., Гупало В. С., Забродин С. М. Подземная исследовательская лаборатория: преодоление неопределенностей в оценке сейсмических условий участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 80–93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93.

Шакиров А. И., Урманов Д. И., Маневич А. И. Программа для визуализации параметров деформаций в среде Python / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666637 от 18 октября 2021 г.

Маневич А. И., Шевчук Р. В., Лосев И. В. Программа для расчета компонент деформаций по данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665069 от 17 сентября 2021 г.

Колесников И. Ю., Татаринев В. Н., Татаринова Т. А. Программа конечно-элементного расчета на изгиб геологического пластинчатого слоя на основе спектральных неалгебраических 8-узловых КЭ и схемы функциональной декомпозиции» «SFE8-FD_GEO.RM_PLATE-1» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661508 от 12 июля 2021 г.

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: FMGN-2019-0003

Номер: AAAA-A19-122012500331-2 / 1021032426030-2-1.5.1

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

3.1 Изучение экстремальных событий космической погоды по данным геомагнитного мониторинга

3.1.1 Карта с нормированными теллурическими полями Российской Арктики

Было синтезировано теллурическое E -поле с использованием связи в частотной области между электрическими $\mathbf{E}(f)$ и магнитными $\mathbf{V}(f)$ полями через комплексный тензор импеданса $Z(f)$. Для расчета геоэлектрических полей использовалась информация об импедансах земной коры, вычисленных на основе глобальной 3D-модели проводимости [Alekseev et al., 2015]. Мы построили синтетическую карту геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться пространственно-однородными вариациями поля с $|\mathbf{V}(f)| = 1$ нТл и $T=100$ с на всей территории РФ. Согласно рассчитанной карте «теллурической опасности» (рис. 3.1), наибольшие значения теллурических полей до $E \sim 5$ мВ/км при том же геомагнитном возмущении должны возбуждаться на северо-западе РФ и на Урале. В районе Ямала теллурические поля достаточно слабые, $E \sim 0,5$ мВ/км. Проведенные расчеты показывают, что геологическое строение существенно влияет на силу и направление геоэлектрических полей, генерируемых магнитными бурями.

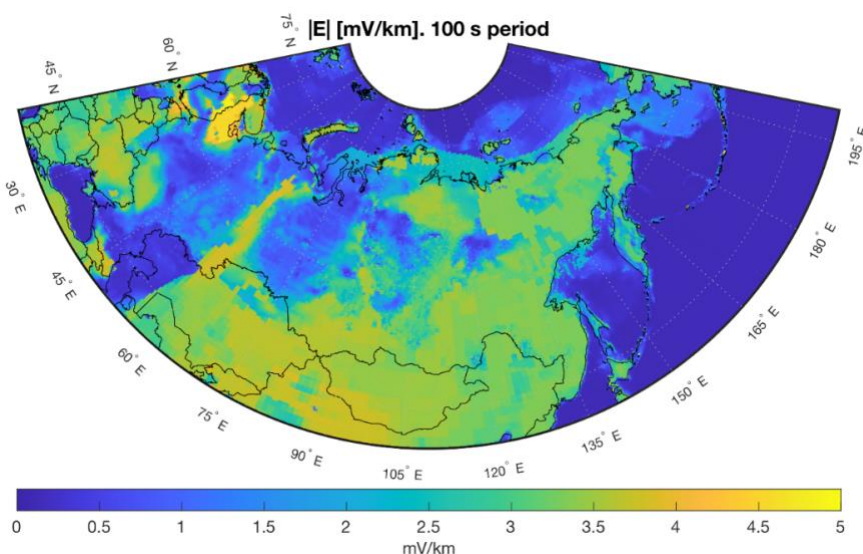


Рисунок 3.1 – Карта значения теллурических полей E , возбуждаемых однородным магнитным полем с периодом $T=100$ с и амплитудой 1 нТл

3.1.2 Архив цифровых 1-мин данных советских/российских арктических магнитных станций

В представленной базе данных собраны результаты наблюдений вариаций геомагнитного поля с 1-минутным разрешением по времени на станциях в Российской Арктике с 1983 года по настоящее время. Архив включает данные наблюдательных кампаний «Геомагнитный Меридиан 145°» (1972–1998 годы), станций, развернутых на Ямале с 2004 года, и других станций вдоль Арктического побережья. Все данные разбиты на суточные файлы, приведены к простому текстовому формату, унифицированы. Часть данных не входит в существующие мировые базы магнитных данных (SuperMAG, INTERMAGNET, WDC). Карта с положением станций, включенных в базу данных, представлена на рис. 3.2а. Для быстрого просмотра данных и отбора событий построены «quick-look» магнитограммы горизонтальной компоненты (рис. 3.2б).

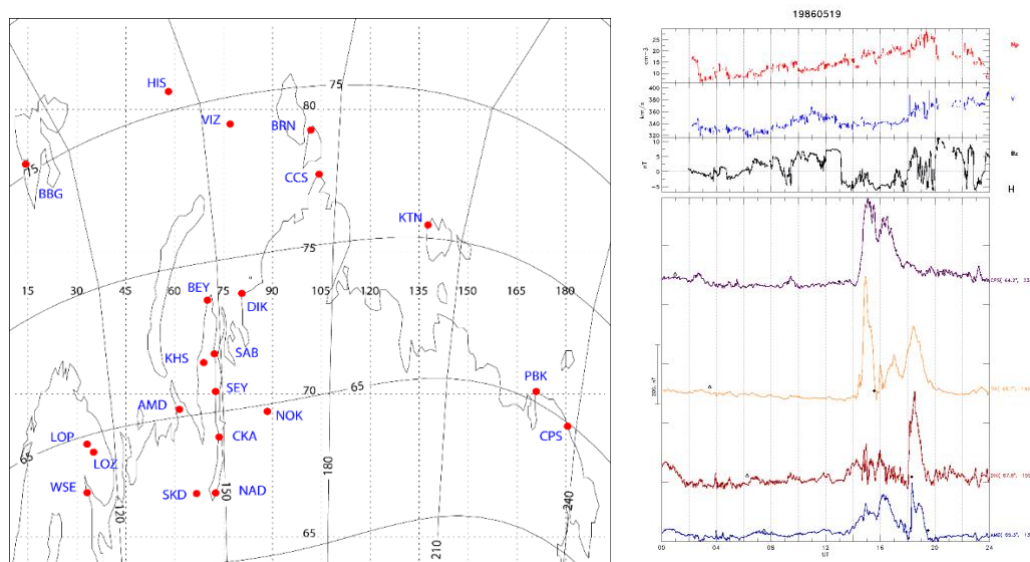


Рисунок 3.2 – Магнитные станции в арктической зоне РФ для мониторинга негативного влияния космической погоды на технологические системы, пунктирными линиями показана географическая сетка координат, сплошными линиями – геомагнитная (а); «quick-look» графики данных H-компоненты по данным обсерваторий (снизу) и параметров солнечного ветра по спутниковым данным (сверху) за магнитную бурю 19.05.1986 (б)

При создании в 2021 году базы магнитных данных (с 1983 года по настоящее время) по арктической зоне РФ преследовались следующие цели: сделать результаты наблюдений легко доступными для широкого круга пользователей; частично заполнить «белые пятна» в мировой сети геомагнитных наблюдений, повысить научную отдачу от многолетних работ по регистрации геомагнитного поля на высоких широтах. Вся база данных, графики магнитограмм для быстрого просмотра и геоэлектрическая модель земной коры находятся в свободном доступе на FTP-сервере ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/YAMAL/.

3.1.3 Модификация модели коронального выброса массы «3DCORE»

Наиболее реалистичной феноменологической моделью магнитного поля коронального выброса массы (КВМ) является модель 3DCORE [Möstl et al., 2018]. Она описывает КВМ в форме конического тора и использует неортогональные эйлеровы координаты для его представления. Было обнаружено, что магнитное поле 3DCORE нарушает оба уравнения Максвелла: закон Гаусса для магнитного поля (отсутствие магнитных монополей) и закон электромагнитной индукции Фарадея для вращающейся плазмы. Вместе с тем, гелиосферные магнитогидродинамические уравнения накладывают физические условия, которые имеют вид законов сохранения. Данные законы необходимо учитывать при разработке феноменологической модели КВМ. Показано, что законы сохранения принимают чрезвычайно простую форму, если использовать лагранжево представление движения плазмы и вращающегося в ней магнитного поля. Предложена модификация магнитного поля 3DCORE, удовлетворяющего уравнениям Максвелла (рис. 3.3). Полученный результат дает возможность использовать такое магнитное поле в истинно трехмерном смысле для расчета рассеяния космических лучей от КВМ с целью отслеживания КВМ за пределами солнечной короны, при моделировании магнитного потока в солнечной конвективной зоне [Fan, Gibson, 2003; Luoni et al., 2011; Poisson et al., 2016] и в других задачах.

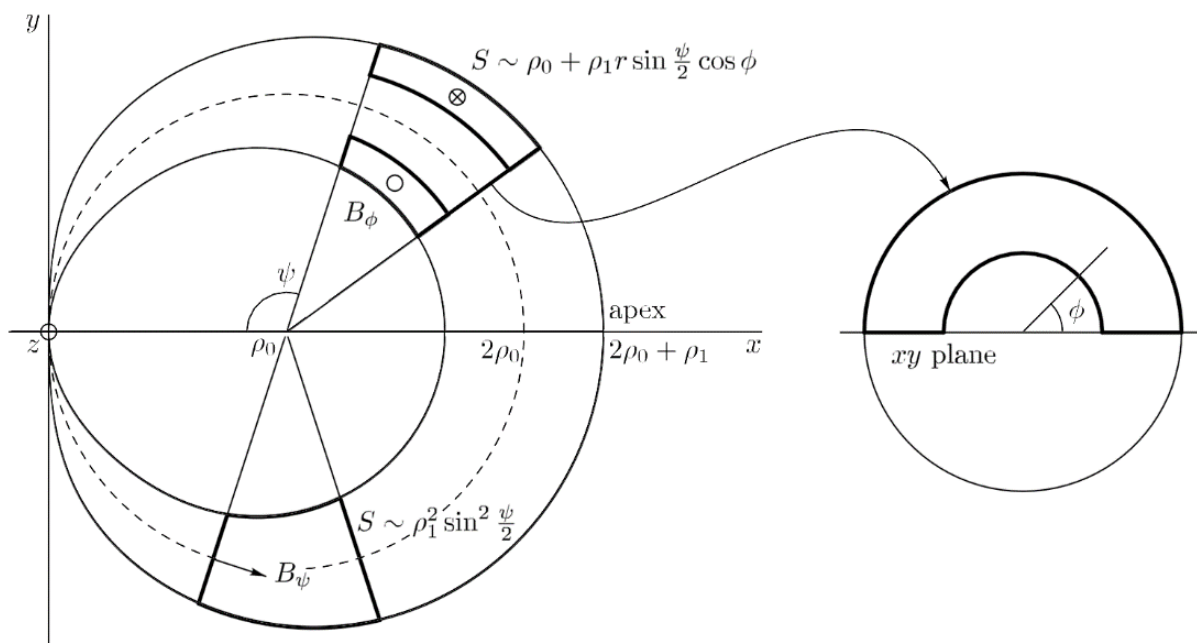


Рисунок 3.3 – Геометрия коронального выброса массы в виде конического тора, ось тора показана пунктирной линией. Слева – проекция на плоскость xy , справа – поперечное сечение $\psi = \text{const}$. На рисунке жирным выделены поверхности для расчета магнитных потоков. Показаны направления магнитного поля B и площади ортогональных сечений



3.1.4 Законы повторяемости значений К-индекса в северо-западном тихоокеанском регионе за 19–24 солнечных циклы

Значительные усилия японских и российских магнитологов по оцифровке калиброванных данных К-индекса за длительный период наблюдений [Sergeyeva et al., 2021] позволили впервые провести единообразное изучение особенностей геомагнитной активности в обширной северо-западной части Тихого океана за шесть солнечных циклов (1954–2020 годы). Была обнаружена высокая корреляция между распределениями повторяемости К-индекса для каждой пары из семи рассматриваемых обсерваторий за весь период исследования. Это говорит о том, что задумка Дж. Бартельса иметь идентичные распределения К-индекса (с надлежащим масштабированием) по всем обсерваториям выполнена. Установлено, что значения К-индекса из всего диапазона ($K \geq 0$) подчиняются семейству нормальных законов распределения, тогда как экспоненциальный закон распределения лучше всего подходит для набора данных $K \geq 2$. Выявленные законы распределения для $K \geq 0$ и $K \geq 2$ справедливы для любой фазы солнечного цикла и каждой обсерватории из рассматриваемого региона. Также было установлено, что вероятность события $K \geq 8$, обнаруженного одновременно на всех обсерваториях в регионе за период одновременного наличия всех данных, составляет менее одной сотой процента. В то же время, такая вероятность на кластерах соседних обсерваторий, разделенных по схожести значений K_9 , на порядок больше. Применение линейных регрессий позволило отслеживать изменение во времени характеристик частотного распределения К-индекса в терминах изменчивости линейных коэффициентов, рассчитанных для кумулятивных распределений в логарифмической шкале (рис. 3.4).

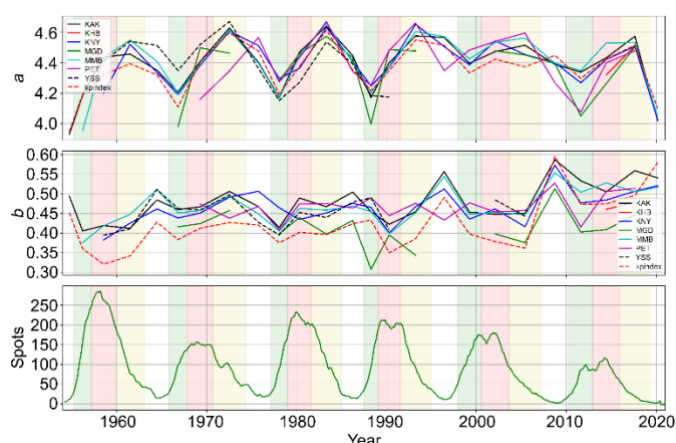


Рисунок 3.4 – Вариации коэффициентов a (вверху) и b (посередине) за период 1954–2020 годы. Число солнечных пятен показано внизу. Фазы минимума, роста, максимума и спада солнечной активности отмечены белыми, зелеными, красными и желтыми прямоугольниками соответственно. Разные цвета ломаных линий соответствуют различным обсерваториям и K_p -индексу (см. легенду на графиках)

Анализ временных изменений как коэффициентов линейной регрессии, так и повторяемости различных значений К-индекса за год на отдельных обсерваториях (рис. 3.5) и на совокупности всех обсерваторий показывает, что периодические и вековые вариации хорошо коррелируют с изменением числа солнечных пятен за последние шесть солнечных циклов – большие значения К-индекса совпадают с фазами спада, а меньшие значения тяготеют к возрастающим фазам солнечной активности. Вместе с общим уменьшением пиковых значений солнечных пятен количество меньших значений К-индекса (спокойных периодов) становится больше, а количество больших значений К-индекса (возмущенных периодов) становится меньше. Эти тенденции справедливы и для отдельных обсерваторий, и для всей совокупности обсерваторий, и для распределения планетарного индекса К_p. Результаты свидетельствуют о свойстве самоподобия геомагнитной активности на средних широтах и применимости вычисленных коэффициентов для изучения региональных особенностей геомагнитной активности на временных масштабах, сравнимых с солнечной цикличностью, и даже для прогноза частотных распределений К-индекса. Высокая согласованность в изменчивости коэффициентов для региональных (К) и планетарного (К_p) индексов свидетельствует справедливости выявленных геомагнитных особенностей для других регионов.

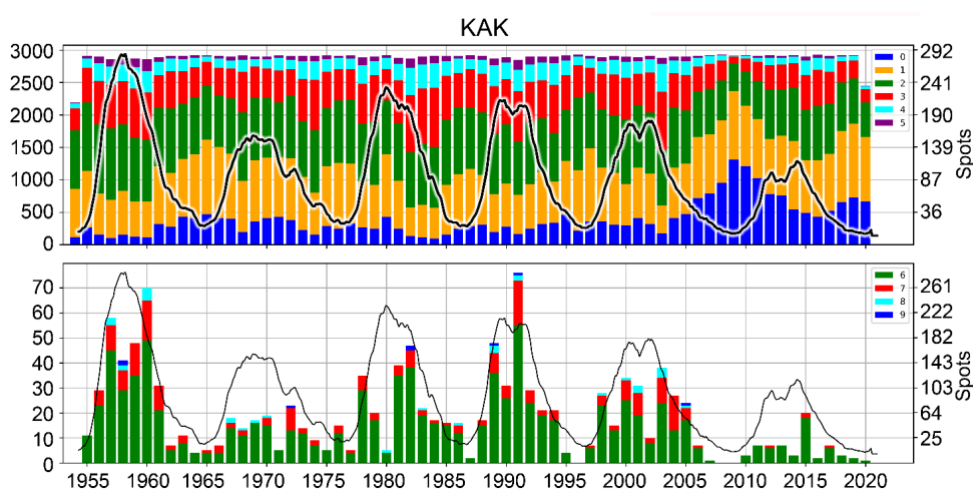


Рисунок 3.5 – Повторяемость различных значений К-индекса по годам как функция от времени на обсерватории КАК (Япония) за 1954–2020 годы. Верхний и нижний графики показывают составные гистограммы для событий $K = 0 \dots 5$ и $K = 6 \dots 9$ соответственно; цветовая схема для каждой гистограммы приведена в легенде. Число солнечных пятен нанесено поверх гистограмм

3.1.5 Исторический аспект исследования МГД волн в космосе и на Земле

Подготовлен обзор истории исследований в институтах АН СССР волновых вариаций геомагнитного поля в низкочастотной части ультранизкочастотного (УНЧ) диапазона – от долей до десятков мГц [Kurazhkovskaya, 2020]. Этот частотный диапазон соответствует спектру магнитогидродинамических (МГД) волн в околоземной плазме.



Физика МГД-волн в магнитосфере Земли опирается на теоретический аппарат физики плазмы и магнитной гидродинамики, а экспериментальной базой исследований являются данные наблюдений на спутниках и наземных станциях. Рассказано о некоторых значительных экспериментах в СССР по изучению различных типов УНЧ-волн и о пионерских результатах советских геофизиков, получивших международное признание. Создание адекватных математических моделей распространения и трансформации МГД-волн привело к созданию «гидромагнитной сейсмологии» околоземного пространства. Обнаружены новые типы геомагнитных пульсаций при наблюдениях на станциях в Арктике и Антарктике. Проведенный цикл теоретических исследований позволил описать полную картину возбуждения УНЧ-колебаний в периоды магнитных бурь. Разработан механизм магнитосферного «геосинхротрона» – ускорения УНЧ-волнами электронов внешнего радиационного пояса до релятивистских энергий. Предложен метод магнитотеллурического зондирования земной коры с использованием [УНЧ-электромагнитного поля](#). Особое внимание уделено ученым, не получившим широкой известности и которым почти не уделялось внимания в исторической литературе.

3.2 Развитие дискретного математического анализа для решения задач геофизики

В рамках первого теоретического направления было построено регрессионное интегрирование непрерывных и дискретных функций как операция обратная регрессионному дифференцированию [Агаян и др., 2019, 2021]. Приведем некоторые примеры регрессионного интеграла. Рассмотрим две классические непрерывные функции, одна из которых имеет первообразную (рис. 3.6), а другая не имеет (рис. 3.7).

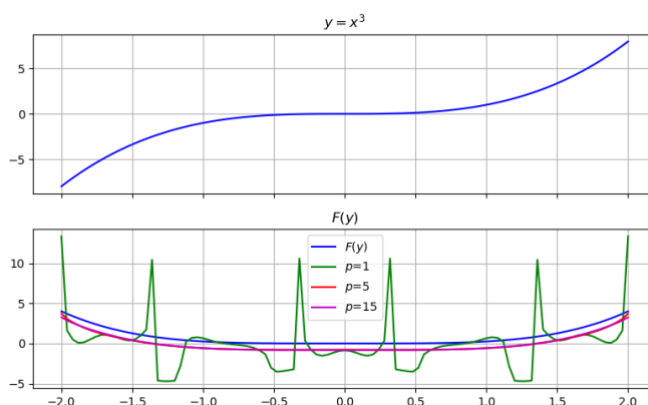


Рисунок 3.6 – На верхнем рисунке график функции $y = x^3$, на нижнем рисунке синим цветом показан интеграл функции $y: f(y) = \frac{x^4}{4}$, другими цветами – регрессионный интеграл функции y при разных значениях p

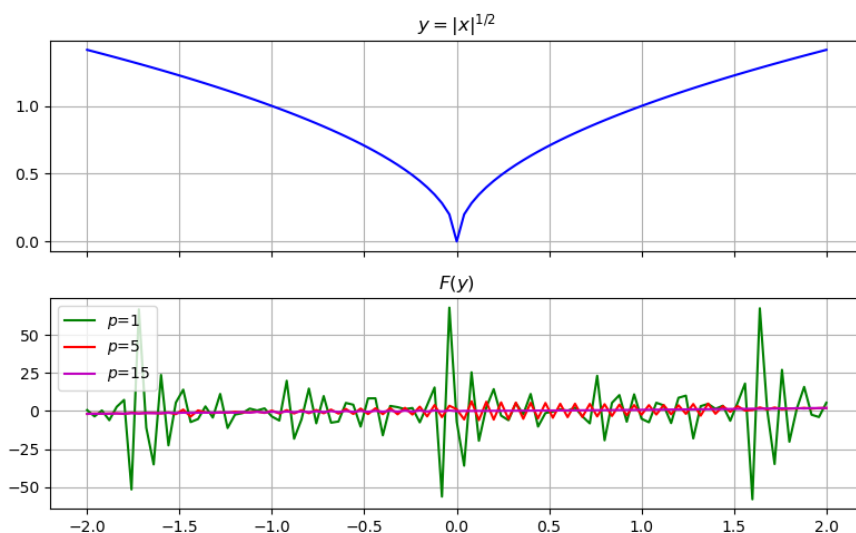


Рисунок 3.7 – На верхнем рисунке график функции $y = |x|^{1/2}$, на нижнем рисунке показан регрессионный интеграл функции y при разных значениях ρ

На рис. 3.8 приведен пример неинтегрируемой функции, для которой система уравнений не имеет решения.

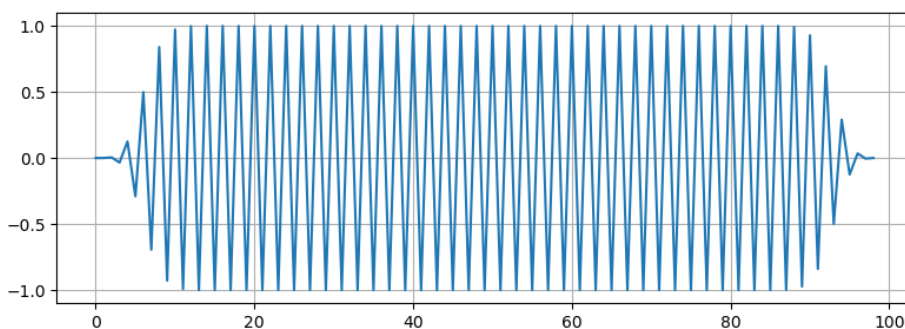


Рисунок 3.8 – Неинтегрируемая функция

В практической части исследования велись в определении момента вступления волн цунами на записях уровня моря методами ДМА. В этой задаче актуальна разработка более гибких процедур обработки записей уровня моря для регистрации волны цунами береговыми гидрофизическими станциями по сравнению с существующей процедурой оценки времени вступления волны. Одним из возможных подходов к решению данной задачи является использование экспертной информации, которая может учесть особенности данных измерений, а также моделирование действий эксперта по оценке времени вступления волны цунами (рис. 3.9). Именно это делают алгоритмы, построенные на базе ДМА. Формализация действия эксперта при решении вопроса о проявлении в записи уровня моря волны цунами обеспечивается путем построения меры «опасности цунами в узле» средствами нечеткой математики, с использованием регрессионных производных (рис. 3.10).

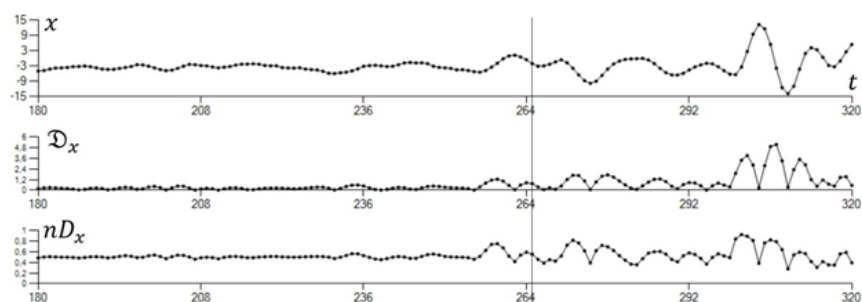


Рисунок 3.9 – Экспертная оценка времени вступления волны: x – уровень моря, см; t – время, мин; ряд D_x – ряд регрессионной производной нечеткого образа записи уровня моря, см/мин; nD_x – результат нормирования. Сплошная вертикальная линия – экспертная оценка времени вступления волны цунами

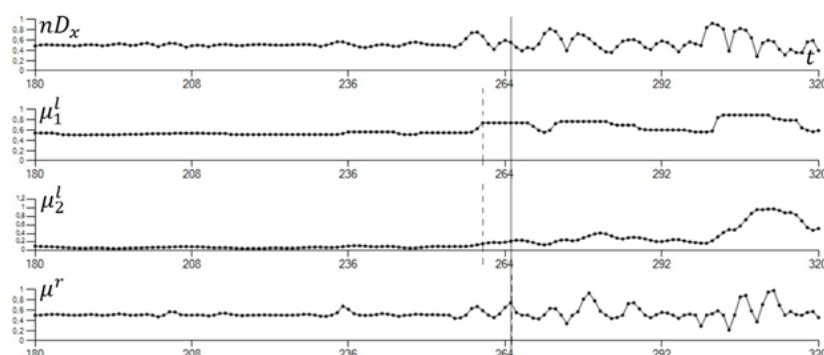


Рисунок 3.10 – Оценки времени вступления волны цунами с помощью алгоритма (t – время, мин): μ_1^l , μ_2^l , μ^r – значения мер; пунктирные линии – оценки с помощью «мер опасности» цунами

Для имитации применения алгоритма в реальных условиях массив записей был случайным образом разделен на две части. Меньшая, контрольная часть, содержала 5 записей уровня моря, при этом все записи были получены в разных пунктах измерений уровня моря. На основе большей части, содержащей 23 записи, проведена настройка алгоритма, который затем был применен к записям контрольной части массива. Для контрольного массива среднее значение разности между экспертной оценкой времени вступления $t_{\text{экс}}$ и оценкой с помощью алгоритма $t_{\text{алг}}$ оказалось равным 0,2 мин. При этом завышение времени вступления ($t_{\text{алг}} - t_{\text{экс}} > 0$) наблюдалось в 2 случаях, в одном из которых – пропуск цунами. Заметим, что для оценки времени вступления волны цунами с помощью процедуры, применяемой в настоящее время в оперативной деятельности российской службы предупреждения о цунами СПЦ (изменение за минуту уровня моря более чем на 5 см/мин), среднее значение разности между $t_{\text{алг}}$ и $t_{\text{экс}}$ для используемого в настоящей работе массива записей составляет 126,6 мин.

В рамках второго теоретического направления была получена вторая реализация проекционного метода [Агаян и др., 2020] на основе процесса ортогонализации Грама-Шмидта. Исследования заключались в конструктивном описании многообразия решений

$\Phi(A, b)$ линейной системы $Ax = b$ в конечномерном евклидовом пространстве E . Знание $\Phi(A, b)$ позволяет учесть априорную информацию о свойствах истинного решения x^f путем его поиска на $\Phi(A, b)$. Технически это выглядит так: экспертная 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 $B(\Phi(A, b), \mathcal{F})$ относительно \mathcal{F} на $\Phi(A, b)$. Сказанное графически передает схема

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

Первый переход в этой схеме полностью относится к линейной алгебре, и в наших исследованиях был выполнен двумя способами. 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. В ходе работ рассмотрены два экспертных суждения E_μ и E_S , имеющие большое практическое значение, а также их комбинация $E_{\mu S}$. Суждение E_μ свидетельствует о схожести искомого решения x^f с известным вектором $\mu \in E$, а суждение E_S говорит о наличии блоковой структуры у решения x^f в виде так называемой S -однородности. Для них построены формализации в виде функционалов E_μ , E_S и $E_{\mu S}$ на $\Phi(A, b)$. Возвращаясь к приведенной схеме, отметим, что третий переход в ней представляет собой оптимизацию функционалов из \mathcal{F} на многообразии $\Phi(A, b)$. В рамках работы она выполнена аналитически: для функционалов E_μ , E_S и $E_{\mu S}$ явно найдены градиенты, и с их помощью соответствующие варианты истинного решения x^f . В ходе работ была получена формализация экспертного утверждения об однородности.

Пример, иллюстрирующий применение теоретического построения проекционного метода решения обратных задач, связан с изучением ликвационного месторождения Норильской рудной зоны (рис. 3.11).

Таким образом, использование суждения $E_{\mu S}$ позволяет получить решение, удовлетворяющее в различной степени суждениям обоих экспертов. С ростом α решение x^f становится ближе к истинному распределению плотностей.

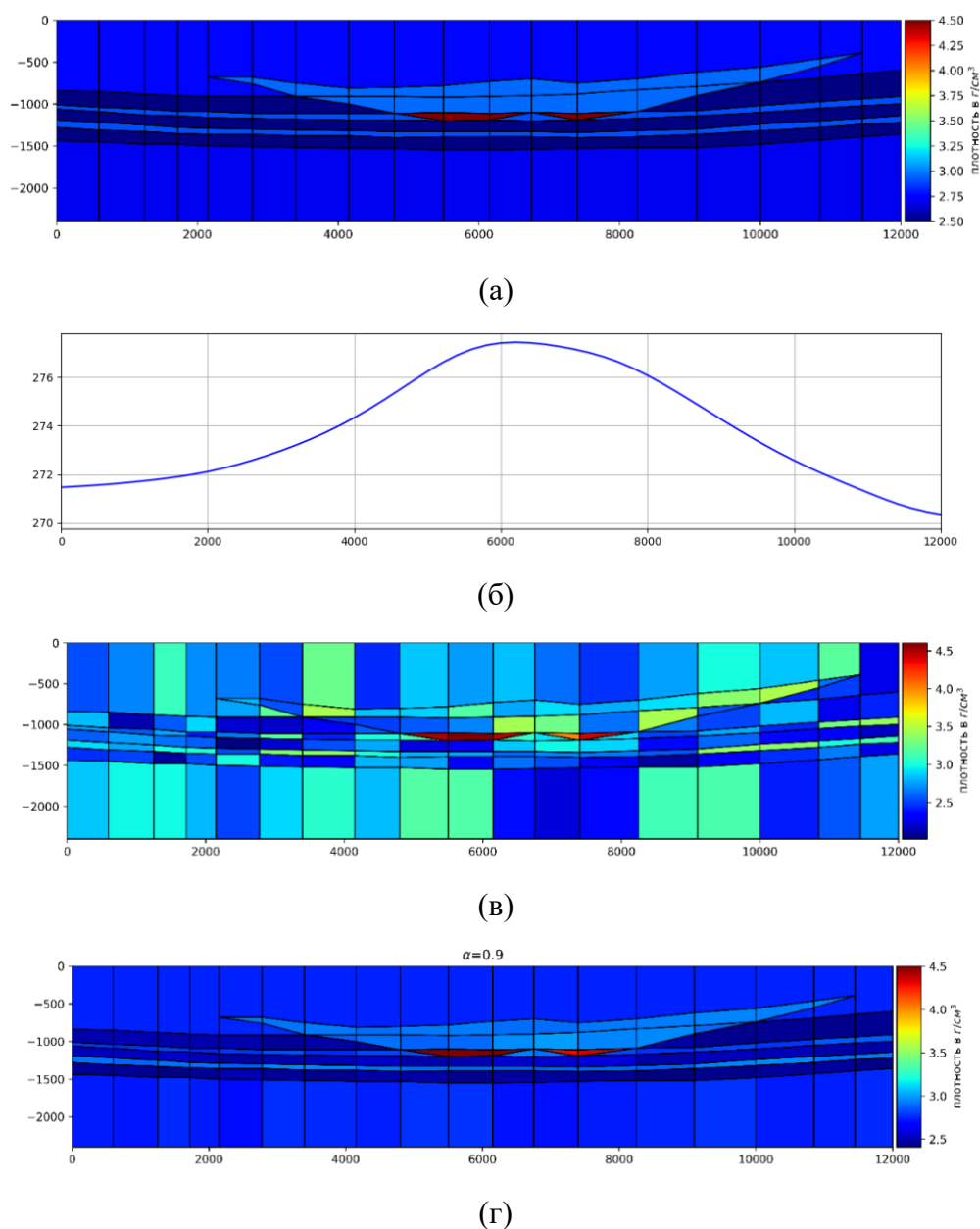
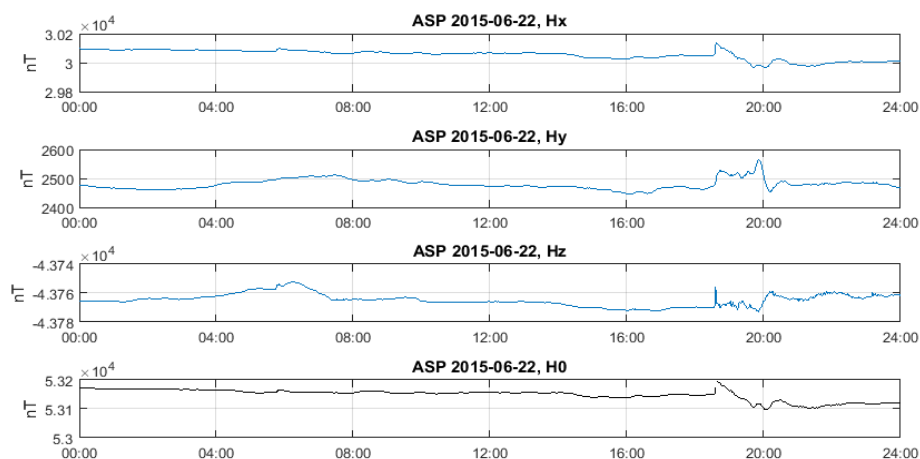


Рисунок 3.11 – Истинная геолого-геофизическая модель, разбитая на ячейки (а); наблюдаемое гравитационное поле от модели (б); μ -зашумленная исходная модель (в); полученное распределение плотностей при $\alpha = 0,9$ (г)

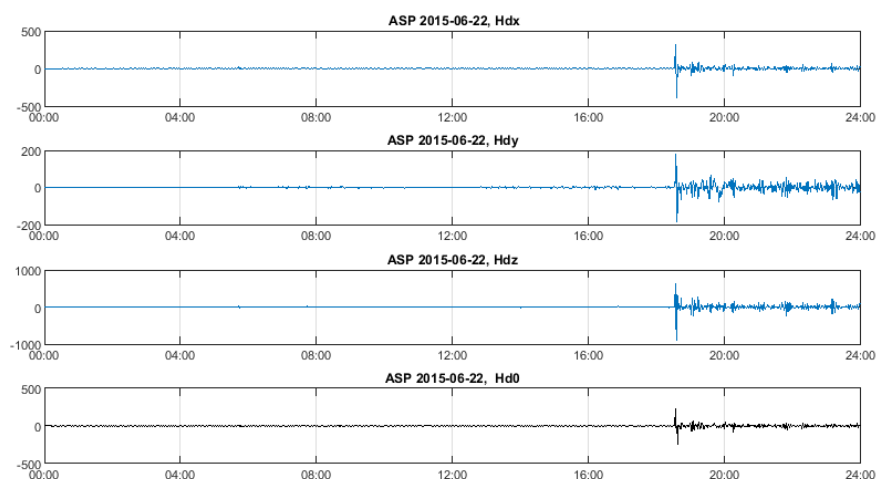
3.3 Распознавание внезапного начала бури с использованием цифровых производных фильтров

Состояние магнитосферы Земли находит свое отражение в магнитограммах обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Геомагнитные бури зачастую сопровождаются событиями типа SC (sudden commencement – внезапное начало) [Curto et al., 2007]. Они представляют скачки повышений и понижений в измерениях напряжённости геомагнитного поля, которые синхронно наблюдаются почти по всем обсерваториям. SC являются следствием ударного взаимодействия корональных выбросов массы с магнитосферой Земли. Главная особенность SC состоит в том, что их возникновение реализуется за несколько часов до

регистрации бурь магнитными обсерваториями. Разработан метод распознавания SC-событий с применением цифровых дифференцирующих фильтров к данным системы наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ и разработанной процедуры принятия решений (рис. 3.12). Он оказался эффективным и работоспособным в задаче прогнозирования появления бурь. При обработке годового массива данных 16 обсерваторий, при заданном ограничении вероятности ложного распознавания $\alpha_0 = 0,05$ вероятность правильного распознавания составила величину $\beta_{RD} 0,75$. Предложенный метод распознавания SC имеет большие резервы для усовершенствования, в частности, дальнейшей оптимизации его параметров с целью улучшения вероятностных характеристик. Метод может быть приспособлен для решения задачи краткосрочного прогнозирования магнитных бурь и имеет благоприятную перспективу его использования в прикладных задачах.



(a)



(б)

Рисунок 3.12 – а) Исходные данные компонент МПЗ с SC-событием; б) Результаты вычислений производных компонент МПЗ с использованием оптимального дифференцирующего КИХ-фильтра

3.4 Развитие высокоточного мониторинга магнитного поля Земли в РФ и ближнем зарубежье

На протяжении 2021 года сотрудниками ГЦ РАН велись комплексные работы по поддержке, ремонту и обновлению зданий, сооружений, линий связи и электропитания геофизической обсерватории «Климовская» (Коношский район Архангельской области). На сегодняшний день на регулярной основе на ней ведутся высокоточные наблюдения магнитного поля Земли, ГНСС-измерения и метеорологические наблюдения. Кроме того, на территории установлена сейсмостанция ФИЦКИА. Внедрение в 2021 году съемки территории металлоискателем в практику регулярных работ по поддержке функционирования магнитных обсерваторий представляется важным ввиду необходимости мониторинга чистоты территории от ферромагнитных материалов.

Была начата работа по включению геофизической обсерватории «Янгибазар» Института сейсмологии Академии наук Республики Узбекистан (рис. 3.13) в межрегиональную наземную сеть магнитных обсерваторий и станций. Намечены основные направления работ по рекогносцировке обсерватории, магнитометрическому исследованию ее территории, дооснащению этой обсерватории современным оборудованием стандарта ИНТЕРМАГНЕТ и обучению персонала работе в соответствии с предписаниями данной организации.



Рисунок 3.13 – Интерьер абсолютного (слева) и вариационного (справа) павильонов магнитной обсерватории «Янгибазар»

Сравнение среднегодовых данных модуля магнитного поля обсерватории «Янгибазар» со среднегодовыми данными модели IGRF [Alken *et al.*, 2021] показало, что за 11 лет изменения модуля по данным модели и по данным обсерваторских измерений происходили согласованно, и значения модуля росли с одинаковой скоростью и с сохранением постоянной разности 192–208 нТл (рис. 3.14).

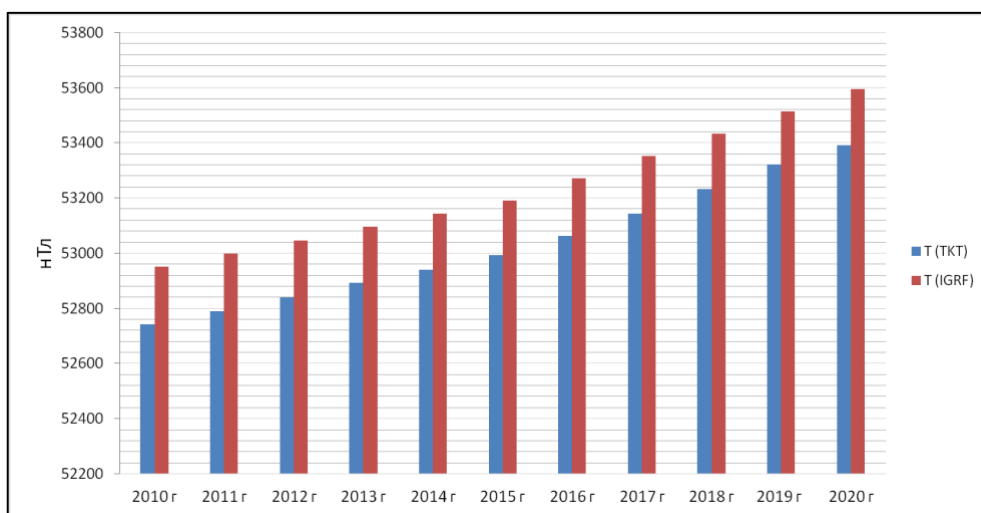


Рисунок 3.14 – Среднегодовые значения модуля магнитного поля Земли по данным магнитной обсерватории «Янгибазар» в сравнении с данными модели IGRF за 2010–2020 годы.

Была проведена рекогносцировка пункта геомагнитных измерений на территории Научной базы геофизических практик Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова в Александровке (Калужская область). Геофизический полигон в Александровке – уникальное место, на котором практически круглогодично проходят различные мероприятия – от учебных практик студентов-геофизиков и курсов повышения квалификации до научных школ и семинаров, а также испытания новой аппаратуры. База в Александровке является современным и полностью оснащённым учреждением. Намечены планы по развитию пункта геомагнитных измерений до уровня полномасштабной обсерватории.

В период с 11 января по 24 ноября 2021 года на магнитной обсерватории «Климовская» по стандартам ИНТЕРМАГНЕТ были выполнены 520 измерений абсолютных значений магнитного склонения и наклонения. С конца 2018 года обеспечивается высокий контроль состояния векторного магнитометра, точность построения окончательной базисной линии и высокое качество квазиокончательных данных. Разброс значений базисной линии достаточно мал. Был выполнен ряд измерений абсолютных значений на магнитной обсерватории «Гюлагарак» (Республика Армения), развиваемой совместными усилиями ГЦ РАН и Института геофизики и инженерной сейсмологии Национальной академии наук Республики Армения с 2017 года. Было продолжено пополнение непрерывного ряда абсолютных измерений на геомагнитной обсерватории «Санкт-Петербург», входящей в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ с 2016 года. За период с 5 января по 23 ноября 2021 года выполнено 94 измерения.



С июня 2020 года в составе аппаратно-программного комплекса МАГНУС [Gvishiani et al., 2016; Kudin et al., 2021] в ГЦ РАН функционирует система автоматизированного расчета квазиокончателных геомагнитных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ и их отправки в геомагнитный информационный узел ИНТЕРМАГНЕТ в Парижском институте физики Земли (IPGP). Введение данной системы в эксплуатацию сделало возможным оперативную загрузку на сервер ИНТЕРМАГНЕТ квазиокончателных данных магнитной обсерватории «Санкт-Петербург» (IAGA-код SPG) [Sidorov et al., 2017]. Массивы квазиокончателных данных за месячный период, включая данные 2021 года, становятся доступными через веб-сайт ИНТЕРМАГНЕТ (<https://intermagnet.org>) с задержкой не более 1 месяца.

За период с 01.12.2020 по 01.12.2021 общий объём геомагнитных данных, поступивших в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» ГЦ РАН, составил 162,77 Гб.

3.5 Развитие функционала АПК МАГНУС

Результатом 2021 года явились унифицированные интерфейсы обработки временных рядов, позволяющие увеличить качество и скорость подготовки квазиокончателных и окончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ (рис. 3.15). Разработка и применение соответствующей системы позволило уменьшить задержку в отправке месячных массивов квазиокончателных данных до нескольких дней. На 2021 год всего около 40 обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ из более чем 130 обеспечивают сравнимую скорость подготовки и качество предоставляемых данных. Широкие возможности АПК МАГНУС в части выборки и интеллектуальной обработки геомагнитных данных позволили в кратчайшие сроки (менее полугода) пройти трехуровневую проверку ИНТЕРМАГНЕТ в отношении набора окончательных данных обсерватории «Санкт-Петербург» за 2020 год.

Наряду с улучшениями существующих подсистем АПК МАГНУС, сделан шаг в направлении создания прогностических сервисов, позволяющих прогнозировать эффекты космической погоды на основе накопленных данных $d\mathbf{B}/dt$. Такие возмущения являются источником возникновения геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), приводящих к преждевременному износу или выходу из строя высоковольтных трансформаторов. Выделенные экстремальные возмущения сохраняются в БД МАГНУС для последующего анализа статистических характеристик и построения прогнозов возмущений.

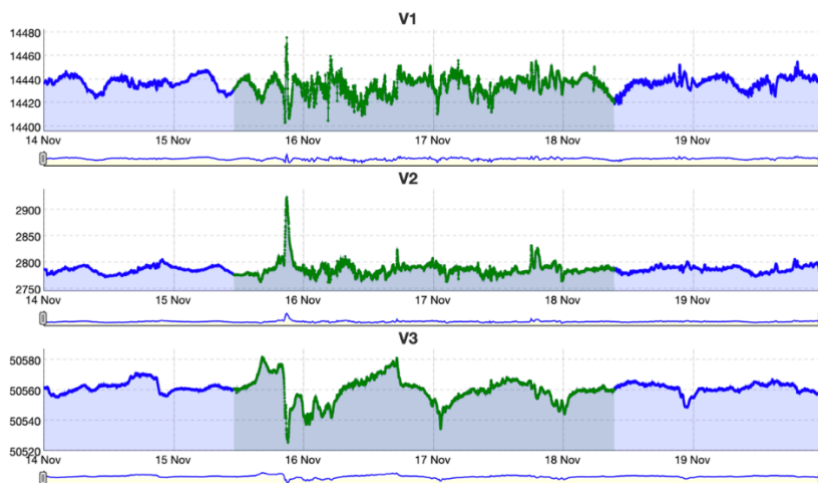


Рисунок 3.15 – Разметка «защищенного» фрагмента данных на обсерватории «Санкт-Петербург» (Ленинградская обл.) за период геомагнитной бури 15–19 ноября 2021 года.

Реализованные технические решения и процедуры по своему уровню не уступают аналогичным разработкам международных научных групп. Расширение в пределы СНГ единого сегмента геомагнитных обсерваторий с унифицированным сбором, обработкой и систематизацией данных средствами аппаратно-программного комплекса МАГНУС обеспечивает научное сообщество высокоточными данными о МПЗ, которые широко востребованы во многих фундаментальных и прикладных задачах.

Список использованных источников

- Möstl, C., Amerstorfer, T., Palmerio, E., Isavnin, A., Farrugia, C. J., Lowder, C., et al. (2018). Forward modeling of coronal mass ejection flux ropes in the inner heliosphere with 3DCORE. *Space Weather*, 16(3), 216–229. <https://doi.org/10.1002/2017SW001735>
- Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications // *Earth, Planets and Space*. 2015. 67:108. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5>
- Fan, Y., & Gibson, S. E. (2003). The emergence of a twisted magnetic flux tube into a preexisting coronal arcade. *The Astrophysical Journal*, 589(2), L105–L108. <https://doi.org/10.1086/375834>
- Luoni, M. L., Demoulin, P., Mandrini, C. H., & van Driel-Gesztelyi, L. (2011). Twisted flux tube emergence evidenced in longitudinal magnetograms: Magnetic tongues. *Solar Physics*, 270(1), 45–74. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9731-8>
- Poisson, M., Demoulin, P., Lypez Fuentes, M., & Mandrini, C. H. (2016). Properties of magnetic tongues over a solar cycle. *Solar Physics*, 291(6), 1625–1646. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0926-x>
- Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., Krasnoperov R. (2021). Historical K index data collection of Soviet magnetic observatories, 1957–1992. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1987–1999. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1987-2021>



- Kurazhkovskaya N. A. (2020). Global disturbance of Earth's magnetosphere and its connection with space weather. *Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 6, Iss. 1, p. 41–49. <https://doi.org/10.12737/stp-61202005>
- Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Добровольский М. Н., Иванченко О. В., Камаев Д. А. Регрессионное дифференцирование и регрессионное интегрирование конечных рядов. *Чебышевский сборник*. 2021;22(2):27–47. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-2-27-47>
- С. М. Агаян, А. А. Соловьев, Ш. Р. Богоутдинов, Ю. И. Николова. Регрессионные производные и их применение в изучении геомагнитных джерков // *Геомагнетизм и аэрномия*, том 59, №3. 2019. С. 383–392. doi: 10.1134/S0016794019030027
- Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Булычев А. А., Соловьев А. А., Фирсов И. А. Проекционный метод решения систем линейных уравнений и его применение в гравиметрии // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 2020, т. 493, № 1, 58–62, doi: 10.31857/S2686739720070051
- Curto, J.-J., T. Araki, and L. F. Alberca (2007). Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification, *Earth Planets Space*, 59, I-XII.
- Alken P., Thébaud E., Beggan C. D., Amit H., Aubert J., Baerenzung J., Bondar T. N., Brown W. J., Califf S., Chambodut A., Chulliat A., Cox G. A., Finlay C. C., Fournier A., Gillet N., Grayver A., Hammer M. D., Holschneider M., Huder L., Hulot G., Jager T., Kloss C., Korte M., Kuang W., Kuvshinov A., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Livermore P. W., Lowes F. J., Macmillan S., Magnes W., Manda M., Marsal S., Matzka J., Metman M. C., Minami T., Morschhauser A., Mound J. E., Nair M., Nakano S., Olsen N., Pavón-Carrasco F. J., Petrov V. G., Ropp G., Rother M., Sabaka T. J., Sanchez S., Saturnino D., Schnepf N. R., Shen X., Stolle C., Tangborn A., Tøffner-Clausen L., Toh H., Torta J. M., Varner J., Vervelidou F., Vigneron P., Wardinski I., Wicht J., Woods A., Yang Y., Zeren Z., Zhou B. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // *Earth, Planets and Space*. – 2021. – Vol. 73. – Art. 49. – P. 1–25. DOI: 0.1186/s40623-020-01288-x
- Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R. (2016). Automated Hardware and Software System for Monitoring the Earth's Magnetic Environment. *Data Science Journal*, 15, p.18. doi:10.5334/dsj-2016-018.
- Kudin D. V., Soloviev A. A., Sidorov R. V., Starostenko V. I., Sumaruk Yu.P., Legostaeva O. V. Advanced Production of Quasi-Definitive Magnetic Observatory Data of the INTERMAGNET Standard // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2021. – Vol. 61.– No. 1 – P. 54–67. DOI: 10.1134/S0016793221010096
- Sidorov R., Soloviev A., Krasnoperov R., Kudin D., Grudnev A., Kopytenko Y., Kotikov A., Sergushin P. Saint Petersburg magnetic observatory: from Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. – 2017. – No. 6. – P. 473–485. DOI: 10.5194/gi-6-473-2017



4 Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных

Номер темы в ИСГЗ: FMGN-2019-0004

Номер госрегистрации: АААА-А19-122012500333-6

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

4.1 Совершенствование управления массивами геофизических данных.

Информационное обеспечение научных исследований

В 2021 году в Мировых центрах данных (МЦД) по солнечно-земной физике (СЗФ) и физике твердой Земли (ФТЗ) проводилась работа по совершенствованию сложившейся системы управления данными, увеличению информационных ресурсов, переводу исторических данных в электронный вид и обеспечению свободного доступа к данным. Являясь регулярными членами Мировой системы данных (МСД) Международного научного совета, МЦД строят свою работу на основе Конституции МСД, решений ее Научного комитета и Стратегического плана на 2019–2023 годы. (https://www.worlddatasystem.org/organization/constitution_and_bylaws/).

Задача увеличения объемов качественных информационных ресурсов МЦД решается путем сбора новых данных, ретроспективным пополнением архивов и переводом данных в электронный вид. Новые данные, поступившие из стационарных обсерваторий, центров обработки данных и научных институтов, проходят процедуры анализа, проверки качества, резервного копирования и регистрации. При необходимости создаются описания данных, описания форматов, формируются метаданные.

В МЦД по солнечно-земной физике в 2021 году в разделе сайта «Геомагнитные вариации» (http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_variations.ru.html) дополнены массивы среднечасовых и минутных значений элементов магнитного поля Земли девяти обсерваторий (табл. 4.1), значений геомагнитного K -индекса данными обсерваторий «Мыс Шмидта», «Новосибирск», «Паратунка», «Хабаровск», «Магадан» и «Ленинград». Сформированная в 2019–2020 годах «База исторических данных о геомагнитном индексе K магнитных обсерваторий бывшего СССР, 1957–1992 гг.» зарегистрирована в Реестре баз данных, получено Свидетельство № 2021622162 от 18 октября 2021 года. Опубликована статья с описанием этой базы данных [Sergeyeva et al., 2021].

Подготовлены и опубликованы на сайте Центра цифровые изображения магнитограмм (6952 файлов) обсерваторий «Аргентинские острова» за 1961–1968 и 1974–1979 годы и «Иркутск» за 1970–1973 годы вместе с сопроводительными документами.



Таблица 4.1 – Новые данные среднечасовых и минутных значений элементов геомагнитного поля, полученные в 2021 год и размещенные на сайте МЦД по СЗФ

Код обсерватории	Название обсерватории	Среднечасовые данные, годы	Минутные данные, годы
AIA	Аргентинские о-ва	2018	2018
BOX	Борок	2019–2020	2020
IRT	Иркутск	2019, 2020	2020
KHB	Хабаровск	2018, 2 019	2018, 2019
MNK	Минск		2019
MOS	Москва	2019, 2020	2019, 2020
NVS	Новосибирск	2020	2020
PET	Паратунка	2005, 2020	2020
VOS	Восток	1999–2002, 2004–2010, 2019	1999–2002, 2004–2010, 2019

Начата работа по оцифровке магнитограмм, содержащих записи 15 магнитных бурь. Для оцифровки используется программа Waveform Digitizer, разработанная в ГЦ РАН. Проведена оцифровка магнитограмм обсерваторий «Ашхабад», «Иркутск», «Магадан» и «Новосибирск» по двум бурям.

В 2021 году в МЦД по СЗФ был передан для хранения и публикации на сайте цифровой Каталог магнитных бурь зоны Одесской магнитной аномалии периода мониторинга потоков космических радиоисточников на радиотелескопе «УРАН-4», подготовленный коллективом авторов из Одесской обсерватории «УРАН-4» Радиоастрономического Института НАНУ и Института геофизики им. С. И. Субботина НАНУ. В каталоге содержатся данные о магнитных бурях, произошедших в периоды 1987–1994 и 2000–2009 годы, предоставленные магнитной обсерваторией «Одесса». Каталог опубликован на сайте Центра вместе с описанием на русском и английском языках. Каталог присвоен цифровой идентификатор объекта DOI <https://doi.org/10.2205/Mag-St-08>.

В разделе «Ионосферные явления» опубликованы ионосферные данные станции «Москва» (ИЗМИРАН), содержащие значения 18 ионосферных параметров за период 11.2020–12.2021 годы (http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric_phenomena.ru.html). Раздел «Солнечная активность» (http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.ru.html) дополнен новыми данными за период с января 2018 года по октябрь 2021 года по видам наблюдений «Солнечные пятна», «Секторная структура межпланетного магнитного поля», «Поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см (2800 МГц). Подготовлен и опубликован «Каталог солнечных вспышечных событий 25-го цикла солнечной активности».

В 2021 году продолжалась работа по проекту «Сохранение исторических данных» – преобразование данных обсерваторий РФ и стран СНГ, хранящихся в архивах МЦД по СЗФ



в виде бумажных документов, в электронные документы (формат PDF). Переведены в электронный вид по дисциплине «Ионосферные явления» данные 14-ти ионосферных станций, 42000 документов формата А3. Данные включают результаты вертикального зондирования ионосферы (таблицы и графики среднечасовых значений параметров ионосферы), измерения поглощения радиоволн, ионосферных ветров, атмосферных радиошумов.

Продолжалось формирование базы данных «Геомагнетизм» (<http://stp.wdcb.ru/index.php>), усовершенствована программа, обрабатывающая входные параметры запроса, осуществляющая поиск данных в базе по параметрам запроса и выдающая результат пользователю в одном из трех возможных форматов. Сделан функционал выдачи данных запроса пользователю в zip-архиве, содержащем текстовый файл с данными. Внесены изменения в оформление главной страницы сайта, усовершенствован модуль загрузки данных в базу.

В МЦД по физике твердой Земли ведется регулярная работа по формированию каталогов землетрясений сейсмически активных регионов Северной Евразии в виде текстовых файлов в кодах ASCII на основании данных из ежегодников «Землетрясения Северной Евразии» [*Землетрясения...*, 1997–2020]. В этой работе используется разработанное в МЦД по ФТЗ программное обеспечение, позволяющее проводить проверку качества данных и формировать данные в нужном формате. В 2021 году пересмотрены, дополнены и сформированы в новом формате каталоги землетрясений регионов «Якутия» 1962–2014 годов, «Северо-Восток России» 1968–2014 годов, «Сахалин» 1962–2014 годов, «Арктика» 1965–2014 годов, «Приамурье–Приморье» 1974–2014 годов, «Прибайкалье – Забайкалье» 1962–2014 годов, «Алтай и Саяны» 1962–2014 годов, «Курило-Охотский» 1965–2014 годов и «Камчатка и Командорские острова» 1961–2014 годов. Каталоги содержат параметры гипоцентров, магнитуды, энергетические классы. Проведен анализ данных и составлены описания каталогов и форматов.

Раздел «Сейсмология» сайта МЦД по ФТЗ (<http://www.wdcb.ru/sep/seismology/>) дополнен поступающими из Единой геофизической службы РАН еженедельными данными в виде каталога и бюллетеня за период 02.2018–12.2020 годов.

Переведены в цифровой вид в текстовый формат в кодах ASCII исторические каталоги землетрясений регионов бывшего СССР из «Атласа землетрясений в СССР» [*Атлас...*, 1962], содержащие информацию о сейсмических событиях за период 1911–1957 годов. Атлас в электронном виде в формат PDF опубликован на сайте Центра (http://www.wdcb.ru/sep/seismology/hypocenter_data.ru.html).



В 2021 году продолжалось формирование на сайте МЦД нового тематического раздела «Арктика – Антарктика» (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/). В разделе «Геомагнитные данные» для Антарктики обеспечен доступ к цифровым изображениям магнитограмм станции «Аргентинские острова» за 1961–1968 и 1974–1979 годы, вместе с таблицами часовых значений, сопроводительными текстами и данными о *K*-индексе. Создан раздел «Геомагнитные данные» для Арктики (рис. 4.1), в котором размещены среднечасовые и минутные значения элементов геомагнитного поля, значения *K*-индекса, цифровые изображения магнитограмм, зарегистрированные советскими и российскими обсерваториями, а также данные восьми дрейфующих станций «Северный полюс».

Геофизический центр Российской академии наук
Мировой центр данных по солнечно-земной физике Мировой центр данных по физике твердой Земли

http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_magn.ru.html

Арктика

АРКТИКА

- Геомагнитные данные
- Сейсмологические данные
- Тепловой поток
- Гравиметрические данные
- Ионосферные данные
- Космические лучи
- Вулканы
- Тектоника (обзор работ последних лет)

АНТАРКТИКА

- Геомагнитные данные
- Сейсмологические данные
- Тепловой поток
- Гравиметрические данные
- Космические лучи
- Вулканы
- Тектоника (обзор работ последних лет)

[На основную страницу](#)

Геомагнитные данные

- Значения элементов геомагнитного поля (среднечасовые и минутные) с 1956 г.
- Значения *K* индекса по данным станций в Арктике с 1957 г.
- Цифровые изображения магнитограмм станций в Арктике.

Геомагнитные станции в Арктике

Приведена информация о станциях, данные которых представлены на сайте

Название станции	Код	Географические координаты	
		широта	долгота
Амдерма	AMD	69.47°N	61.42°E
Архангельск	ARK	64.58°N	40.50°E
Белый остров	BEY	73.30°N	70.00°E
Мыс Челюскин	CCS	77.72°N	104.28°E
Чокурдах	CHD	70.62°N	147.89°E
Мыс Каменный	СКА	68.50°N	73.60°E
Мыс Шмидта	CPS	68.92°N	179.48°W
Мыс Узлен	CWE	66.17°N	169.83°W
Остров Диксон	DIK	73.54°N	80.56°E
Остров Хейса	HIS	80.62°N	58.05°E
Карасаеви	KHS	71.13°N	66.83°E
Остров Котельный	KTN	75.94°N	137.71°E
Ленинград (Воейково)	LNN	59.95°N	30.70°E
Магадан	MGD	60.12°N	151.02°E
Лопарская (Мурманск)	MMK	68.25°N	33.08°E
Певек	PBK	70.83°N	170.90°E
Подкаменная Тунгуска	POD	61.40°N	90.00°E
Сейха	SEY	70.10°N	72.50°E
Средникан	SRE	62.43°N	152.32°E
Бухта Тикси	TIK	71.58°N	129.00°E
Бухта Тихая	TKH	80.30°N	52.80°E
Остров Визе	VIZ	79.48°N	79.98°E
Якутск	YAK	62.02°N	129.72°E
Зырянка	ZYK	65.75°N	150.78°E

Дрейфующие станции (координаты дрейфа):

Северный полюс 5 NP05	Северный полюс 10 NP10
Северный полюс 6 NP06	Северный полюс 12 NP12
Северный полюс 7 NP07	Северный полюс 13 NP13
Северный полюс 8 NP08	Северный полюс 22 NP22

Рисунок 4.1 – Страница сайта «Арктика – Антарктика», открывающая доступ к геомагнитным данным, зарегистрированным в Арктике

В разделе «Гравиметрические данные» для Арктики опубликованы результаты исследования структуры осадочных бассейнов в Арктической зоне Восточной Азии на основе декомпенсационных аномалий силы тяжести [Sidorov et al., 2021], проведенного в

ГЦ РАН (рис. 4.2). Представлены данные об изостатических аномалиях силы тяжести, аномалиях силы тяжести в редукции Буге, топографии, плотности осадочных отложений, две модели мощности осадочных отложений, а также гриды всех данных в формате ASCII-гридов для геоинформационных систем.

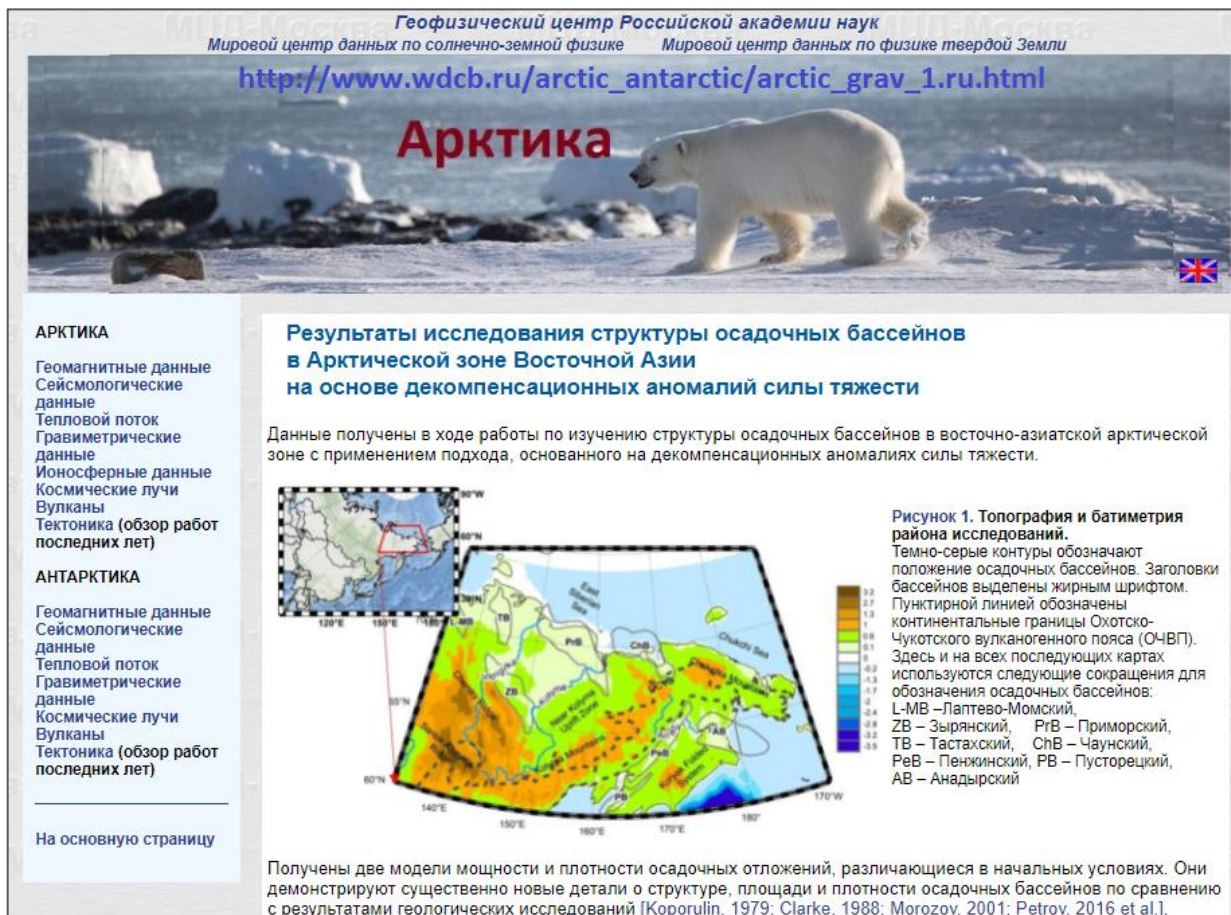


Рисунок 4.2 – Страница раздела «Гравиметрические данные» с результатами исследования структуры осадочных бассейнов в Арктической зоне Восточной Азии

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 с присвоением DOI четырех наборов данных (рис. 4.3). Страницы отклика для зарегистрированных наборов данных, доступны на веб-сайте Центрального репозитория ESDB (<http://esdb.wdcb.ru/>). Включение данных с DOI в различные индексные системы важно для повышения эффективности использования данных, развития культуры цитирования данных, повышает заинтересованность обсерваторий в качестве производимых данных и регулярной передаче их в МЦД.



The screenshot shows the Earth Science DataBase (ESDB) website interface. At the top left is the logo for Earth Science DataBase, Geophysical Center RAS. On the right, there is a search bar with the text "Please enter the doi that you want to resolve:" and a text input field containing "10.2205/KLI2011". Below the input field is a "SUBMIT" button. The Crossref logo is also visible in the top right corner. Below the search bar, there are navigation links for "HOME", "DOI", and "CONTACTS", and a search icon with the text "Search". A dropdown menu shows the number "10". The main content area displays a table with the following data:

Title	Published Date
Geomagnetic Observations in the Russian Arctic	13 December 2021
2020 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	22 December 2021
Magnetic storms catalog for monitoring data of space radio sources fluxes at RT URAN-4 in the zone of the Odessa magnetic anomaly (1987–1994 and 2000–2009)	01 December 2021
Results for the article "Sedimentary basins of the Eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompensative gravity anomalies"	01 December 2021

At the bottom of the page, there is a copyright notice: "© 2014–2022 Geophysical Center RAS".

Рисунок 4.3 – Интернет-страница главного репозитория проекта ESDB, сформированная в 2021 году <http://esdb.wdcb.ru/doi/2021.html>

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 2021 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 [Самохина и др., 2018]. Все результаты зарегистрированы в РОСПАТЕНТ [Rybkina et al., 2018; Одинцова и др., 2018; Odintsova et al., 2018].

В 2021 году развитие сферической визуализации произошло сразу по нескольким направлениям:

- доработка функционала основного ПО ORBUS 2.0 в плане поддержки новых форматов данных и интерактивности управления;
- выход новой версии веб-приложения – ORBUS Web 1.1;



- разработка нового продукта для интерактивной работы со сферическим экраном посредством Touchscreen – ORBUS Sensor 1.0;
- расширение базы сферических визуализаций 3D моделями и дополненной реальностью.

Доработка функционала основного ПО ORBUS 2.0

Усовершенствована интерактивность управления презентацией сферических слайдов и обеспечение поддержки новых форматов данных (таблицы, каталоги, ГИС-слои, растры, share-файлы, онлайн-потoki и др.)

Среди растровых форматов был проведен анализ возможностей формата WebP (Web Picture), реализующего алгоритмы сжатия с потерями и без потерь, а также поддерживающий анимацию и прозрачность. Среди векторных форматов был рассмотрен формат SVG, не являющийся геоформатом, но позволяющий использовать широкий спектр визуальных эффектов.

ORBUS Web 1.1

ПО «Виртуальный глобус ORBUS Web 1.1» предназначено для платформонезависимой визуализации планетарных данных в интерактивном и естественном представлении непосредственно из хранилища ORBUS. Orbus Web – веб-версия десктопного приложения Orbus. Отличительными особенностями Orbus Web являются:

- возможность расположения 3D объектов на поверхности сферы (для десктопной версии нужно применять дополненную реальность);
- более удобный процесс масштабирования (для десктопной версии используется механизм лупы);
- отсутствие возможности взаимодействия со сферическим экраном.

По сравнению с предыдущей версией, в ORBUS Web 1.1 помимо базовых картографических слоёв, таких как слой-изображение и видеоанимационный слой, выполненных в цилиндрической равнопромежуточной проекции, обеспечена поддержка новых типов слоёв:

- (видеоанимационный) слой – кубическая карта кубетар;
- векторный слой sharefile;
- слой надписей и иконок в привязке к географическим координатам (рис. 4.4 и 4.5).

На данную версию ПО получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ ORBUS Web 1.1 № 2021666638 от 18 октября 2021 года.

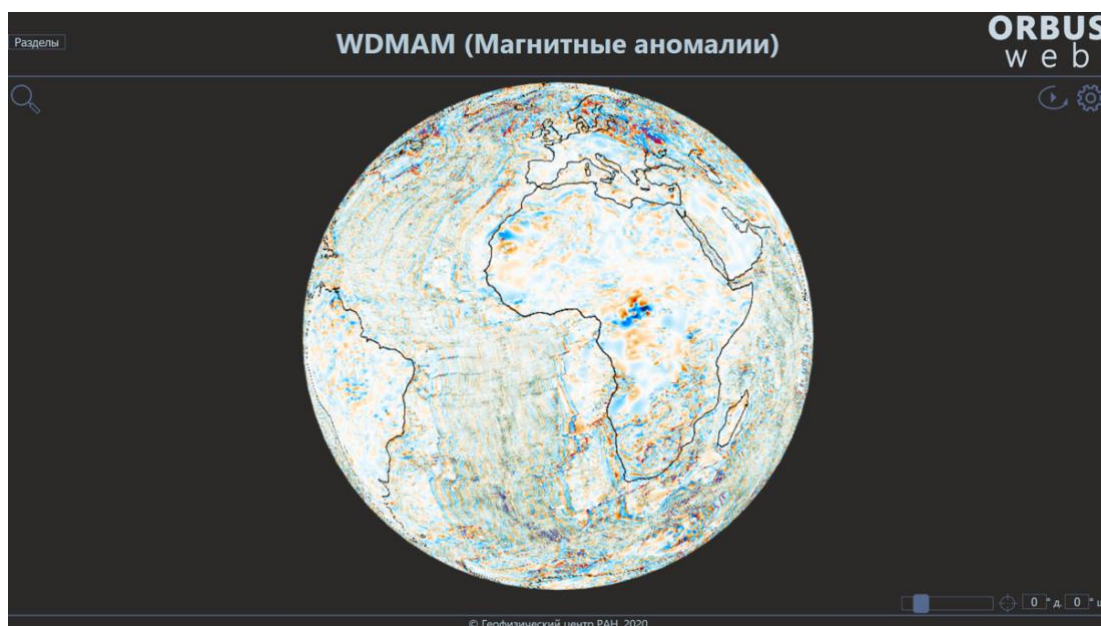


Рисунок 4.4 – Пример работы программы: визуализация магнитных аномалий

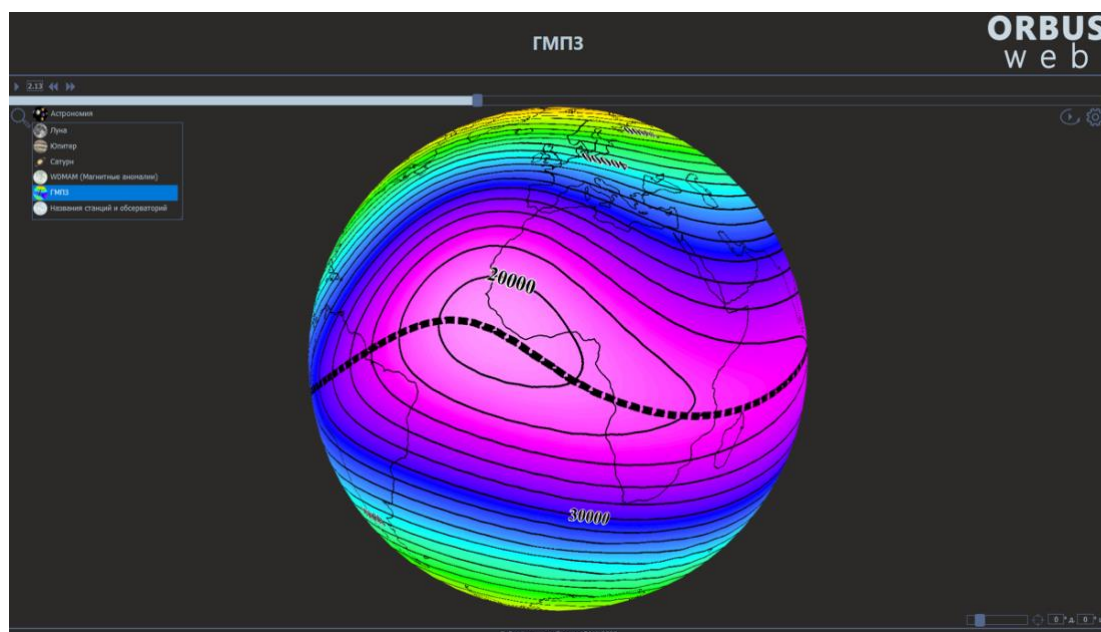


Рисунок 4.5 – Пример работы программы: визуализация Магнитного поля Земли

ORBUS Sensor 1.0

Orbus Sensor – новая система, позволяющая реализовать непосредственное взаимодействие пользователя со сферическим экраном посредством касаний поверхности. Механизм работы основан на распознавании изображения в ИК-диапазоне. В таком случае внутри сферического акрилового купола располагается ИК-камера с линзой типа «фишай» и подсвечивающимися диодами (рис. 4.6а). Камера записывает изображение, на котором распознается рука человека, приближенная к поверхности глобуса (рис. 4.6б).

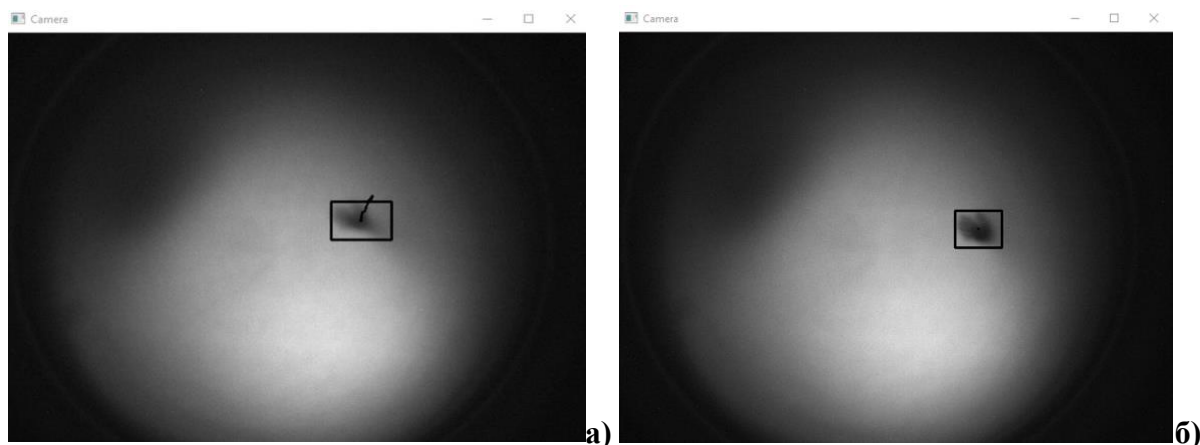


Рисунок 4.6 а) – схема стенда, б) – ИК изображение

Изображение сравнивается с изначальным фоновым, полученная разностная картина позволяет вычислить контур руки. Для такого контура можно высчитать охватывающий прямоугольник с центральной точкой и далее следить за перемещением центральной точки, записывая траекторию перемещения.

На данное ПО получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668672 от 18 ноября 2021 года.

3D-модели

Процесс создания 3D-моделей является крайне творческой и многоэтапной работой. Перед непосредственным 3D-моделированием изучаются формы и референсы будущих объектов, создаются 2D-подложки и текстуры. Предварительно отрисовываются сложные 2D анимации и текстурные карты, создающие иллюзию дополнительного 3D-объема для 3D-моделей.

Созданная база данных 3D-визуализаций ORBUS AR 1.0 представляет собой 15 3D-моделей, включение в 3D-сцену которых позволяет создавать анимированные и качественно иллюстрированные тематические планетарные визуализации 3D-пространства виртуального глобуса. Тематически данные визуализации разделяются на астрономические и геофизические явления (например, вспышки на Солнце (рис. 4.7), МПЗ (рис. 4.8) и т. д.) и исторические карты (объемные элементы эпох, позволяющие наглядно проследить величайшие исторические открытия). Объем базы данных на настоящий момент составляет 946 Мбайт.

На данную БД получено Свидетельство о государственной регистрации базы данных ORBUS AR 1.0 № 2021622563 от 19 ноября 2021 года.



Рисунок 4.7 – Вспышка на Солнце

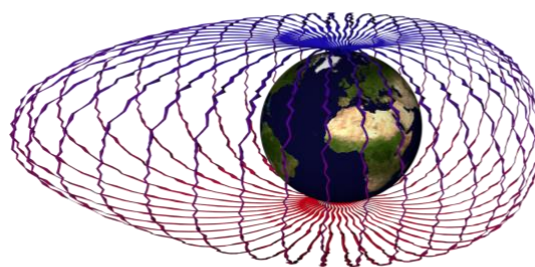


Рисунок 4.8 – Изменение МПЗ

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 Рыбкина, 2018].

Совершенствование функционала ПО ORBUS и расширение семейства продуктов говорит о растущем интересе к сферической визуализации как со стороны научного мира, так и со стороны обычных пользователей (посетители музеев, школьники, студенты). Постоянное пополнение базы данных ORBUS новыми тематиками позволяет охватывать все большее количество областей применения сферического экрана в качестве лучшего наглядного пособия при изучении глобальных процессов, протекающих на нашей планете и других планетах Солнечной системы. 3D-моделирование и дополненная реальность выводит сферическую визуализацию на принципиально новый уровень визуальной репрезентативности, а оснащение самого Комплекса возможностью управления при помощи Touchscreen делает процесс управления для пользователя максимально интуитивным и погружающим в визуализацию.

4.3 Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений

Продолжились исследования, направленные на анализ почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. В первую очередь рассматривался ставший классическим подход EPA (Earthquake-Prone Areas), разработанный в 1972 году И. М. Гельфандом и В. И. Кейлис-Бороком [Гвишиани и др., 2020]. Вторым направлением исследований было проведение распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе [Dzeboev et al., 2019].

На основе анализа полувекового развития и применения подхода ЕРА сделан вывод, что он является эффективным инструментом для определения мест возможного возникновения будущих сильных землетрясений. Это подтверждается анализом данных о сильных землетрясениях, которые произошли в изученных регионах после получения соответствующих результатов. Дополнительными аргументами в пользу достоверности ЕРА служит успех многочисленных контрольных экспериментов, эффективное применение теории динамических и предельных задач распознавания, а также устойчивость результатов относительно варьирования алгоритмов распознавания [Гвишиани и др., 2020].

Необходимо подчеркнуть, что в течение 50 лет развития ЕРА была создана эффективная методика распознавания мест возможного возникновения землетрясений для различных пороговых магнитуд в горных странах и на платформенных территориях. Полученные путем применения ЕРА результаты вносят существенный вклад в проведение сейсмического районирования, которое, в свою очередь, является одним из основных этапов оценки сейсмической опасности [Peresan et al., 2011]. Подробный обзор подхода ЕРА дан в работе [Гвишиани и др., 2020].

Говоря о недостатках метода ЕРА, отметим следующее. В результате распознавания изучаемая территория (а фактически конечное множество объектов распознавания W) алгоритмически разделяется на две непересекающиеся части: B , в которой возможно возникновение сильного ($M \geq M_0$) землетрясения, и H , где возникновение такого землетрясения невозможно. При этом множество обучения $W_0 \subset W$ состоит из двух непересекающихся подмножеств: B_0 – объекты обучения высокосейсмичного класса B и H_0 – объекты обучения низкосейсмичного класса H .

Формирование материала обучения является основополагающим этапом распознавания методом ЕРА. В обучающую выборку высокосейсмичного класса включаются объекты, в окрестностях которых известны эпицентры сильных ($M \geq M_0$) землетрясений. Логично предположить, что сформированная таким образом обучающая выборка B_0 с большой вероятностью не содержит априорных ошибок или их количество так мало, что не может оказать существенного влияния на результат распознавания [Гвишиани и др., 2017; Дзобоев и др., 2019].

Формирование аналогичного «чистого» материала обучения класса H затруднительно. В обучающую выборку H_0 включаются либо все объекты, не вошедшие в B_0 , либо объекты, в окрестностях которых известны лишь землетрясения с магнитудой $M < M_0 - \delta$, где $\delta > 0$ и, как правило, имеет значение 0,5 или 1 [Гвишиани и др., 1988]. По сути самой задачи ЕРА, являющейся предельной проблемой распознавания [Гвишиани и



Гурвич, 1992], низкосейсмичный класс обучения содержит в себе потенциальные ошибки.

Многолетняя практика применения метода ЕРА в многочисленных горных странах мира показала необходимость избегать в распознавании асимметричности обучения. Для повышения достоверности ЕРА-результатов необходимо дополнить блок распознавания алгоритмом с обучением по единственному высокосейсмичного классу B_0 , включающему в себя объекты, в окрестности которых сильные землетрясения уже известны.

Другим недостатком метода ЕРА является то, что определение объектов распознавания и измерение их геолого-геофизических и геоморфологических характеристик представляет собой трудоемкую задачу. Для ее решения необходимо использовать данные, которые не всегда доступны для рассматриваемого региона, или ограничиваться характеристиками, для которых возможно единообразное определение их значений для каждого объекта. Работа по составлению схемы морфоструктурного районирования является творческой и выполняется высококвалифицированными специалистами в большей степени вручную. Возможность использования выбранных объектов распознавания необходимо обосновывать для каждого региона отдельно. Сказанное говорит о все еще существующей значительной сложности применения метода ЕРА на практике. Это приводит к необходимости разработки новых современных алгоритмических систем, позволяющих автоматизировать процесс распознавания [Гвишиани и др., 2020].

Процесс определения потенциальных зон высокой сейсмической опасности представляет собой сложную систему. По этой причине новый метод распознавания высокосейсмичных районов необходимо должен быть инструментом современного системного анализа. С его помощью должна четко определяться граница, разделяющая высоко- и низкосейсмичные классы объектов.

С использованием разработанного в Геофизическом центре РАН алгоритма классификации с одним классом обучения «Барьер-3» [Гвишиани и др., 2017] в качестве блока распознавания ЕРА определены места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$ на Кавказе. В качестве объектов распознавания брались пересечения морфоструктурных линеаментов. Обучающая выборка высокосейсмичного класса формировалась на основе каталога коровых землетрясений Кавказа с $M \geq 6,0$. В качестве обучающей выборки высокосейсмичного класса использовались лишь 16 пересечений морфоструктурных линеаментов, в 25-км окрестности которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6,0$ за период 1900–1992 годы. Исходя из порога магнитуды распознаваемых мест землетрясений ($M \geq 6,0$), в качестве окрестностей, внутри которых

вычислялись значения характеристик на Кавказе, брались круги радиусом 25 км [Гвишиани и др., 2017].

На рис. 4.9 эллипсами показан результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$ на Кавказе, полученный с помощью алгоритма «Барьер-3». Сплошными эллипсами показаны объекты единственного класса обучения алгоритма. По итогам распознавания к высокосейсмичному множеству пересечений линеаментов отнесено 108 из 237 рассматриваемых объектов распознавания. Из рассмотрения модуля распознавания алгоритмом «Барьер-3» как блока ЕРА [Гвишиани и др., 1988] следует, что совокупность приведенных на рис. 4.9 эллипсов с центрами в соответствующих 108 пересечениях линеаментов может быть интерпретирована как искомые места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$ на Кавказе.

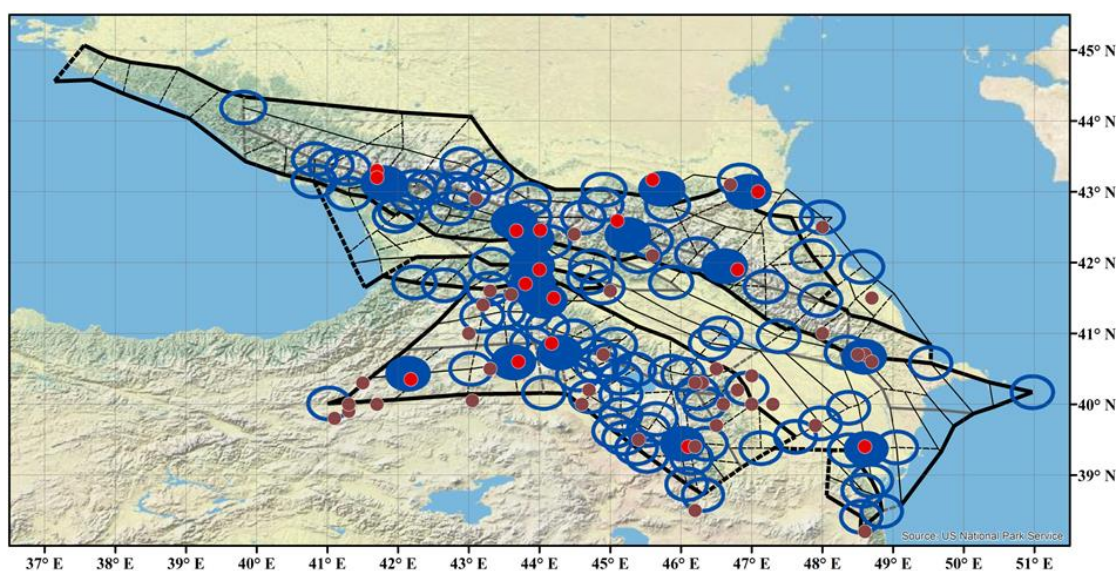


Рисунок 4.9– Места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$ на Кавказе, распознанные алгоритмом «Барьер-3», и эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$: красные круги – за период 1900–1992 годы, коричневые круги – до 1900 года.

Сплошными эллипсами показано множество обучения единственного высокосейсмичного класса

Следует отметить, что помимо 16 объектов из обучающей выборки высокосейсмичными объявлены 92 пересечения из 221, составлявших материал экзамена алгоритма. «Барьер-3» распознал как опасные 45.5% от общего числа объектов. На рис. 4.10 представлены гистограммы, характеризующие вклад используемых 11-ти геолого-геофизических характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» подмножества пересечений линеаментов, в окрестности которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6,0$. По оси ординат на рис. 4.10а показано среднее количество «срабатываний» характеристик при распознавании, на рис. 4.10б – количество попаданий характеристик в тройки «сильнейших» характеристик.

Из рис. 4.10 видно, что при распознавании на Кавказе алгоритмом «Барьер-3» наибольший вклад в формирование искомого высокосейсмического множества объектов вносят характеристики, отвечающие за высоты рельефа (H_{\max} и H_{\min}), площадь четвертичных пород (Q), высший ранг линеамента (HR), число линеаментов в окрестности (NLC), а также расстояния до ближайших линеаментов I-го ($R1$) и II-го ($R2$) рангов.

Пересечения линеаментов на Кавказе, распознанные алгоритмом «Барьер-3» как опасные для $M \geq 6,0$, на фоне всего множества объектов распознавания в своих окрестностях характеризуются большими значениями максимальных и минимальных высот ($H_{\max} \geq 2500$ м и $H_{\min} \geq 600$ м), небольшой площадью четвертичных пород ($Q \leq 30\%$), они образованы тремя или более линеаментами II-го или III-го рангов ($NLC \geq 3$, $HR = 2$ или $HR = 3$, $R2 \leq 30$ км) и находятся на сравнительно небольших расстояниях от линеаментов I-го ранга ($0 < R1 \leq 50$ км). Эти признаки, естественно, трактовать как критерии высокой сейсмичности на Кавказе. Из рис. 4.10 видно, что размах высот и сочетание типов рельефа также вносят вклад в формирование итогового результата [Dzeboev et al., 2019].

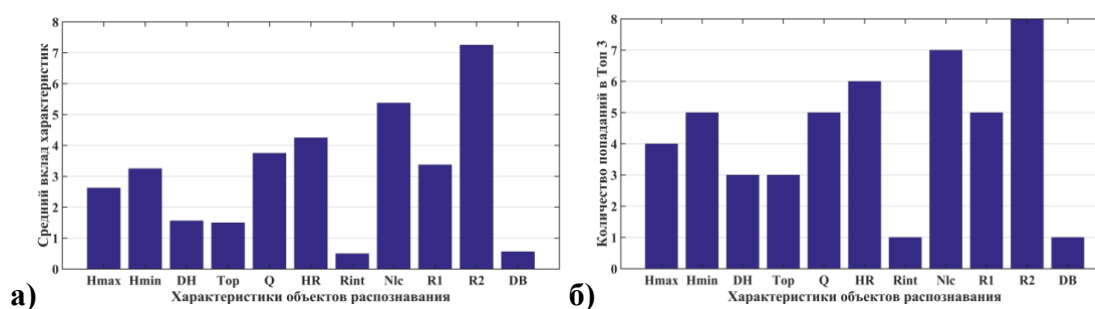


Рисунок 4.10 – Вклад характеристик объектов в распознавание алгоритмом «Барьер-3» высокосейсмического множества пересечений линеаментов на Кавказе:
 а) средний вклад характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших»

4.4 Большие данные в горнотехнических системах

Большие Данные (Бод) можно охарактеризовать как данные огромных объемов, представленные в разнородных формах, создаваемые и обрабатываемые с большой скоростью. Процесс их обработки включает перевод в вид, пригодный для анализа, организации, хранения, поиска и визуализации. Спутниковые системы навигации, широкополосные системы связи, «Интернет вещей», высокоскоростные оптоволоконные системы потоковой передачи данных и облачных хранилищ стали неотъемлемой частью жизни [Reinsel et al., 2017; Zhaohao et al., 2020]. Интеллектуальный анализ Бод позволяет выявлять неявные, глубокие взаимосвязи между, на первый взгляд, невзаимосвязанными процессами и явлениями.



Большой объем данных позволяет проводить всесторонний анализ различных характеристик изучаемого объекта. По мере появления разнообразных наборов данных их объединение может привести к всеобъемлющему восприятию одного и того же явления. Ранее при изучении того или иного явления исследователи были вынуждены использовать методы статистической выборки. Теперь они могут анализировать всю совокупность и даже получать доступ к данным, которые они не смогли бы даже оценить традиционным способом. Бод побуждают аналитиков принимать во внимание сложность и разнообразие мира при изучении наборов данных вместо того, чтобы пытаться достичь скрупулезных и совершенно точных результатов анализа, проведенного в искусственной и контролируемой среде [*Mayer-Schönberger and Cukier, 2013; Roberts and Sheremet, 2021*].

Критерий «трех V» устанавливает определяющие характеристики того, что некоторый набор объектов представляет собой Бод. Три V – это физический объем (Volume), скорость (Velocity) и разнообразие (Variety). Последнее V понимают не только как широкое разнообразие видов и типов данных, но и как возможность одновременной обработки структурированных и частично структурированных данных. Кроме трех V, отдельные исследователи выделяют дополнительные критерии, определяющие Бод.

Бод можно определить как наборы данных, объем, скорость, разнообразие которых настолько велики, что с применением обычных пользовательских инструментов их невозможно собирать, хранить, управлять или анализировать [*Manyika et al., 2011; Laney, 2001*]. Например, большое разнообразие означает разнопорядковость данных по объему, или разные типы источников поступления данных с разными структурами, а также вариативность направлений использования данных в различных целях и отраслях. Бод можно разделить на три типа: структурированные, полуструктурированные и неструктурированные. 80% мировых данных не структурированы.

Необходимо отметить, что аксиоматика Бод фактически является функцией времени и не может быть сформирована постоянным образом, как в классической математике. Осмысление масштабов Бод постоянно изменяется.

В науках о Земле наблюдается быстрый рост объемов генерируемых и анализируемых данных, однако, несмотря на это, не все геоданные можно отнести к Бод [*Gvishiani and Soloviev, 2020*]. В области горных наук методы анализа Бод все еще не получили широкого распространения, несмотря на значительные объемы генерируемых данных. Нарастающие темпы цифровой трансформации предприятий горнодобывающей отрасли позволяют прогнозировать взрывной рост интереса к использованию методов обработки Бод. Такой анализ даст возможность оптимизировать параметры



технологических процессов, моделей экономического развития, сохранения экологического равновесия и др.

Наиболее полно области эффективного использования Бод в горной промышленности освещены в работе [Nimmagadda et al., 2018]. Несмотря на явный прогресс, фундаментальные концепции, возможности и риски для горнодобывающей отрасли при управлении методами Бод все еще не ясны. Это обусловлено отсутствием комплексных исследований по ключевым аспектам Бод в горнодобывающей промышленности. Для преодоления этого разрыва требуется интеграция знаний из области Бод и горного дела. Согласно [Nimmagadda et al., 2018], после сбора, агрегирования, анализа и оценки Бод горнодобывающей отрасли можно достичь следующих конечных целей:

- повышения эффективности производственных процессов за счет оперативного принятия решений, контроля и оптимизации процессов в режиме реального времени;
- оптимизации затрат энергии по каждой технологической операции;
- улучшения логистики благодаря автоматизации и оптимизации процессов транспортирования;
- ускорения принятия решений благодаря мониторингу, анализу и прогнозу цен на полезные ископаемые в режиме реального времени, рационального распределения затрат во всех операциях добычи полезных ископаемых, а также ускорения взаимодействия между отделами и даже различными компаниями;
- сокращения нетехнологических простоев оборудования за счет объективного анализа коэффициента использования оборудования (КИО) и коэффициента технической готовности (КТГ) техники, а также мониторинга требуемых режимов работы;
- управления рисками на базе повышения уровня промышленной безопасности производства;
- улучшения оперативного управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР), т.е. прогноза потребности в запасных частях, оптимизации закупок и пр.;
- анализа различных сценариев развития горнотехнических систем в зависимости от конъюнктуры цен на полезные ископаемые и социальных аспектов жизни конкретного региона.

Модели управления данными должны быть направлены не только на оптимизацию параметров технологических процессов и экономическую эффективность. Высокий уровень травматизма в отрасли, социальные и экологические проблемы становятся все большими и большими глобальными вызовами. Исследования в области анализа Бод

горных наук должны быть направлены также на установление взаимосвязи горнотехнических систем с окружающей средой в интересах устойчивого развития.

По мере цифровой трансформации горнотехнических систем за последние 20 лет наблюдается экспоненциальный рост объема генерируемых данных (рис. 4.11). Это свидетельствует, что на рубеже веков данный процесс характеризовался генерированием до нескольких терабайт информации в год. В этот период широко внедряли геоинформационные системы, системы календарного планирования и финансовой отчетности. Широкое распространение получили системы автоматизированного управления обогатительными фабриками, основанные на принципах сбора, анализа получаемой информации и оптимизации технологических процессов. В меньшей степени до 2000-х годов осуществляли цифровую трансформацию процессов добычи твердых полезных ископаемых.

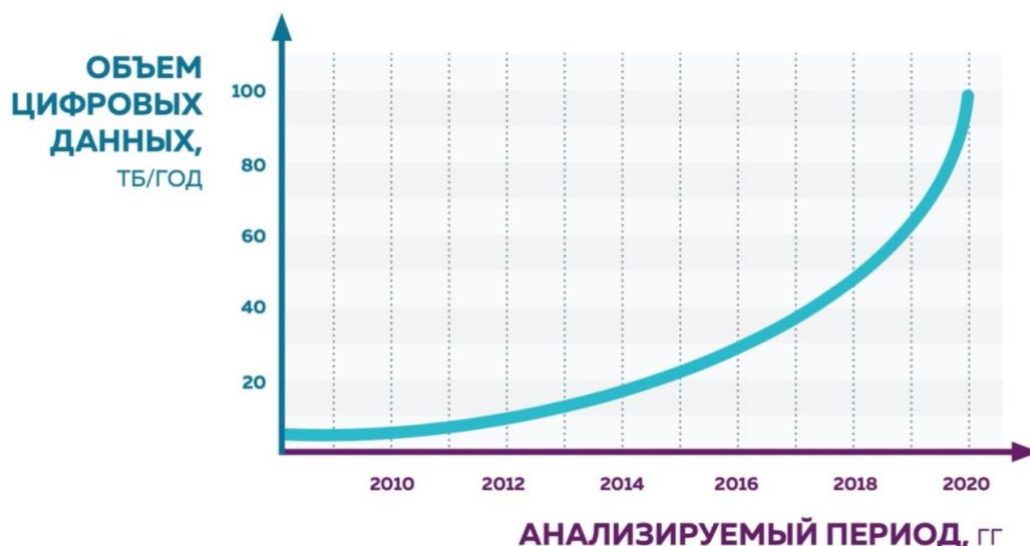


Рисунок 4.11 – Усредненная динамика генерирования данных на горном предприятии (открытая разработка месторождений) по мере интеллектуализации процессов и внедрения цифровых технологий (составлена на основе данных ИПКОН РАН)

Задачи устойчивого развития горнотехнической системы связаны с принятием управленческих решений на основе выбранной технологической схемы производства и организованной системы управления предприятием. Сбор и интерпретация больших разнотипных данных от различных источников становится отдельной наукоемкой задачей. Ее решение позволит по-другому взглянуть на техногенное преобразование недр и эффективность применяемых технологий. Но для этого необходимо выработать принципы сбора, хранения, агрегации данных и определить приоритетные источники данных. Централизация всех производственных данных от различных систем в едином хранилище может быть первым шагом в решении данной задачи.



После интеграции производственных данных и информации о состоянии горного массива важной научно-технической задачей становится формулирование гипотез и причинно-следственных связей для разных временных интервалов эксплуатации горнотехнической системы. На основе выбранных гипотез возможны обоснование и оптимизация параметров геотехнологии разработки месторождений на всех этапах существования горнотехнической системы. Эти исследования, а именно: определение необходимых типов, объемов и состава данных от технологического оборудования и процессов позволят выработать новые редакции правил безопасности и норм проектирования горнотехнических систем.

Усовершенствование технологических процессов на основе анализа Бод обуславливает появление новых вызовов. Возникают новые требования к профессиям, задействованным в отраслях горной промышленности, таким как добыча и переработка рудных полезных ископаемых и горно-химического сырья, угольная отрасль. Так, экстраполяция данных, полученных при анализе показателей функционирования одной горнотехнической системы на более чем 100 действующих предприятиях угольной промышленности России сопоставимой производительности, позволила сделать вывод об объемах Бод в десятки и даже сотни петабайт в год. Очевидно, что формирование и массовый запуск роботизированной горной техники в карьерах, на подземных рудниках и шахтах увеличат объем данных, генерируемых объектами горнотехнической системы, еще на порядок.

4.5 Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского, Черного и Азовского морей (1980–2020 годы)

Для подготовки Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации был проведен анализ межгодовых изменений и оценивание линейных трендов гидрометеорологических параметров: температуры воздуха вблизи поверхности (ТВП), температуры поверхности моря (ТПМ), ледовитости и уровня моря по следующим данным:

– Среднемесячные значения температуры воздуха (ТВ) на высоте 2 метра от поверхности за период 1980–2020 годы получены из базы данных NASA MERRA-2 на сетке $0,5^\circ$ широты \times $0,625^\circ$ долготы [Gelaro *et al.*, 2017].

– Среднемесячные данные температуры поверхности моря (ТПМ) за период 1982–2020 годы получены осреднением среднесуточных данных исходного массива NOAA OI SST v2 high resolution dataset на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [Reynolds *et al.*, 2007].



– Среднемесячные данные альтиметрических измерений вдоль треков спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2/3 (J1/2/3) за период 1993–2020 годы. Обработка данных спутниковых альтиметров проводилась с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии, разработанной в Геофизическом центре РАН [Medvedev *et al.*, 1997; Лебедев и Медведев, 2000].

– Среднемесячные значения концентрации льда получены осреднением среднесуточных значений из массива CMEMS EUMETSAT OSI SAF SEAICE_GLO_SEAICE_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 на сетке 12,5 км × 12,5 км за период 1980–2020 годов. [Eastwood *et al.*, 2016].

В 2000-е годы, по сравнению с 1980-ми и 1990-ми годами, увеличились максимальные летние и минимальные зимние среднемесячные значения ТВП и ТПМ, увеличилось количество мягких зим [Matishov *et al.*, 2014]. Тренд ТВП Каспийского региона в период 1980–2020 годы составил +0,030°C/год, тренды среднегодовой ТПМ в 1982–2020 годы в Северном, Среднем и Южном Каспии и в море в целом – +0,026, +0,042, +0,034 и +0,035°C/год, соответственно. Наибольшее потепление вод имело место в западной части Среднего Каспия, наименьшее – на северо-востоке Северного Каспия и вдоль шельфовой зоны Туркменистана. Уменьшение трендов ТВП и ТПМ в 1980/1982–2020 годы по сравнению с предшествующим периодом (1980/1982–2010 годы) [Костяной и др., 2014; Kazmin, 2021] и отсутствие роста среднегодовых значений ТПМ после 2010 года свидетельствуют о замедлении потепления Каспийского моря во вторую декаду 2000-х годов. Уровень моря после 2005 года, за исключением краткой стабилизации в 2015–2017 годы, продолжает падать. Резкое уменьшение уровня имело место в конце 2010 – начале 2011 годов в связи с засухой в Европейской части России, включая бассейн р. Волга, в конце июня – августе 2010 [Arpe *et al.*, 2012], в конце 2014 и в конце 2018 годов. Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993–2020 годов составила $-5,37 \pm 1,24$ см/год. К концу 2020 года он достиг отметки –28,5 м БС, и от минимума 1977 года его отделяет только 0,5 м (рис. 4.12). Тренды среднемесячной и средней за холодное полугодие (ноябрь – апрель) концентрации льда в Северном Каспии в 1980–2020 годах оказались отрицательными (–0,8%/10 лет и –1,24%/10 лет соответственно).

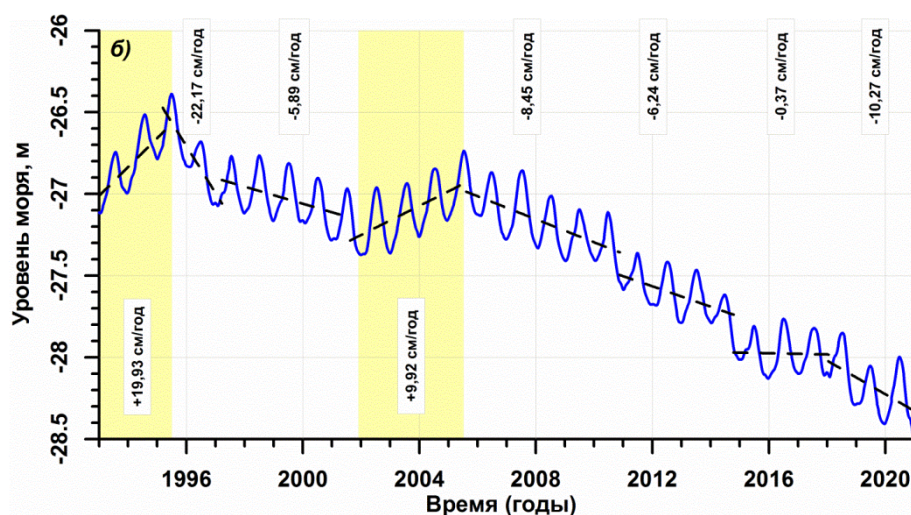


Рисунок 4.12 – Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость аномалий уровня Каспийского моря (см) с января 1993 по декабрь 2020 года по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2/3

Установлено, что на фоне роста ТВП над Черноморско-Азовским регионом ($+0,053^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в 1980–2020 годах) и ТПМ Черного моря ($+0,052^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в 1982–2020 годах) значения этих параметров в 2000-е годы заметно отличаются от таковых в 1980-е – 1990-е годы: увеличились максимальные среднемесячные летние и минимальные среднемесячные зимние температуры, увеличилось количество мягких зим. Среднегодовая ТПМ Черного моря, практически не превышавшая в 1980-х – начале 1990-х годах 15°C , с 2010 года в большинстве случаев превысила 16°C (максимум – $16,71^{\circ}\text{C}$ в 2018 год). Во второй декаде 2000-х годов среднемесячные зимние минимумы, за исключением зим 2011/2012 и 2016/2017 годов, не опускались ниже 8°C . Следствием роста зимних температур явилось уменьшение концентрации льда в Азовском море (тренд среднемесячной концентрации – $-1,2\%/10$ лет). Примерно с 2004–2010 годов в Черном море и с 2004 года в Азовском тенденция повышения их уровней (в среднем) сменилась некоторым понижением (рис. 4.13, 4.14), так что средние положительные тренды за период 1993–2020 годов ($+0,32\pm 0,16$ см/год в Черном и $+0,21\pm 0,05$ см/год в Азовском морях) оказались примерно в 2,5 раза меньшими, чем в 1993–2012 годах ($+0,82\pm 0,18$ см/год), хотя еще в 1,5 раза большим, чем с 1920-х до середины 1990-х годов ($0,17\text{--}0,18$ см/год) [Костяной и др., 2014]. Причиной этого понижения уровней (в среднем) в последние 10–15 лет, явилось, по-видимому, уменьшение приходной части пресноводного баланса обоих морей, косвенным подтверждением которого является наблюдаемое повышение солености их вод. Уменьшение общего положительного тренда уровня в период, охватывающий 2010-е годы, заметно и по результатам других публикаций. Если в 1992–2005 годах, по данным в [Кубряков и Станичный, 2013] тренд уровня Черного моря оценивался в $+0,76\pm 0,03$ см/год,

то в 1993–2014 годах он составил $+0,31$ см/год [Kubryakov et al., 2017] и $+0,32 \pm 0,08$ см/год [Avsar et al., 2018], а в период с января 1993 по май 2017 года – $+0,25 \pm 0,05$ см/год [Avsar and Kutoglu, 2020].

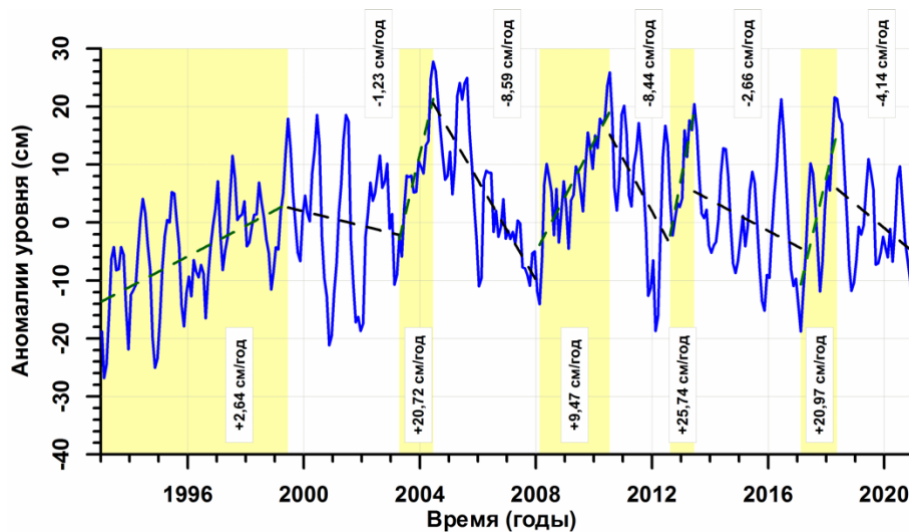


Рисунок 4.13 – Изменения аномалий уровня Черного моря (см) с января 1993 по декабрь 2020 года по данным альтиметров спутников Т/Р и J 1/2/3 (сплошная линия). Межгодовая изменчивость их средних значений показана пунктиром. Периоды подъема уровня выделены серым цветом

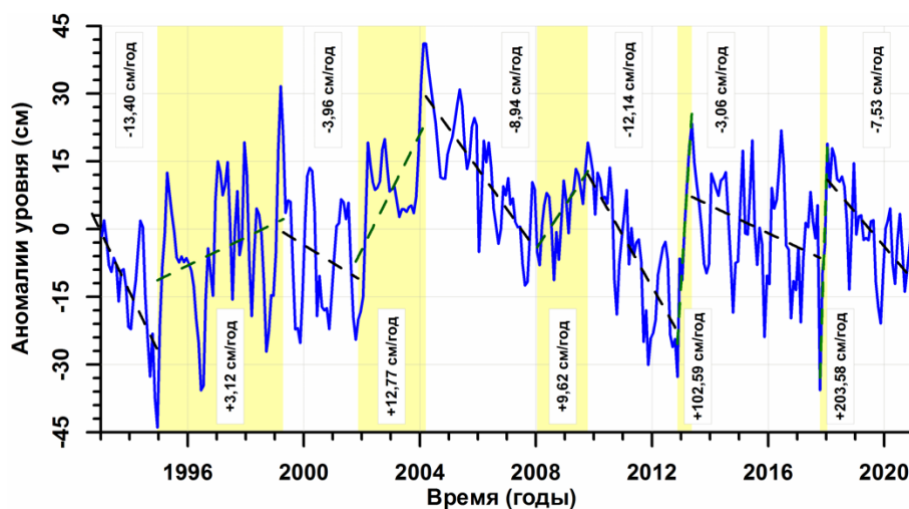


Рисунок 4.14 – Изменения аномалий уровня Азовского моря (см) с января 1993 по декабрь 2020 года. по данным альтиметров спутников Т/Р и J 1/2/3. Обозначения – те же, что на рис. 4.12

4.6 Развитие тематической междисциплинарной ГИС для представления и анализа данных по наукам о Земле

В настоящее время получили развитие пользовательские средства для создания веб-ориентированных картографических приложений, которые предоставляют пользователям



широкий набор инструментов представления и анализа геопространственной информации. ГИС-инфраструктура, развиваемая в ГЦ РАН, основана на стандартном клиент-серверном подходе. Система состоит из трех ключевых сегментов [Соловьев и др., 2018a]: БД-сервер для размещения геопространственных данных в виде слоев данных в файловом хранилище или в СУБД и файлов с оформлением; ГИС-сервер для размещения картографических сервисов и сервисов геообработки; веб-сервер для размещения сетевых клиентских приложений.

Исходные тематические геопространственные данные преобразуются в совместимые с ПО ГИС векторные или растровые слои, которые сохраняются в файловом хранилище или в БД под управлением СУБД на БД-сервере. Отдельные слои данных объединяются и публикуются на ГИС-сервере в стандартном формате картографических сервисов. Доступ к сервисам осуществляется средствами стандартных протоколов обмена картографической информацией. На все публикуемые слои данных оформляются метаданные с подробным описанием.

Взаимодействие пользователя с картографическими сервисами осуществляется средствами специализированного геопортала (<http://gis.gcras.ru>). Геопортал обеспечивает простое и в то же время эффективное использование и анализ пространственных данных, полученных в результате научных изысканий. Клиентское картографическое веб-приложение с включёнными в него картографическими сервисами (содержащими слои пространственных данных), размещаемое на заранее созданном ГИС-сервере, является основой геопортала. В 2021 году была разработана и развернута в тестовом режиме обновленная версия геопортала. Его интерфейс включает в себя основное меню для обращения к разделам: «Карта», «О проекте», «Описание данных», «Публикации» и «Метаданные». При обращении к разделу «Карта» становится доступным картографическое веб-приложение. Его основная часть – масштабируемая цифровая карта. В правой части расположено меню для обращения к легенде текущей карты (формируется динамически), списка доступных для отображения слоев, инструмента сравнения двух карт (виджет «шторка») и инструментов визуального анализа данных. Функционал картографического приложения включает возможность обращения к атрибутивной информации отображаемых слоев. Внешний вид геопортала представлен на рис. 4.15

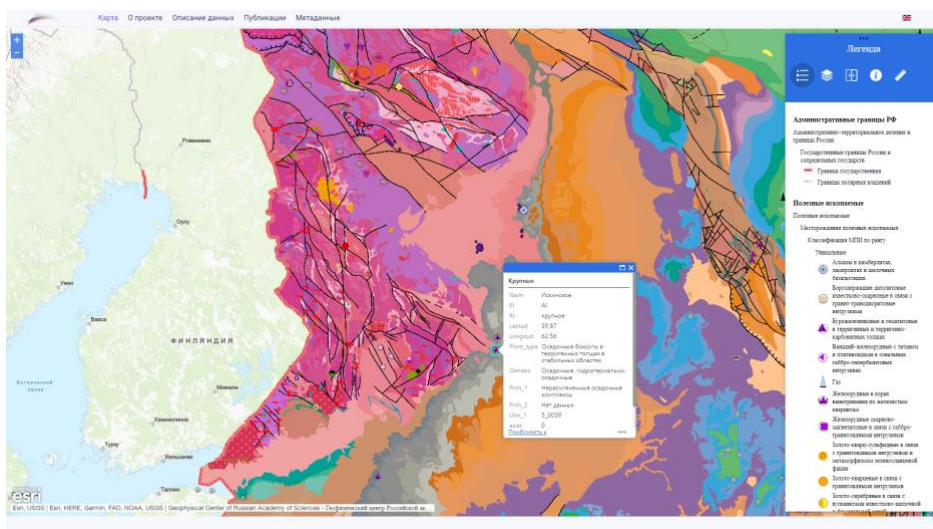


Рисунок 4.15 – Внешний вид обновленной версии геопортала ГЦ РАН

В рамках работы над проектом особое внимание было уделено созданию базы метаданных для пространственных слоев, хранящихся в БД. Наряду со стандартным описанием картографических сервисов на ГИС-сервере, которое формируется при публикации, на каждый из тематических слоев, составляющих сервис, также оформляются подробные метаданные. Они готовятся в соответствии со спецификацией ISO 19139. Файлы метаданных представляют собой файлы в формате XML (eXtensible Markup Language) и содержат исчерпывающую справочную информацию о слое.

В ходе реализации проекта РНФ № 15-17-30020 «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье» в 2015–2017 годах было создано картографическое приложение по оценке сейсмической опасности, опубликованное в виде самостоятельного геопортала (<http://seismgis.gcras.ru/>) [Соловьев и др., 2018б]. В ходе работ в 2021 году было также проведено обновление клиентского приложения.

4.7 Редакционно-издательская подготовка материалов для публикации в изданиях ГЦ РАН

Геофизический центр РАН является учредителем и издателем трех онлайн-журналов – «Russian Journal of Earth Sciences» (<http://rjes.wdcb.ru/>), «Вестник Отделения наук о Земле РАН» (<http://onznews.wdcb.ru/>) и сериального электронного издания «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» («Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS» (<http://ebooks.wdcb.ru/>).

Журнал «Russian Journal of Earth Sciences» (RJES) 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. Публикация результатов научных исследований в RJES является не только простым способом научных коммуникаций, но и важнейшим этапом документирования научного контента, а также вносит значительный вклад в развитие наук о Земле.

Главная цель журнала – ознакомить научное сообщество с наиболее важными научными результатами, полученными российскими учеными. Статьи, представляемые иностранными учеными или международными коллективами авторов, также приветствуются, в особенности публикации, посвященные общим проблемам наук о Земле.

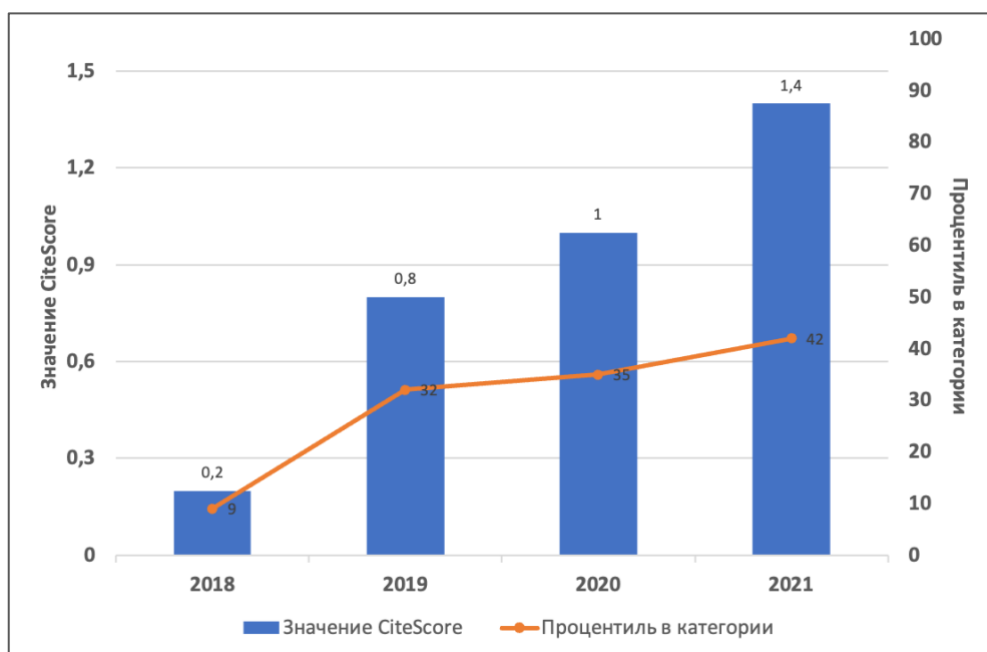
Главным редактором журнала RJES является академик РАН А. Д. Гвишиани; в редколлегию журнала входят такие известные ученые, как академик РАН А. О. Глико, член-корреспондент РАН А. А. Соловьев, П. Кабат (Швейцария) и другие ведущие ученые в области наук о Земле из разных стран.

Благодаря редакционной политике журнала, направленной на строгий отбор научных статей исключительно по тематике, высокому уровню редакторов по направлениям и рецензентов, а также слепому рецензированию удается достичь международного уровня научных статей. Следствием этого стало улучшение показателей качества журнала в библиографической базе данных Scopus и в 2020 году «Russian Journal of Earth Sciences» впервые был включен в третий квартиль (Q3) в отрасли знаний «General Earth and Planetary Sciences». Необходимо подчеркнуть, что 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. С каждым годом основные показатели журнала улучшаются, так, в таблице 4.2 отражены основные показатели библиографической базы Скопус за 2019–2021 годы.

На рис. 4.16 можно наглядно увидеть рост индикатора Scopus CiteScore, который отражает среднее количество цитируемости недавних статей, опубликованных в журнале RJES. Наряду с этим RJES индексируется системой Web of Science (Core Collection: Emerging Sources Citation Index), Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), и зарегистрирован в системе Crossref, каждая опубликованная в журнале статья имеет идентификатор DOI.

Таблица 4.2 – Изменение основных показателей журнала RJES в Scopus в 2019–2021 годах.

	2019 г.	2020 г.	2021 г. предварительный расчет
Q3 квантиль	35 процентиль	35 процентиль	~42 процентиль
CiteScore	0,8	1	1,4 CiteScoreTacker
SNIP	0,793	0,689	–
SJR	0,288	0,303	–
H-index	17	17	18

**Рисунок 4.16 – Тренд показателя CiteScore базы Scopus для RJES**

Еще одним положительным фактором явилось расширение географии авторов, если ранее в журнал поступали статьи в основном из России и СНГ, то начиная с 2019 года появились статьи с авторами из Ирана, Ирака, Вьетнама, Турции, Индии, Непала, Индонезии, Норвегии, Италии, Канады, Австралии и США. Очевидно, что приток иностранных авторов является следствием индексирования журнала в Scopus и Web of Sciences, и это повышает статус журнала в формальной оценке этими же библиографическими базами.

Научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» издается в формате электронного мультимедийного журнала с сентября 2009 года. Новости в нем



обновляются ежедневно. 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.

Кроме перечисленных выше журналов Геофизический центр РАН публикует сериальное электронное издание «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН». Оно было учреждено Геофизическим центром РАН для публикации научных статей, тематика которых связана с информационными технологиями, внедренными в науки о Земле, научных отчетов, тезисов конференций, инструкций и т.д. Статьи, представленные в журнал, проходят через стандартный процесс экспертной оценки, за исключением статей, представленных членами Российской академии наук. Все статьи проходят редакционную обработку. Статьи и книги в этой серии публикуются с использованием самых современных технологий электронного издательства, включая мультимедийный и интерактивный контент.

В 2021 году в ходе работы над проектом подготовлено 6 выпусков 21-го тома журнала «Russian Journal of Earth Sciences», общее количество статей в журнале – 45; в 12 выпусках журнала «Вестник ОНЗ РАН» – 600 новостных сообщений и 4 научные статьи [Гвишиани и др., 2021; Пилипенко, 2021; Уваров, 2021; Соловьёв и Краснопёров, 2021]; в сериальном издании «Исследования по геоинформатике» опубликован «Отчет о деятельности ГЦ РАН за 2020 год».

В настоящее время во всем мире число научных публикаций в профессиональных журналах постоянно увеличивается. В последние годы Минобрнауки РФ стало оценивать эффективность научных организаций и научных работников с помощью наукометрических показателей, основанных на международных системах цитирования Web of Science, Scopus и др. В этих реалиях ученый стоит перед выбором научного издания, в котором ему предстоит опубликовать результаты своих исследований, и чтобы этот труд не был напрасным он должен остановиться на издании, которое, как минимум индексируется в этих системах (Web of Science и Scopus). Так как журнал «Russian Journal of Earth Sciences» удовлетворяет этим требованиям и с каждым годом усиливает свои позиции, то все больше авторов из разных стран останавливают свой выбор на этом издании. В связи с этим существенно возросла нагрузка на сотрудников редакционно-издательской группы и на членов редакционной коллегии. Возникла необходимость в оптимизации рабочего процесса

с помощью программной платформы, реализующей развитую систему сервисов для работы с цифровым контентом.

В 2021 году была произведена установка издательской платформы отечественной разработки Editorum, осуществлена загрузка текущих и архивных номеров журнала в онлайн редакцию и новый сайт научного журнала «Russian Journal of Earth Sciences» (рис. 4.17) за период с основания журнала в 1998 году по настоящее время. Для нового сайта зарегистрирован домен второго уровня RJES.RU.

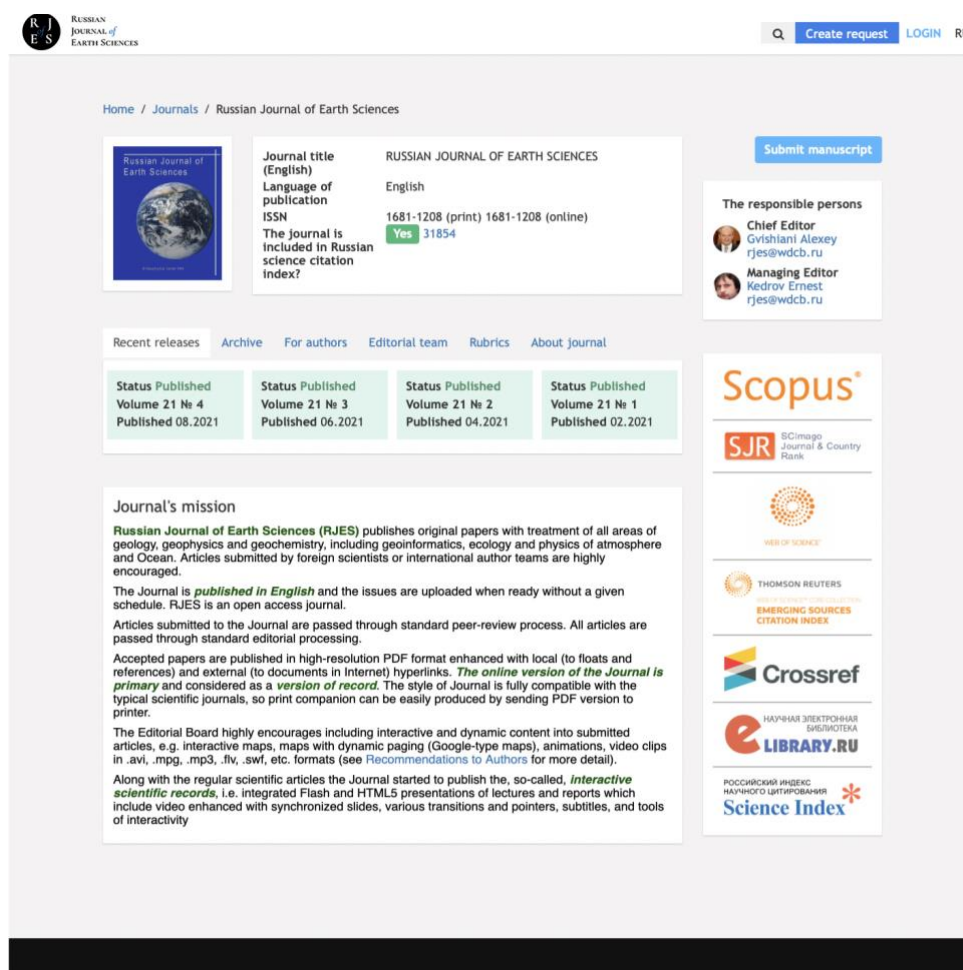


Рисунок 4.17 – Новый сайт журнала «Russian Journal of Earth Sciences» на издательской платформе Editorum [http://rjes.ru/].

Платформа Editorum позволяет автоматизировать практически все издательские процессы, в разы сократить сроки подготовки контента автором, рассмотрения заявок на публикацию, редакционной подготовки контента и его публикации. Издательской системой предусмотрена подготовка и отправка данных в РИНЦ и Crossref, тем самым происходит регистрация DOI. Таким образом, нет необходимости набирать новых сотрудников для подготовки и загрузки данных в РИНЦ и Crossref, создания и управления сайтом. Большинство сотрудников редакции/организации может работать удаленно.



Система существенно облегчает подготовку публикаций и метаданных в соответствие с мировыми стандартами и требованиями Scopus и Web of Science. Также для журнала RJES подготовлен новый шаблон в формате издательской системы LaTeX и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RJES RA-style 1.0 № 2021666635 от 18 октября 2021 года. Программа является системой макрокоманд LaTeX2e для подготовки исследовательских статей на английском языке в журнал «Russian Journal of Earth Sciences».

Список использованных источников

- Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР, 1911–1957 гг. / ред. Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Харин Д.А. – М.: Издательство АН СССР, 1962.
- Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Дзедобоев 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., Горшков А. И., Ранцман Е. Я., Систернас А., Соловьев А. А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. – 176 с.
- Гвишиани А. Д., Гурвич В. А. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука, 1992. – 360 с.
- Гвишиани А. Д., Кедров Э. О., Любовцева Ю. С., Барыкина Ю. В. История исследований Геофизического центра РАН. 2016 год // Вестник ОНЗ РАН. – 2021. – Т. 13. – NZ1001. – DOI: 10.2205/2021NZ000368.
- Гвишиани А. Д., Соловьев 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.
- Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Белов И. О., Татаринцев 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.
- Землетрясения Северной Евразии, ... год (ежегодники 1992–2014 гг.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 1997–2020.
- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Лебедев С. А., Шеремет Н. А. Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменения климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). В. М. Катцов, С. М. Семенов (ред.). М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2014. – С. 644–683.
- Кубряков А. А., Станичный С. В. Тренды уровня Черного моря по контактными и альтиметрическими измерениями // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 5. – С. 48–



55.

- Лебедев С.А., Медведев П. П. Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии // 6-я Международная научно-техническая конференция. «Современные методы и средства океанологических исследований». 15–17 ноября 2000, Москва: Материалы конференции. – Ч. 2. – М, ИО РАН, 2000. – С. 52–57.
- 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.
- Пилипенко В. А. МГД волны в космосе и на Земле: Исторический аспект // Вестник ОНЗ РАН. – 2021. – Т. 13. – NZ2001. DOI: 10.2205/2021NZ000371.
- 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. – 2018. – Т. 10. – № 5. – С. 45–56. DOI: 10.26583/sv.10.5.04. – <http://sv-journal.org/2018-5/04/?lang=ru> (дата обращения 29.11.2021).
- 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. – 2018. – № 4. – С. 91–98.
- Соловьёв А. А., Краснопёров Р. И. (ред.) Отчет о деятельности института за 2020 год. Результаты научных исследований и международных проектов. М.: Исследования по геоинформатике, 2021. – Т. 8. – № 1 – (BS9001). – DOI: 10.2205/2021BS055.
- Соловьёв А. А., Красноперов Р. И., Николов Б. П., Жарких Ю. И., Агаян С. М. Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики // Исследование Земли из космоса – 2018а. – № 2. – С. 65–76. DOI: 10.7868/S0205961418020070.
- Соловьёв А.А., Соловьёв Ал.А., Гвишиани А. Д., Николов Б. П., Николова Ю. И. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исследование Земли из космоса – 2018б – № 5. – С. 52–64.
- Уваров Д. Н. Проблемы и перспективы космической отрасли России // Вестник ОНЗ РАН. – 2021. – Т. 13. – NZ1003. – DOI: 10.2205/2021NZ000370.
- Arpe K., Leroy S. A. G., Lakijani H., Khan V. Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level // Hydrology and Earth System Sciences. – 2012. – Vol. 16. – №. 1. – P. 19–27. DOI: 10.5194/hess-16-19-2012.
- Avsar N. B., Jin S., Kutoglu S. H. Interannual variations of sea surface temperature in the Black Sea // In: Proceedings of the 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2018). Valencia, Spain, 22–27 July 2018. – P. 5617–5620. DOI:



10.1109/IGARSS.2018.8518183.

Avsar N. B., Kutoglu S. H. Recent Sea Level Change in the Black Sea from Satellite Altimetry and Tide Gauge Observations // *International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9. – № 3. – P. 185. DOI: 10.3390/ijgi9030185.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A. M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J. E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rieneker M., Schubert S. D., Sienkiewicz M., Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*. 2017. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Gvishiani A., Soloviev A. Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation. – Cham: Springer, 2020. – 311 p.

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.

Eastwood S., Lavergne T., Tonboe R., Hackett B. Product user manual for reprocessed sea ice concentration from EUMETSAT OSI SAF SEAIce_GLO_SEAIce_L4_REP_OBSERVATIONS_011_009 Version 2.4 – Copernicus. 2016. – P. 1–45.

Kazmin A. S. Multidecadal variability of the hydrometeorological parameters in the Caspian Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2021. – Vol. 250. – P. 107150. – DOI: 10.1016/j.ecss.2020.107150.

Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Volkov D. L. Quantifying the impact of basin dynamics on the regional sea level rise in the Black Sea // *Ocean Science*. – 2017. – Vol. 13. – № 3. – P. 443–452. DOI: 10.5194/os-13-443-2017.

Laney D. 3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity, and Variety. – Stamford: META Group Inc., 2001. – 3 p.

Manyika J., Chui M., Brown B., Bughin J., Dobbs R. et al. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity / McKinsey & Company, 2011. – 156 p.

Matishov G. G., Dzhenyuk S. L., Moiseev D. V., Zhichkin A. P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov // *Oceanologia*. – 2014. – Vol. 56 (3). – P. 445–460. – DOI: 10.5697/oc.56-3.445.

Mayer-Schönberger V., Cukier K. Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. – Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013. – 272 p.

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. – V. 2. – St.-Petersburg Univ. – 1997. – P. 95–96.

Nimmagadda S. L., Murupindy V. V., Reiners V. T. On Digital Opencast Mining Ecosystems (DOME) and Knowledge Management – a Big Data Perspective // *ASEG Extended Abstracts*. – 2018. – Vol. 2018. – Is. 1. – DOI: 10.1071/ASEG2018abP086.



- 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.
- Reynolds R. W., Smith T. M., Liu C., Chelton D. B., Casey K. S., Schlax M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature // *Journal of climate*. – 2007. – Vol. 20. – №. 22. – P. 5473–5496. DOI: 10.1175/2007JCLI1824.1.
- Reinsel D., Gantz J., Rydning J. Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical. Don't Focus on Big Data; Focus on the Data That's Big: IDC White Paper, 2017. <https://www.import.io/wp-content/uploads/2017/04/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>.
- Roberts F. S., Sheremet I. A. Resilience in the Digital Age. – Cham: Springer, 2021. – 199 p.
- 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. – <http://sv-journal.org/2015-2/04.php?lang=en> (дата обращения 29.11.2021).
- 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*. – 2018. – V. 16. – ES6002. – DOI: 10.2205/2016ES000584.
- Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., and Krasnoperov R. Historical K index data collection of Soviet magnetic observatories, 1957–1992 // *Earth Syst. Sci. Data*. – 2021. – Vol. 13. – No. 5. – P. 1987–1999. – DOI: 10.5194/ESSD-13-1987-2021.
- Sidorov R. V., Kaban M. K., Soloviev A. A., Petrunin A. G., Gvishiani A. D., Oshchenko A. A., Popov A. B., and Krasnoperov R. I. Sedimentary basins of the eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompensative gravity anomalies // *Solid Earth*. – 2021. – Vol. 12. – P. 2773–2788. DOI: 10.5194/se-12-2773-2021.
- Zhaohao Sun, Strang K. D., Pambel F. Privacy and security in the big data paradigm // *Journal of Computer Information Systems*. – 2020. – Vol. 60. – Is. 2. – P. 146–155.



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

Номер темы в ИСГЗ: FMWG-2019-0006

Номер: АААА-А19-122012500330-5

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

Ответственный исполнитель: г.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников

5.1 Расширение сети стационарных пунктов ГНСС-наблюдений и их комплексирование с существующей научной инфраструктурой российских геофизических обсерваторий

В 2021 году запущен новый пункт ГНСС-измерений на геофизической обсерватории «Климовская» (Коношский район Архангельской области). Новый комплект оборудования обеспечивает прием практически всех существующих навигационных сигналов и частот – GPS: L1, L2, L5; ГЛОНАСС: L1, L2, L3; Galileo: E1, E5A, E5B, E6; Beidou: B1, B2, B3; SBAS с частотой до 20 Гц. Также оборудование имеет интерактивный веб-интерфейс, по которому к нему можно удаленно подключаться. В настоящий момент оборудование пишет и сохраняет на FTP-сервер ГЦ РАН два потока данных с дискретностью 30 секунд и с дискретностью 1 секунда. Развитие новых пунктов высокоточных ГНСС-наблюдений позволит получить данные для геодезических, геодинамических, ионосферных и других исследований, а также для задач навигации и еще целого ряда технических приложений. Работы по установке стационарного пункта ГНСС-наблюдений для обеспечения

Удачно выбранное место расположения поста ГНСС обеспечило почти полное отсутствие препятствий, экранирующих спутниковые радиосигналы на углах возвышения более 15°, отсутствие конструкций и объектов, вызывающих заметные помехи вследствие отражения спутниковых сигналов и другие условия выполнения спутниковых наблюдений. Закрепление пункта выполнено центром типа 187 (основной центр пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) для районов с сезонным промерзанием грунтов), оборудованного устройством принудительного центрирования. Центр типа 187 представляет собой железобетонный пилон сечением 120×120 см у основания, и 40×40 см в верхней части, с бетонной плитой (якорем) сечением 250×250 см и общей высотой 5,39 м. Общий вид пункта ГНСС-наблюдений показан на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Пункт ГНСС-наблюдений геофизической обсерватории «Климовская»

С 13 по 16 октября 2021 года состоялась экспедиция сотрудников ГЦ РАН на территорию строящейся Международной Арктической Станции «Снежинка» (Приуральский район ЯНАО, окрестности поселка Харп. В ходе экспедиции была найдена новая локация, пригодная для развертывания нового пункта ГНСС-измерений. В двух экспериментальных точках в пределах выбранной локации были проведены тестовые измерения ГНСС-приемниками Topcon HiPer SR. Приемники были установлены в течение полутора часов для обеспечения максимальной точности измерений в условиях удаленности от пунктов сети референсных станций и ограниченного времени проведения работ. ГНСС-измерения выполнялись в статическом режиме по фазе несущей частоты с интервалом регистрации 1 секунда. Маска угла возвышения принималась 5° . Опорными пунктами при выполнении измерений принимались базовые станции сети референсных станций PrinNet: INTA, VORK, LBTN (рис. 5.2).

Первичные данные ГНСС были обработаны с использованием лицензионной программы MAGNET Office Tools. Режим постобработки включал использование спутниковых сигналов GPS и ГЛОНАСС, и точных эфемерид. Схема векторов измерений приведена на рис. 5.3.

Станции в сети PrinNet, информация о которых приведена в таблице, уравниены между собой в пространственной прямоугольной геоцентрической системе координат ITRF2008 на эпоху 2014.00. В результате обработки результатов ГНСС-измерений были получены координаты и высоты точек в системе координат ITRF2008 (таблица 5.2).

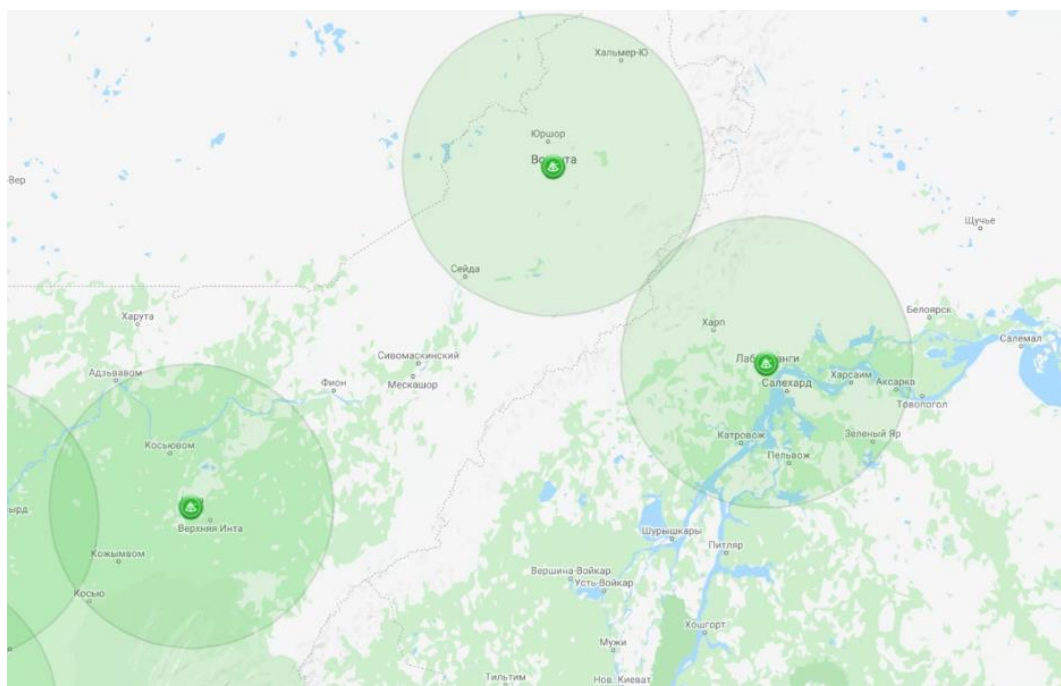


Рисунок 5.2 – Схема сети референсных станций PrinNet в районе изысканий

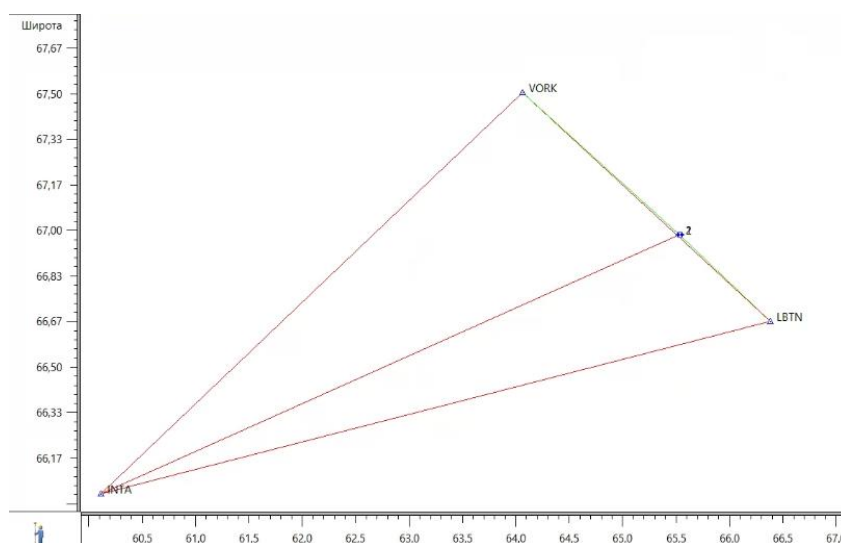


Рисунок 5.3 – Схема векторов измерений

Таблица 5.1 – Географические координаты станций сети PrinNet (ITRF2008)

Имя	Широта	Долгота	Эл. высота (м)
INTA	66,03790417	60,11448365	72,51300071
VORK	67,5030376	64,06072176	201,5764819
LBTN	66,66709492	66,38113615	71,85104845



Таблица 5.2 – Географические координаты экспериментальных точек (ITRF2008)

Имя	Широта	Долгота	Эл. высота (м)	СКО по высоте (м)	СКО в плане (м)
1	66,98333587	65,53319082	250,470	0,017	0,009
2	66,98350863	65,53274868	248,237	0,017	0,009

В результате экспедиции изучена возможность установки пункта ГНСС и выбрана площадь для дальнейших исследований, а также определены координаты и закреплены на местности экспериментальные точки для будущего возведения постаментов ГНСС.

5.2 Развитие российских геофизических обсерваторий и видов наблюдений на них, включая пункты наблюдений в Арктической зоне РФ

В 2021 году было продолжено развитие магнитной обсерватории «Михнево» (Ступинский район Московской области), развертываемой с первого года НИР на базе геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН с апреля 2019 года. Несмотря на то, что выбранная для строительства магнитной обсерватории локация имеет минимальные значения вертикального и горизонтального градиентов магнитного поля Земли, в ходе строительства она может быть загрязнена. Более того, сами немагнитные измерительные павильоны также могут быть «засорены» источниками искусственных помех. Поэтому диагностическая съемка интерьеров обсерваторских павильонов является необходимым этапом в развертывании магнитной обсерватории и позволяет выявить внутри измерительных павильонов на этапе их строительства либо непосредственно после него возможные источники аномалий – ферромагнитные элементы (остатки крепежных соединений, забытые инструменты, строительный мусор и т.д.). На данный момент в павильонах заложены фундаменты постаментов (4 в абсолютном павильоне и 2 – в вариационном). В каждом павильоне съемка выполнялась на трех уровнях:

- уровень пола;
- уровень примерного будущего расположения приборов на постаментах (в данном случае выбрана высота 1,5 м от пола);
- уровень потолка (или чуть ниже – в данном случае на высоте 2 м от пола).

Для съемки использовались магнитометры GSM-19, синхронизированные вручную. Съемка выполнялась по сети 0,5*0,5 м, такой шаг съемки позволяет детализировать даже мелкие источники возмущений, оставшиеся после строительства (крепежные элементы, инструменты и т.д.). Разметка производилась мелом на полу. Регулировка высоты датчика



производилась путем прикручивания дополнительных штанг из комплекта магнитометра. Базовый магнитометр для учета солнечно-суточной вариации магнитного поля находился примерно в 60 м от павильонов в лесу в течение всех этапов съемок. Период регистрации данных на нем был выбран равным 3 с.

На рис. 5.4–5.5 приведены карты аномальной составляющей полной напряженности магнитного поля для абсолютного и вариационного павильона. На карты дополнительно наложены схемы расположения окон, дверей и фундаментов приборных постаментов, а также отмечены точки магнитометрии. В абсолютном павильоне на уровне пола хорошо видны аномалии величиной 2–7 нТл на общем фоне, соответствующие положениям фундаментов постаментов. На среднем уровне (1,5 м от пола) их влияние в целом менее существенно (однако всё равно заметно по форме изолиний), а на верхнем уровне оно практически отсутствует. Также на среднем уровне и на уровне потолка проявляется аномалия техногенного происхождения, в обоих случаях выраженная как диполь с существенными минимумом и максимумом (наиболее различимыми на уровне 2 м от пола, где максимум достигает +10 нТл, а сопряженный минимум –26 нТл). Аномалия соответствует положению окна. В вариационном павильоне наиболее сильные возмущения выявлены на уровне пола. Здесь, как и в абсолютном павильоне, присутствуют эффекты, связанные с фундаментами постаментов, также присутствует сильная градиентная зона в одном из углов (слева от двери), влияние которой заметно и на двух следующих уровнях. Данная зона является эффектом от катушки кабеля питания осветительной лампы, которая впоследствии будет устранена из павильона. В остальном на среднем и верхнем уровнях съемки нет существенных градиентов за исключением указанной зоны.

По результатам выполненных измерений наиболее явные источники аномалий (форточки с ферромагнитными деталями) были демонтированы и сразу же устранены из абсолютного павильона. Было принято решение о замене этих элементов на полностью немагнитные. Более подробное изучение эффектов от петель оконных рам и самих рам в магнитном поле (после их демонтажа сотрудниками ГФО «Михнево») подтвердило наличие в них ферромагнитных элементов (ими оказались стержни латунных петель и соединительные элементы внутри одной из оконных рам). Также путем дополнительных замеров магнитометром в режиме непрерывной регистрации измерений была подтверждена некоторая ферромагнитность фундаментов четырех постаментов абсолютного павильона. Возможно, ранее исследованный на магнитную восприимчивость образец цементной смеси ($7,2\text{--}7,3 \times 10^{-5}$ ед. СИ), был из другой партии, не засоренной ферромагнитными примесями, или представлял собой малый объем, что не дало возможности выявить наличие примесей.

Однако более вероятно, что имел место эффект упорядочивания частиц цементной смеси по магнитному полю, в результате которого магнитная восприимчивость застывшей смеси оказалась больше, чем у порошка. Для устранения нежелательного эффекта было принято решение срезать около 0,5 м верхних частей фундаментов будущих приборных постаментов в обоих павильонах и заполнить срезанный объем до уровня пола стеклянными кирпичами.

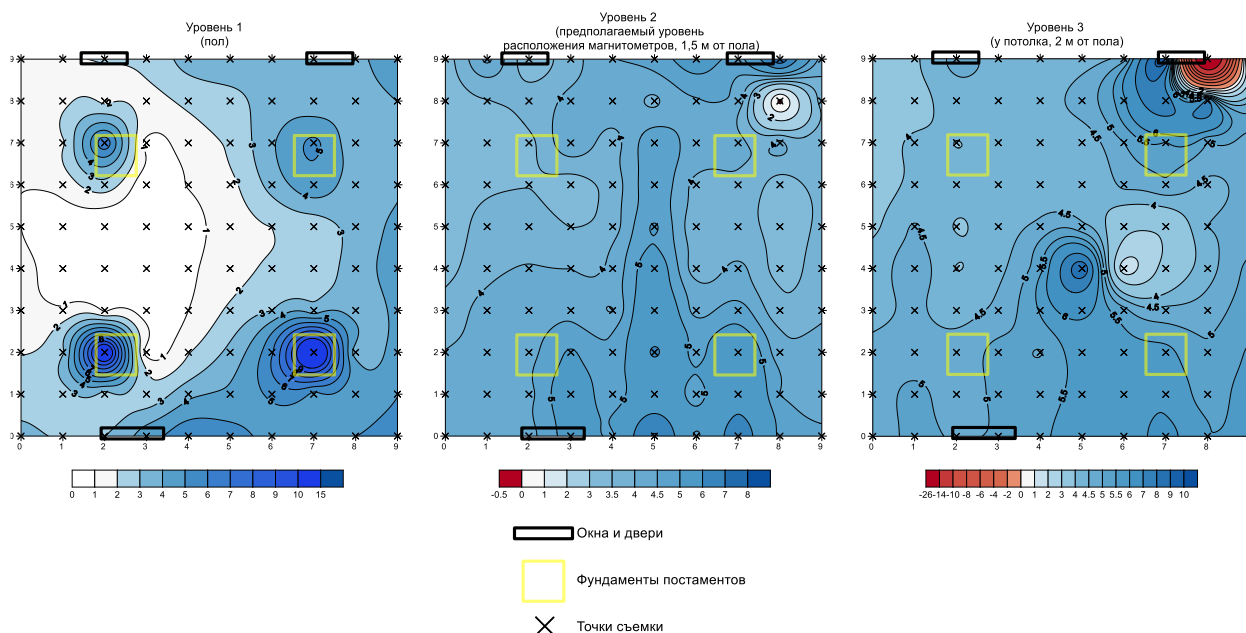


Рисунок 5.4 – Карты магнитных аномалий в абсолютном павильоне геомагнитной обсерватории «Михнево». Шаг съемки и расстояние между профилями равны 0,5 м

Магнитная съемка в предполагаемой зоне строительства обсерватории проводилась 11 октября 2021 года с 9:17 по 12:17 (UTC +5). Измерения производились при помощи магнитометра GSM-19. Определение координат осуществлялось GPS-оборудованием маркшейдерской службы Ямал-СПГ. Геомагнитная обстановка была спокойной или очень слабо возмущенной по данным Кр-индекса. Съемка проводилась по схеме, представленной на рис. 5.7, а, на которой было предварительно отмечено предполагаемое место установки основного модуля геомагнитной обсерватории (одного измерительного павильона). Всего было сделано 328 замеров. Шаг съемки составлял 10×10 м. Поскольку для съемки использовался только один магнитометр и не было возможности установки отдельного магнитометра для учета суточного хода магнитного поля, для учета суточного хода была организована опорная точка. Использование опорных точек являлось распространенным подходом в практике магниторазведки при отсутствии дополнительного магнитометра [Магниторазведка, 1990]. Измерения начались с опорной точки (обозначенной на рис. 5.7, а как «Ref.Point»), далее были проведены замеры в точках P1-P24. В опорной точке измерения производились через каждые 24 точки. На каждый проход, состоящий из 24



замеров, затрачивалось примерно 15 мин. Для учета суточного хода во время съемки было выполнено 16 измерений в опорной точке, которые для построения кривой суточного хода и дальнейшего вычисления аномальной составляющей магнитного поля Земли были линейно интерполированы с шагом в 1 секунду (рис. 5.7, б).

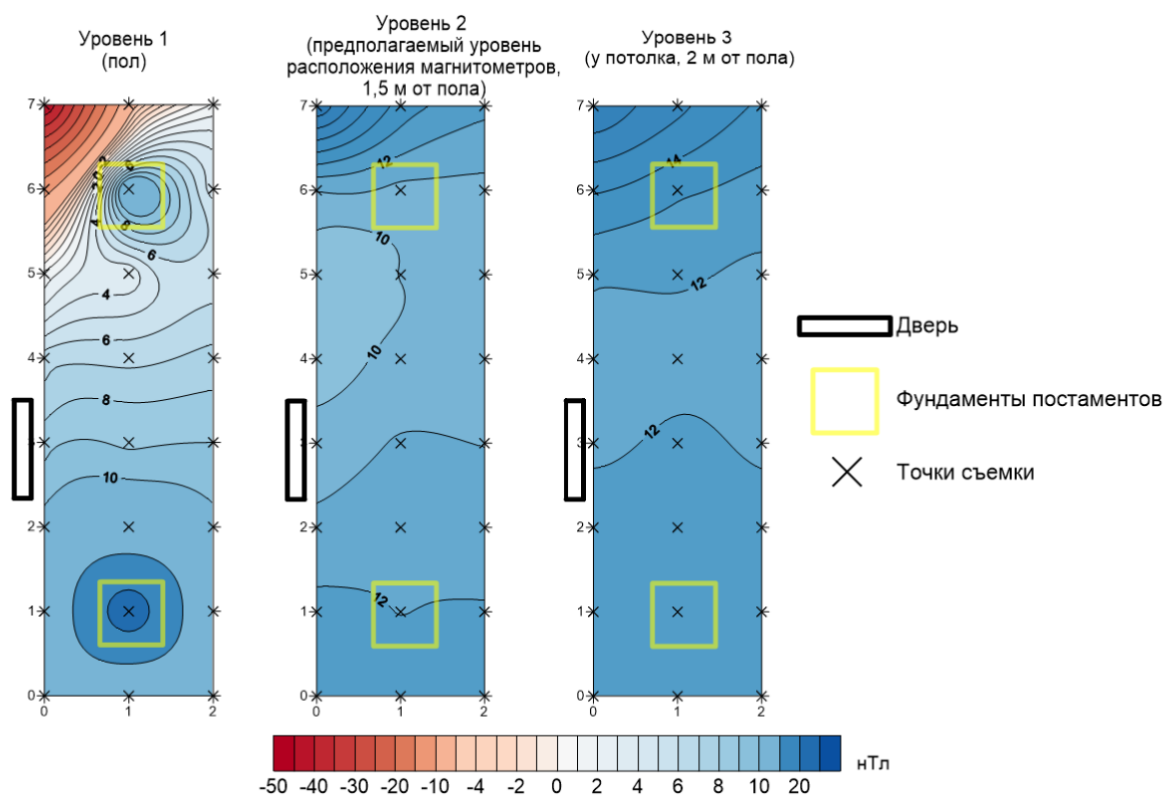


Рисунок 5.5 – Карты магнитных аномалий в вариационном павильоне геомагнитной обсерватории «Михнево». Шаг съемки и расстояние между профилями равны 0,5 м

После этого вертикальный градиент $\partial F/\partial z$ (нТл/м) рассчитывался по формуле:

$$\partial F/\partial z = (F_2 - F_1)/0,56, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 – измеренные значения вектора магнитной индукции на нижнем и верхнем уровне, соответственно.

Анализ карт аномальной составляющей ΔF (рис. 5.7, а) и вертикального градиента $\partial F/\partial z$ (рис. 5.7, б) позволил сделать вывод о местах установки обсерватории. Согласно рекомендациям IAGA [Jankowski and Sucksdorff, 1996], градиенты поля на месте установки павильона не должны превышать 2 нТл/м по абсолютной величине (и по возможности должны быть менее 1 нТл/м). Потому изначальное место в районе пикетов 7–9 на профилях 6–7 не подходит по величинам вертикального градиента. Представителям компании «Шлюмберже» была дана рекомендация по расположению основного модуля магнитной обсерватории в пределах участка съемки в области пикетов 5–7 на профилях 2–3 (южная

часть участка), где горизонтальная изменчивость ΔF и величины $\partial F/\partial z$ малы ($-0,3... +0,3$ нТл/м и $-1 ...+1$ нТл/м, соответственно). Участок обведен на картах на рис. 5.7 красным.

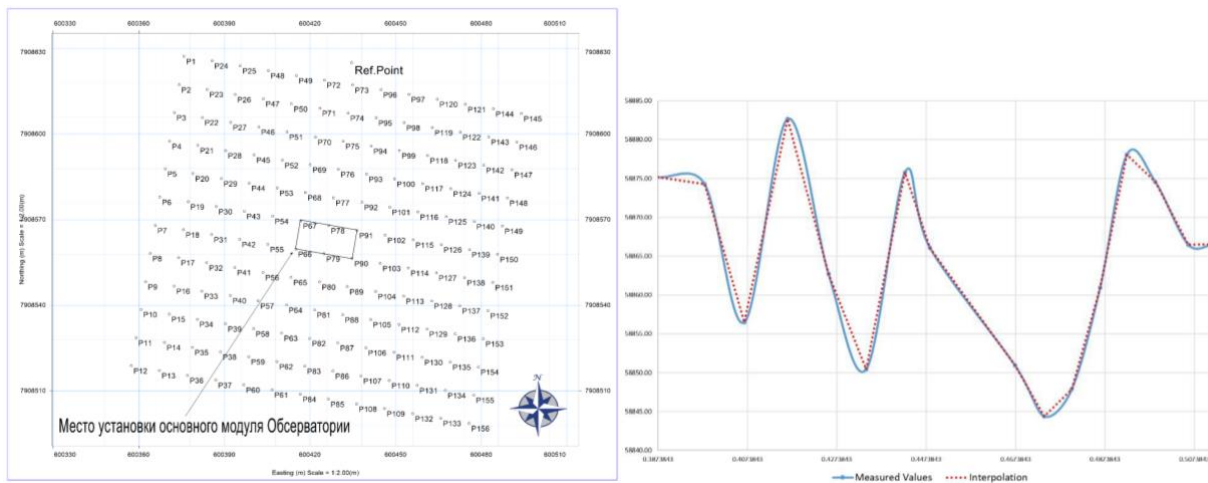


Рисунок 5.6 – Схема фактического материала (а); измеренные значения суточного хода магнитного поля во время съемки и интерполированный суточный ход (б)

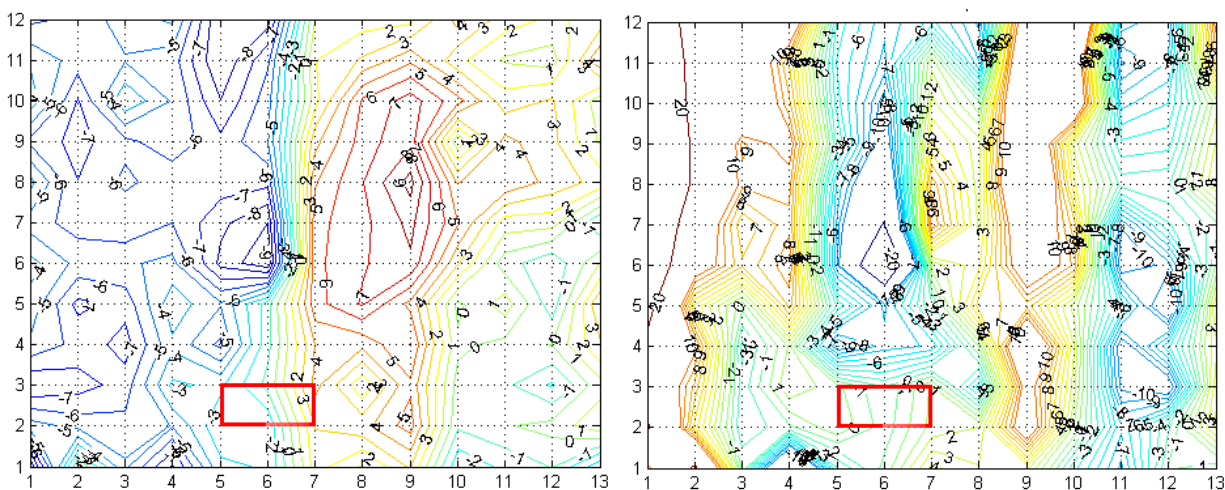


Рисунок 5.7 – а) Карта аномальной составляющей, б) Карта вертикального градиента магнитного поля Земли на участке

В результате сотрудничества ГЦ РАН и ИГИС НАН РА в республике Армения на основе комплексной геофизической обсерватории была создана и интенсивно развивается с 2019 года магнитная обсерватория «Гюлагарак» (IAGA-код GLK). В 2021 году получила существенное развитие инфраструктура обсерватории. Была установлена техническая система охраны обсерватории (видеонаблюдение, пожарная сигнализация и система слежения за движением). Видеонаблюдение ведется с помощью 8 камер слежения с функцией ночного видения. Расположение камер позволяет держать под контролем вход на территорию обсерватории, входные двери павильонов, а также некоторые критические с



точки зрения безопасности зоны внутри территории. Пожарная сигнализация организована с помощью совмещенных датчиков дыма и температуры в павильонах. Система слежения за движением организована посредством датчиков движения контролирующих двери и окна павильонов. Пожарная сигнализация и система слежения заведены на общий пульт контроля и управления.

Для обогрева павильонов обсерватории в холодное время года были выбраны немагнитные углеродные пленочные нагреватели. Также с территории обсерватории было удалено значительное количество металлолома, что должно положительно сказаться на качестве регистрируемых геомагнитных данных.

5.3 Теоретические и практические работы по созданию и расширению сети пунктов векового хода магнитного поля Земли

В ходе выполнения НИР была сформулирована и развита методика наблюдений на пунктах векового хода (ПВХ). В 2021 году работа по формированию методики измерений была продолжена и углублена. К величинам, традиционно получаемым при измерениях на ПВХ, – трем независимым элементам земного магнетизма (магнитному склонению D , наклонению I и модулю поля T) и четырем компонентам вектора модуля поля – H , X , Y , Z) однозначно вычисляются по этим трем. Предложена и успешно внедряется методика, в которой регистрируются еще четыре не столь распространенные характеристики магнитного поля: величина локальной магнитной постоянной G , геомагнитные координаты (северную геомагнитную широту Φ и долготу Λ), а также расстояние от ПВХ до положения расчетного геомагнитного полюса L . Показано, что положение магнитных полюсов, вычисленных по значениям склонения и наклонения, измеренным в разное время и в разном месте, показывает степень пространственной и временной неоднородности магнитного поля в данном регионе более наглядно, чем сами склонение и наклонение в отдельности. По разбросу положений полюса, рассчитанных по измерениям на всех ПВХ региона, а также по траекториям их движения за геомагнитную эпоху можно судить о дипольности поля в регионе. Локальная магнитная постоянная является чисто «силовой» характеристикой магнитного поля, поскольку ее величина зависит только от величины магнитного момента эквивалентного диполя и от расстояния до него от точки наблюдения, но не зависит от изменения ориентации этого диполя (в отличие от каждого из пяти силовых элементов земного магнетизма H , X , Y , Z , T). Применение данной методики для последующих съемок пунктов векового хода даст возможность получения надёжных и качественных измерений для пополнения и обновления глобальных и региональных



моделей главного магнитного поля Земли. Изложенная методика измерений на ПВХ была отработана на ряде измерений и будет применяться в перспективе при полном обследовании российской сети ПВХ и организации регулярного ее опроса. Также была разработана методика измерений на пунктах векового хода на движущемся льду.

Сформулированы перспективы развития сети пунктов векового хода. Следует отметить, что повторные геомагнитные наблюдения желательнее проводить не только на сети пунктов векового хода, но и в других пунктах с известными географическими координатами, где такие наблюдения были сделаны хотя бы однажды в предыдущие годы. Повторные замеры позволят провести изучение вековой вариации магнитного поля и ее аномалий, а также оценку параметров движения полюса эквивалентного магнитного диполя и изменения его магнитного момента. Целесообразным представляется повтор измерений, выполненных 50 лет назад на пунктах, заложенных примерно через 60 км по профилю «Новосибирск – Ташкент», секущему различные тектонические структуры. В качестве одной из задач развития научных исследований интересно было бы слежение за дрейфом южного магнитного полюса и изучение динамики магнитных вариаций тектонофизической и космической природы во времени и пространстве в Антарктиде. В перспективе было бы желательнее рассмотреть возможность объединения усилий в создании Службы истинных магнитных полюсов. Возобновление регулярных измерений на ПВХ требует не только пополнения и обновления аппаратной базы и распространения новых методических рекомендаций, но и сотрудничества с международным сообществом магнитологов – в первую очередь, с казахскими, киргизскими, узбекскими и белорусскими коллегами.

5.4 Анализ и обработка геомагнитных данных с помощью мер активности на основе ДМА

В 2021 году были разработаны и апробированы новые алгоритмы мер активности, базирующиеся на концепции дискретного математического анализа (ДМА), для изучения геомагнитной активности и анализа эволюции и морфологии геомагнитных бурь. В данном случае подход к мерам активности разрабатывался в новой постановке. Ранее предполагалось, что локальное свойство ε физического сигнала f анализировалось экспертом, понимающим локальность свойства ε вполне конкретно, а учитывающее это обстоятельство моделирование ε необходимо имело ограниченный характер. В ходе разработки нового подхода это ограничение было снято, и теперь задача сводится к изучению связи между ε и f в разных масштабах. Идея разномасштабности, пришедшая из



вейвлетов и фракталов, делает свойство ε , а не эксперта, главным в анализе f . Это позволяет понять связь между ними более полно и объективно.

Сначала меры активности строятся для, так называемых, базовых свойств: свойство ε называется базовым, если оно сочетает в себе естественность (простоту) и важность (практическую значимость). Обычно это свойства, за которыми стоят фундаментальные математические понятия: энергия E (дисперсия, непрерывность), разброс O (фундаментальность Коши), изрезанность L (частота, длина), рост G (модуль производной) и т.д. В ДМА существует открытый к пополнению их набор. Построение мер активности началось именно для базовых свойств в рамках логики интерпретатора – эксперта, ищущего на записи аномалии. Оставляя за экспертом свободные понимания выпрямления как количественного выражения интересующего его свойства ε , ДМА в своей формализации логики эксперта сразу принимает в качестве выпрямлений упомянутые выше конструкции энергии, изрезанности, разброса, роста и некоторые другие, проверенные практикой. Мера активности показывает, в какой степени происходящее в точке ряда f интересно исследователю. Таким образом, если в предыдущих подходах в ДМА моделирование логики эксперта подразумевало как интересующее его свойство ε , так и масштаб его рассмотрения на f , что обеспечивало только лишь «горизонтальный» характер анализа временного ряда, то в новой постановке (в которой эксперт отсутствует) на первый план выходит свойство ε , но в разных масштабах: мера активности $\mu\varepsilon_f = \mu\varepsilon_f(p^*)$ ($p^* \equiv$ масштаб эксперта) заменяется семейством мер $\mu\varepsilon_f(p)$ с произвольным масштабом p . Анализ носит «вертикальный» характер и отвечает на вопрос о поведении семейства мер $\mu\varepsilon_f(t, p)$ и его производной $\mu\varepsilon_f'(t, p)$ в фиксированный момент времени t по масштабной вертикали p .

Мера активности $\mu D_f(t)$ динамического показателя $D_f(t)$ является функцией принадлежности на T к нечеткому понятию «активность функции f в узле t с позиции показателя D ». Она получается из показателя $D_f(t)$ с помощью той или иной конструкции меры максимальности *mes max*. Соединяя меру аномальности с параметрическим семейством разномасштабных локализаций $\delta_t(r, p)$, получаем меру активности $\mu\varepsilon_f = \mu\varepsilon_f(t, p)$ в интервале масштабов $P \ni p$. Функция $\mu\varepsilon_f$ определена на прямом произведении $T \times P$, принимает значения в отрезке $[-1, 1]$, представляющие собой в каждой точке (p, t) меру выполнения свойства ε для ряда f в точке t при масштабе его рассмотрения p . В работе предлагается самый простой и естественный анализ $\mu\varepsilon_f$, необходимый для понимания динамики f на T и ее сравнения с динамиками других рядов.

Пример рассмотрения динамики синтетических данных приведен на рис. 5.8 для динамических показателей «Длина» (L) и «Энергия» (E). Показаны зависимости их от параметра p .

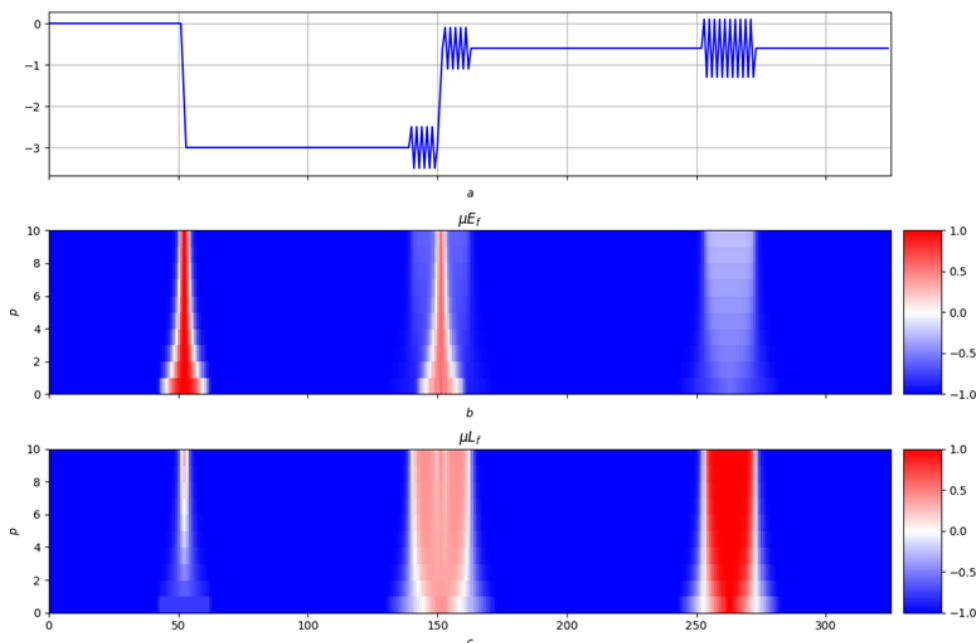


Рисунок 5.8 – Синтетический пример работы метода: исходные данные (сверху) и зависимости показателей «Энергия» (в центре) и «Длина» (снизу) от параметра p

Возможности метода продемонстрированы на примере анализа магнитных бурь, произошедших в заключительные периоды 23-го и 24-го солнечных циклов. Чтобы наиболее явным образом отобразить динамику бури с использованием показателей активности, мы выбрали северную (X) компоненту, т.к. записи горизонтальных компонент магнитного поля Земли наиболее четко отображают эволюцию бури и ее фазы. На рис. 5.9 приведен пример исследования данных геомагнитной компоненты X в период магнитной бури 15–19 мая 2005 года.

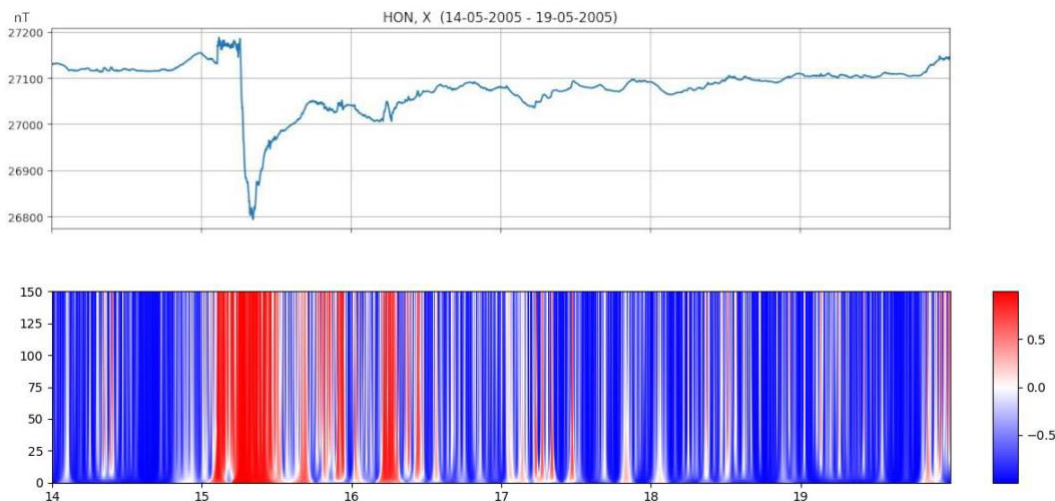




Рисунок 5.9 – Анализ магнитной бури по обсерваторским геомагнитным данным с помощью меры активности: исходные данные (сверху, компонента X) и график меры активности (снизу)

Исследование показало, что методы, показывая характерные общие черты бури, такие, как начало и период основной фазы, выявляют и незначительные понижения и повышения разной продолжительности и интенсивности во время магнитной бури. При этом алгоритм, основанный на выпрямлении «Энергия», четко обнаруживает возмущения даже с небольшой амплитудой (например, внезапные начала магнитных бурь, если их амплитуда оказалась сравнительно небольшой), в то время как выпрямление «Длина» эффективнее при обнаружении последовательностей возмущенных фрагментов временного ряда. С увеличением радиуса обзора лучше видны более длиннопериодные фрагменты сигнала (например, тренды, соответствующие фазам геомагнитной бури), а при малых радиусах обзора лучше идентифицируются короткие спорадические возмущения. Во всех случаях сигналы внезапных начал магнитной бури на магнитограммах соответствуют вертикально ориентированным красным зонам на графике меры активности, соответствующим всей области p , и указывающим на резкое увеличение напряженности геомагнитного поля. Начало основной фазы бури по данным горизонтальной геомагнитной компоненты всегда представлено вертикальными зонами отрицательных значений, соответствующих состоянию понижения горизонтальных составляющих магнитного поля.

Еще одной особенностью метода является возможность выполнения комбинированного анализа магнитной бури по комплексу данных космической погоды. Пример приведен на рис. 5.10 для данных плотности потока протонов солнечного ветра в период магнитной бури 22–29 июня 2015 года. Это дает возможность успешно реализовать эту группу методов в исследованиях морфологии геомагнитных бурь. Разработанные методики также можно использовать в распознавании слабых сигналов внезапных начал с использованием комбинации временных рядов данных о космической погоде и данных наземных магнитных обсерваторий. Использование различных взаимодополняющих данных космической погоды обеспечивает всестороннее изучение экстремальных явлений в околоземном пространстве. Метод также дает возможность анализировать любые физические данные из разных источников единообразно в единой шкале.

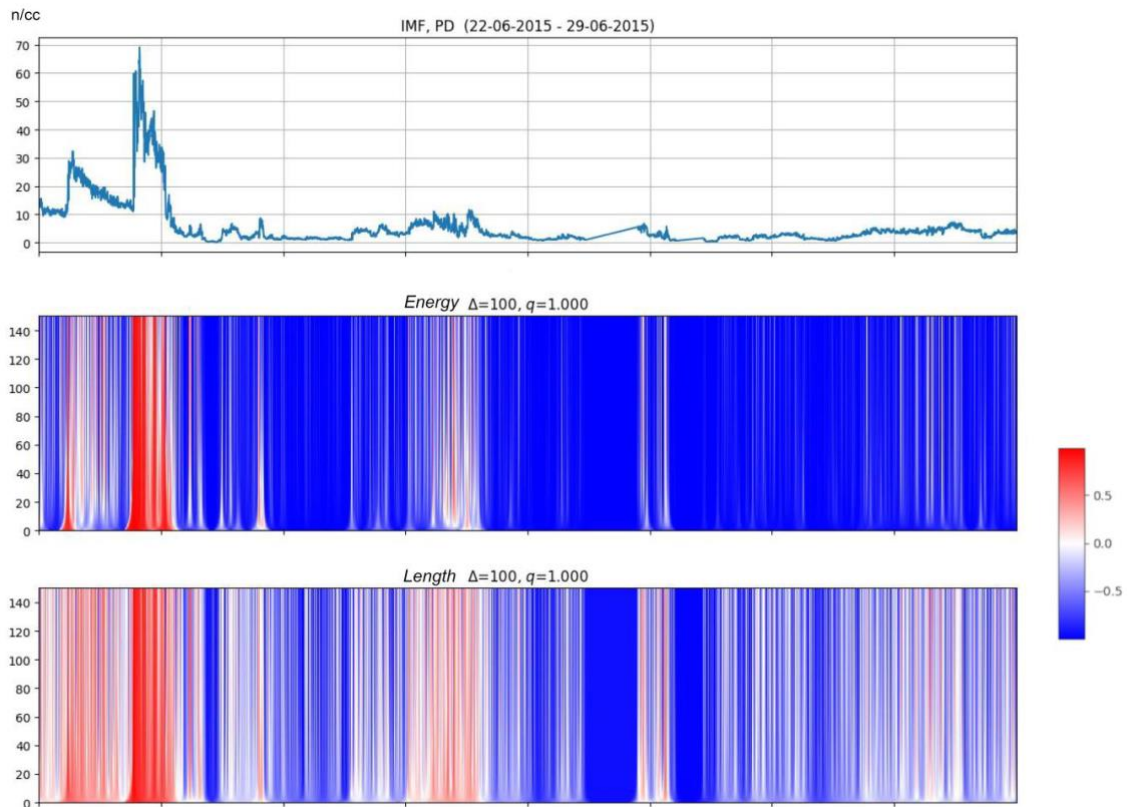


Рисунок 5.10 – Анализ плотности потока протонов в период магнитной бури 22–29.06.2015 с помощью меры активности: исходные данные (сверху), график меры активности для выпрямления «Энергия» (в центре) и для выпрямления «Длина» (снизу)

Список использованных источников

- Магниторазведка: Справочник геофизика / под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. – М.: Недра, 1990. – 470 с.
- Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. – Warsaw: IAGA, 1996. – 235 p.



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

Номер темы в ИСГЗ: 17-17-01215П

Номер: АААА-А18-118021990128-8

Руководитель: директор, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев
Ответственный исполнитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

Разработанная на предыдущих этапах модель генерации и развития коронального выброса массы (КВМ) в гелиосфере с учетом особенностей различных фаз солнечного цикла и полярности межпланетного магнитного поля (ММП) была применена к периодам минимума 24-го солнечного цикла (СЦ) и в периоды разной полярности. Модель была настроена по данным спутниковых приборов SOHO (LASCO), GOES, сопоставлена с моделями развития КВМ. Были смоделированы КВМ периоды разной полярности ММП и проанализировано поведение протонов, пришедших с периферии солнечной системы (3 и 10 а.е.) (рис. 6.1). С помощью обобщенной методики расчета обратных траекторий (backtracking) были прослежены протоны со средней и медианной энергией, прошедших через возмущенную гелиосферу во время развития КВМ и давших поток мюонов в GSE-системе. Полученные распределения были сопоставлены с конусами асимптотических направлений мюонов в мюонном годоскопе (МГ) УРАГАН. Это дало возможность изучить динамику возникновения и развития областей локальной анизотропии космических лучей (КЛ) в угловом распределении потока мюонов по данным МГ УРАГАН. Распределение направлений протонов, попавших в апертуру УРАГАН, в периоды разной полярности кардинально различаются. Протоны со средней и медианной энергией, мюоны от которых попали в апертуру МГ УРАГАН, в периоды разной полярности МП Солнца приходят из разных внешних областей солнечной системы.

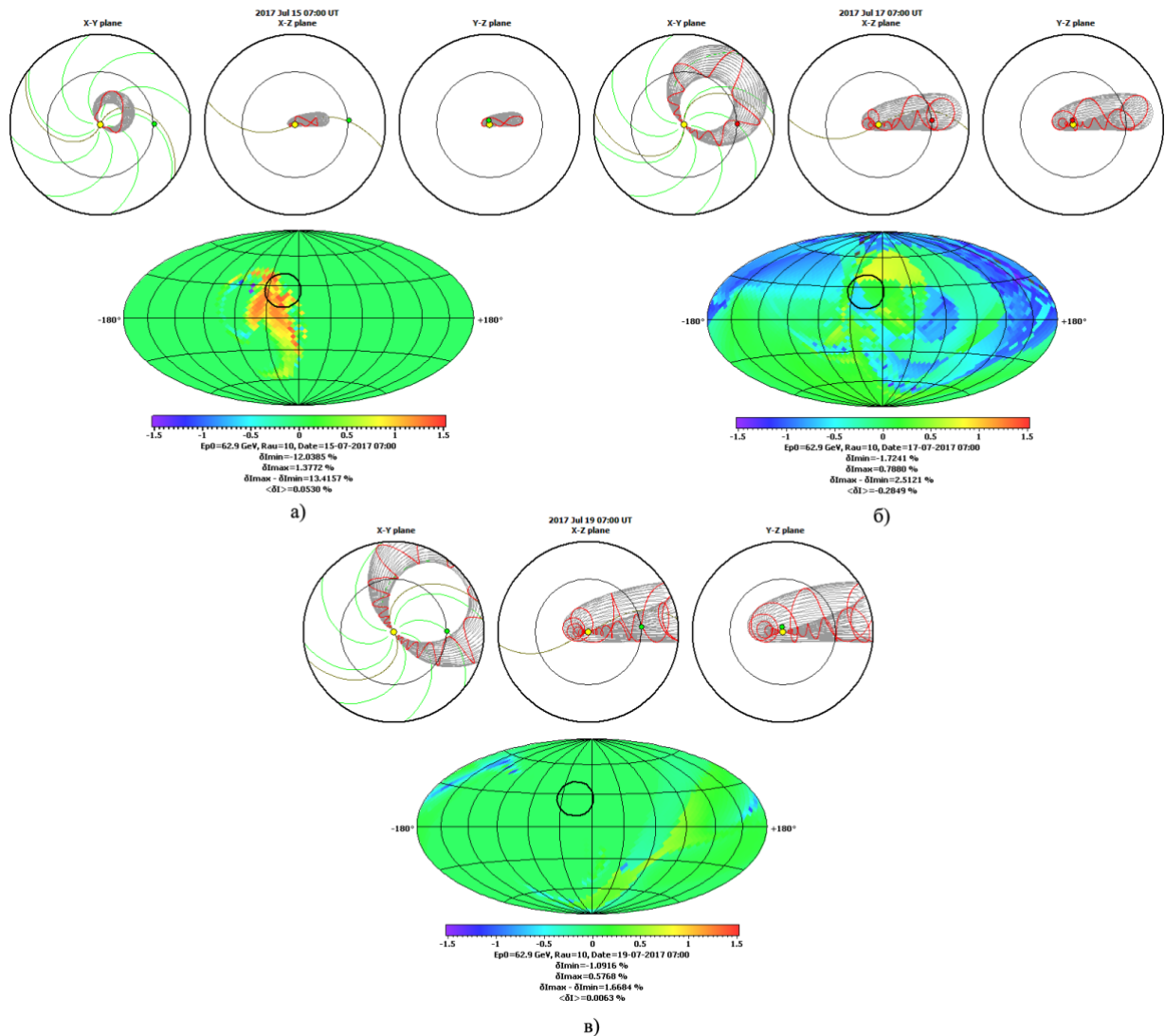


Рисунок 6.1 – Модель KBM 14.07.2017 и обратные траектории для протонов с энергией 62.9 ГэВ из точки расположения Земли в гелиосфере до расстояния 10 а.е. от Солнца: а) – За 26 часов до прихода KBM к Земле, б) – Во время расположения Земли в области KBM, в) – После выхода Земли из области KBM. Сверху – изображение KBM в трёх проекциях; снизу – GSE-отображение разницы изменений интенсивностей потока протонов в ячейках разбиения с учётом KBM и без его учёта для протонов с $E_{pEarth} = 62.9$ ГэВ; в середине и внизу чёрными линиями обозначены контуры асимптотических направлений протонов с энергиями 62.9 ГэВ для положительных мюонов, приходящих в МГ УРАГАН с энергией 3 ГэВ под зенитным углом 17°

Был проведен корреляционный анализ рядов выделенных карт «образов» (пятен) анизотропии, возникших во время генерации и развития геоэффективных KBM с целью изучения их динамики. Были получены оценки распределения временных промежутков между временем возникновения магнитных бурь и появлением областей локальной анизотропии для событий возмущения ММП, выявленных в периоды минимума СЦ (2009–2010 и 2018–2019 годы).



Была получена оценка эффективности метода заблаговременного выявления геоэффективных событий на основе разработанной модели. Были получены распределения времен между началом появления анизотропии и временем возникновения возмущения геомагнитного поля ($K_p > 4$) для всех проанализированных событий. Применение данного подхода к анализу геоэффективных событий в периоды минимума солнечной активности дало возможность получить среднюю оценку разницы времен между появлением первого «пятна» и моментом возникновения магнитной бури около 18 часов (рис. 6.2).

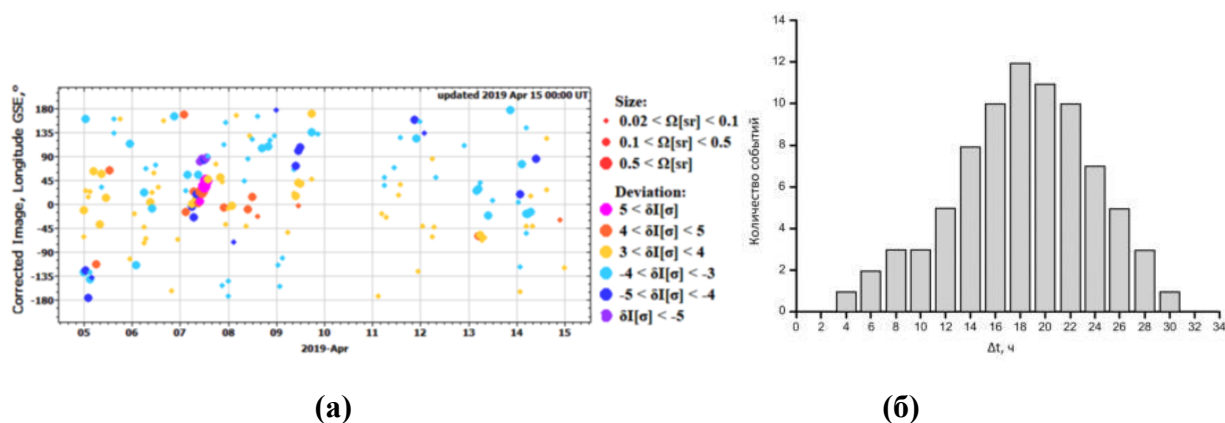


Рисунок 6.2 – а) – Области низкой и высокой интенсивности на мюнограммах в системе GSE на начало апреля 2019 года, б) – Распределение Δt – временного интервала между первым «пятном» и началом магнитной бури для всех проанализированных событий

Была дополнена база данных по «Космической погоде» за 2021 год. Были подготовлены ежемесячные справки по космической погоде за период январь-октябрь 2021 года с использованием данных, доступных из всемирных баз данных: GOES (мониторинг вспышечной активности), данных спутников SACTus (коронарограф LASCO) (отбор корональных выбросов масс), по спутнику ACE (состояние ближней гелиосферы), базы данных OMNI (информация о геомагнитной обстановке), с сайта ИПГ (Института прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова) (сводка о состоянии солнечной активности), с сайта ИЗМИРАН (информация о магнитных бурях и данных московского нейтронного монитора).

Были сформированы методы обработки данных МГ УРАГАН для решения задач раннего распознавания геоэффективных КВМ и прогноза геомагнитных бурь с учётом технологий апробации и оптимизации и получены оценки их эффективности.

Метод последовательной и параллельной КИХ-фильтрации временных рядов матричных МГ-наблюдений больших объёмов позволил установить, что параллельная фильтрация МГ-наблюдений является более эффективной для КИХ-фильтров малой

размерности, а последовательная фильтрация более эффективна для КИХ-фильтров большой размерности.

Метод одномерной и двумерной фильтрации временных рядов матричных МГ-наблюдений на основе скользящих аппроксимационных локальных одномерных и двумерных моделей со взвешенным усреднением обеспечил наименьшие погрешности фильтрации по сравнению с традиционными фильтрами и малые амплитудно-фазовые искажения. Он позволил оценить малые по длительности и амплитуде флуктуации в МГ-наблюдениях (рис. 6.3).

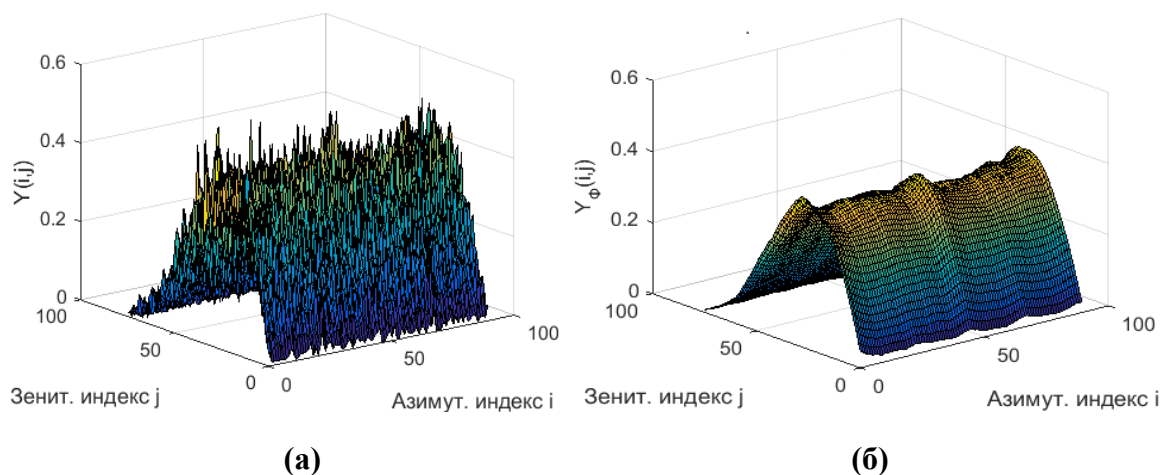


Рисунок 6.3 – 3D-изображение а) – Исходной матрицы МГ-наблюдений и б) – Результатов двумерной фильтрации

Метод квазигассовской фильтрации временных рядов матричных МГ-наблюдений обеспечивает учет пуассоновской природы МГ-наблюдений, которую необходимо принимать во внимание в задачах устранения высокочастотных шумов малой интенсивности и возможности реализации КИХ-фильтров с существенно малыми размерностями и амплитудно-частотными характеристиками с малыми частотами среза для МГ-наблюдений.

Метод нормированных вариаций функций распределения интенсивностей потока мюонов распознавания локальной анизотропии (ЛА) позволил свести проблемное вычисление ЛА для функций распределения интенсивностей потока мюонов к вычислению ЛА для функций нормированных вариаций. Нормированные вариации в значительной степени сняли необходимость точного оценивания аппаратной функции (АФ). Вычисленные двумерные нормированные вариации обеспечили высокую чувствительность к малым величинам исходных пространственных ЛА. Эффективность метода нормированных вариаций была подтверждена расчётами и статистическим



моделированием, а именно возможностью распознаваний ЛА с относительными понижениями 0,02–0,03.

Метод индикаторных матриц (ИМ) во временных рядах матричных МГ-наблюдений обеспечил возможность реализации решения задачи распознавания ЛА без необходимости оценивания АФ для МГ. Вычисляемые ИМ оказались чувствительными к малым величинам исходных пространственных ЛА. Эффективность метода ИМ подтверждалась расчётами и статистическим моделированием, а именно возможностью распознаваний ЛА с относительными понижениями 0,03–0,04. Тем самым, возможности метода ИМ по сравнению с методом нормированных вариаций несколько меньше.

Метод кластеризации позволил провести распознавание ЛА в ИМ. Эффективность предложенного метода кластеризации, по экспертным оценкам, определилась возможностью распознавания ЛА с понижениями 0,015–0,02.

Получены результаты применения методов раннего распознавания магнитных бурь на основе анализа временных рядов данных мюонного годоскопа УРАГАН за 24-й солнечный цикл и вычислены оценки их эффективности.

Методом функций интегральных интенсивностей (ФИИ) были обработаны временные ряды матричных МГ-наблюдений за 2008–2019 годы. с целью прогнозирования МБ. На контрольных временных участках были вычислены ФИИ с Форбуш-понижениями различной величины и соответствующая усреднённая модельная функция понижения. Эффективность метода ФИИ определялась вероятностью правильного распознавания МБ, которая составила, по экспертным оценкам, величину более 50%.

При применении нейросетевого метода для распознавания МБ на этапе обучения (2008–2017 годы) производилось построение нейросетевой модели Dst-индексов на основе преобразованных временных рядов Dst-индексов, наблюдений МГ и системы нейтронных мониторов. На этапе тестирования (с 2018 года по настоящее время) производилось вычисление модельных оценок Dst-индексов на основе наблюдений МГ и нейтронных мониторов. Предложено правило принятия решений по распознаванию МБ на основе сравнения модельных оценок Dst-индексов с задаваемым порогом, на основе которого использование наблюдений МГ и системы нейтронных мониторов позволило повысить вероятности правильных распознаваний. Эффективность предложенного нейросетевого метода распознавания МБ определялась вычисленными оценками вероятностей правильного (β) и ложного распознавания (α); так, для $\alpha < 0.05$, имело место предельное значение $\beta \leq 0,717$, для $\alpha < 0.1$ – имело место $\beta \leq 0,823$. Полученные

вероятностные характеристики принимали вполне приемлемые значения для практики распознаваний МБ.

При применении нейросетевого метода для прогнозирования магнитных бурь на этапе обучения (2008–2017 годы) производились построения нейросетевой модели Dst-индексов на основе преобразованных исходных временных рядов Dst-индексов, наблюдений МГ и системы нейтронных мониторов (рис. 6.4). При вычислении экстраполированных наблюдений МГ и нейтронных мониторов предложены соотношения для экстраполяции с применением скользящих полиномиальных аппроксимационных моделей с регулируемым количеством индексов экстраполяции и аппроксимации. На этапе тестирования (с 2018 года по настоящее время) производились вычисления экстраполированных модельных оценок Dst-индексов на основе экстраполированных наблюдений МГ и нейтронных мониторов. Предложено правило принятия решений по прогнозированию МБ на основе сравнения экстраполированных модельных оценок Dst-индексов с задаваемым порогом, на основе которого использование наблюдений МГ и системы нейтронных мониторов позволило повысить вероятности правильных прогнозов. Эффективность предложенного нейросетевого метода прогнозирования МБ определялась вычисленными коэффициентами правильного и ложного прогнозирования. Вычисление указанных коэффициентов позволило установить их усредненные значения, которые оказались равными $\sim 70\%$ и $\sim 20\%$, соответственно, и которые можно принять в качестве вполне приемлемых.

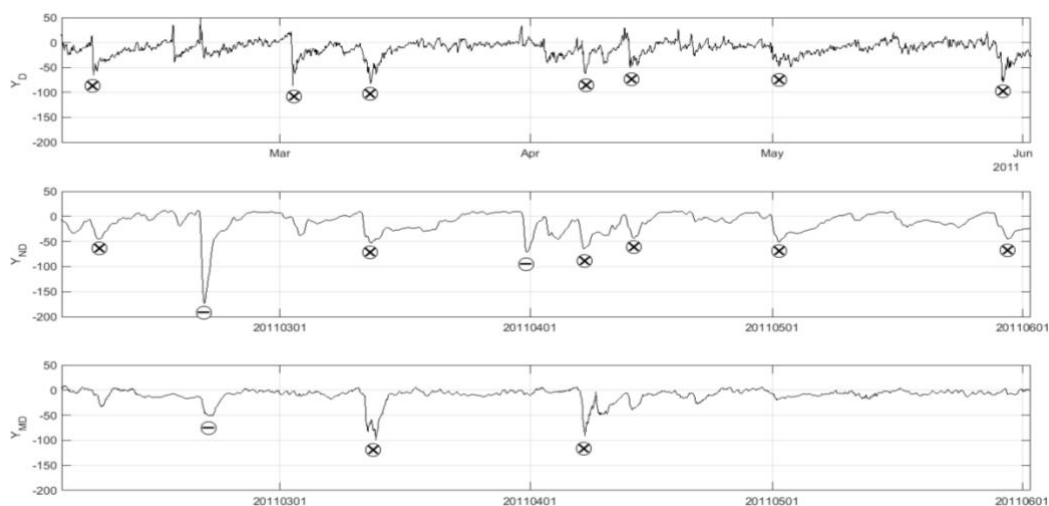


Рисунок 6.4 – Графики Dst-индексов $Y_D(k)$ и модельных оценок Dst-индексов $Y_{DN}(k)$, $Y_{DM}(k)$ для интервала 01.02.2011–31.05.2011. Правильное распознавание магнитной бури отмечено знаком «крест в кружочке», ложное распознавание отмечено знаком «минус в кружочке»



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

Грант РФФИ: 18-17-00241П

Номер госрегистрации: АААА-А18-118091090066-5

Руководитель: акад. А. Д. Гвишиани

Ответственные исполнители: д.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев, д.т.н. В. И. Кафтан,
д.т.н. В. Н. Татарин

Исследования были сосредоточены на 3-х основных задачах:

1) Оптимизация структуры сети геодинамического полигона в соответствии с выводами и рекомендациями по результатам проекта РФФИ 2018–2020 годов, разработка способов повышения точности ГНСС-мониторинга;

2) Получение новых экспериментальных данных о современной геодинамике района на основе ГНСС-наблюдений и численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород Нижнеканского массива;

3) Развитие методики системного анализа на основе ДМА в приложении к задачам оценки геодинамической устойчивости структурного блока, вмещающего пункт глубинного захоронения РАО, усовершенствование и разработка новых алгоритмов анализа геолого-геофизических данных и программных модулей их реализации.

Для решения первой задачи были выполнены комплексные исследования, включающие:

а) изучение и анализ опыта установки скальных ГНСС-центров в зарубежных подземных исследовательских лабораториях (ПИЛ);

б) разработку конструкции, изготовление и лабораторные испытания на устойчивость центра скального ГНСС-пункта, пригодного для физико-географических условий района (рис. 7.1);

в) проведение рекогносцировочных работ для поиска мест установки ГНСС-пунктов;

г) установку центров ГНСС-пунктов в выходах коренных скальных пород.

В результате полевых работ было установлено шесть скальных ГНСС-центров. В августе 2021 года состоялась экспедиция в район Нижнеканского массива для:

а) проведения очередной эпохи ГНСС-наблюдений за СДЗК;

б) экспериментальной проверки полевой методики оценки точности ГНСС-измерений в различных физико-географических условиях.

Наблюдения на 33 ГНСС-пунктах проводились в течение 10 дней – с 3 по 14 августа 2021 года. Было измерено 108 базовых линий центров. На рис. 7.2 показано расположение

пунктов.

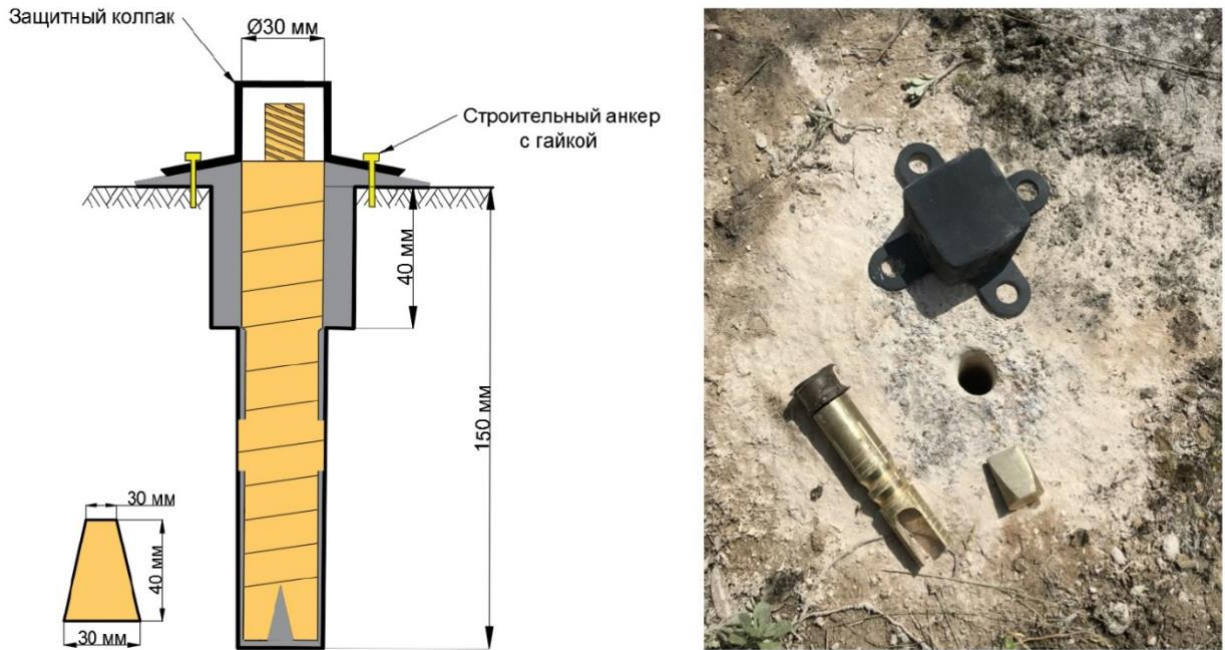


Рисунок 7.1 – Схема и вид оптимальной конструкции скального центра

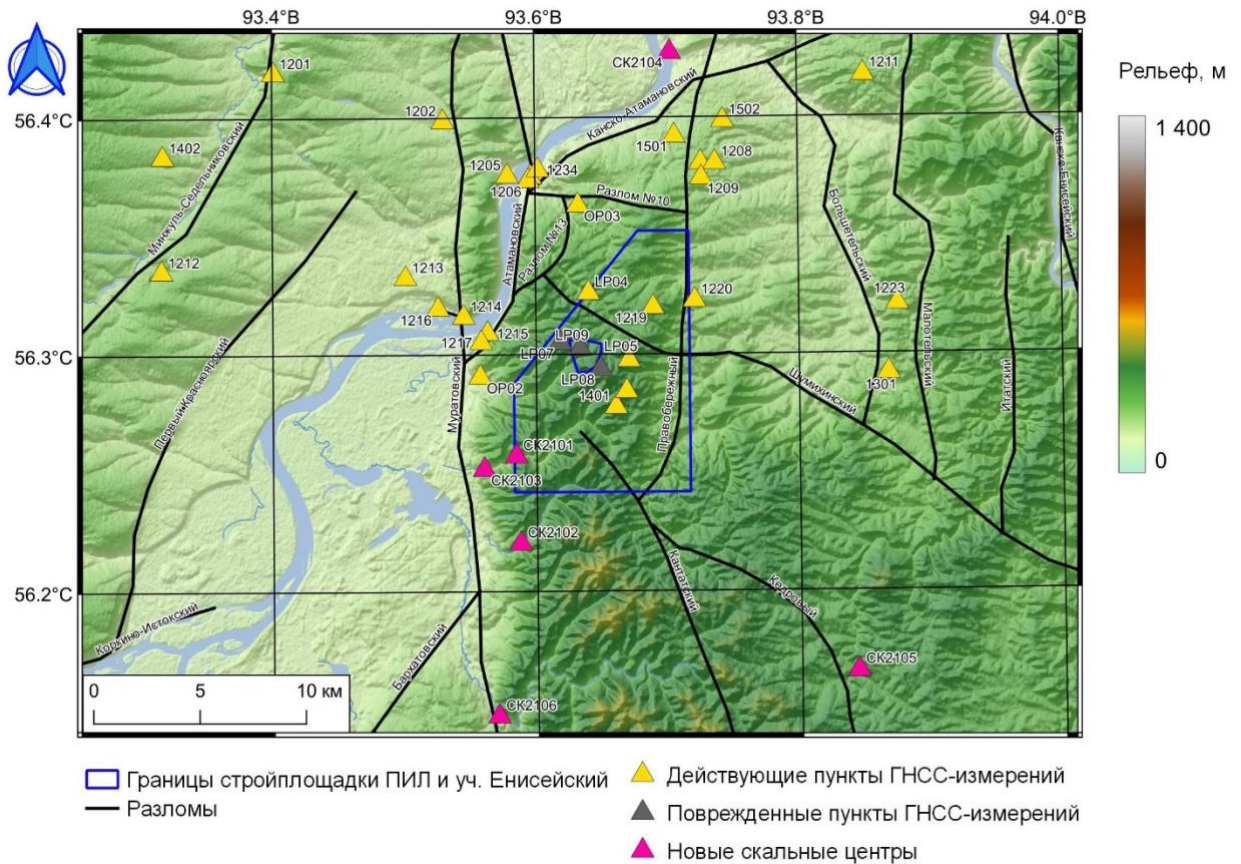


Рисунок 7.2 – Схема ГНСС-измерений, выполненных в 2021 году

Для совершенствования методики полевого контроля ГНСС аппаратуры в 2021 году



были продолжены исследования ее возможностей в различных физико-географических условиях. Была выбрана базовая линия, расположенная в относительно благоприятных условиях приема спутниковых сигналов на левом берегу р. Енисей. Длина линии 1,3 км. Результаты контроля аппаратуры Topcon SR Hiper, Javad Maxor, PrinCe i50, Javad Delta 3N представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты контроля ГНСС-аппаратуры

Вероятнейшие значения	Компонента dE (мм)		Компонента dN (мм)		Компонента dU (мм)	
	δE	$m_{\delta E}$	δN	$m_{\delta N}$	δU	$m_{\delta U}$
1	2	3	4	5	6	7
x_1	-1,1	1,5	-0,1	1,3	1,7	1,8
x_2	0,6	1,4	-0,5	1,2	-1,1	1,8
x_3	3,0	1,6	-1,5	1,4	-2,1	2,1
x_4	-0,2	1,4	1,2	1,1	2,2	1,7
x_5	-0,4	1,7	0,3	1,4	0,4	2,1
x_6	-1,9	1,7	0,7	1,4	-1,1	1,9

Точность контроля характеристик в плане находится на уровне от 1 до 1,5 мм, по высоте – 2 мм. По предварительным оценкам должна быть достигнута точность деформационного анализа с СКО не более 10^{-7} .

В рамках второй задачи были выполнены многовариантные расчеты напряженно-деформированного состояния породного массива с различными граничными условиями и расположением геодинамических зон (активных разломов) в районе пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Для вычислений был применен авторский метод моделирования блочного гетерогенного упруго-изотропного массива, нарушенного системой тектонических разломов. Из полученных результатов следует, что определяющим в формировании полей напряжений на участке «Енисейский» является структурный фактор. За счет его формируется мощная зона концентрации напряжений на левом берегу р. Енисей в пределах Западно-Сибирской плиты. При этом на самом участке «Енисейский» величина интенсивности напряжений относительно низкая.

В рамках решения третьей задачи были выполнены исследования по разработке новых динамических мер и показателей их активности и расчет интегральной меры геодинамической безопасности, геодинамическое районирование территории на основе функционального алгоритма FDPS, а также продолжены работы по разработке новых динамических мер и показателей активности геологической среды на основе метода ДМА. В расчете интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ были использованы меры активности по следующим слоям: 1, 2 – изрезанность и изменчивость рельефа, 3 –

градиент высот по ЦМР; 4 – кратчайшее расстояние до разломов; 5 – плотность разломов; 6 – напряжения σ_{xx} ; 7 – напряжения σ_{yy} ; 8 – интенсивность напряжений σ ; 9 – деформации E_{xx} ; 10 – деформации E_{yy} ; 11 – дилатация E_d ; 12, 13 – изрезанность и градиент изменения аномалий магнитного поля $E_m, \nabla_M(w)$.

Был выполнен анализ корреляционной матрицы мер активности динамических показателей μD_f (рис. 7.3). Установлено, что 65 из 78 значений корреляции мер активности динамических показателей μD_f имеют слабую корреляционную связь. Это является хорошим результатом с точки зрения анализа данных, так как признаки должны быть не коллинеарными, иначе из-за высокой дисперсии данных снижается обобщающая способность интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$.

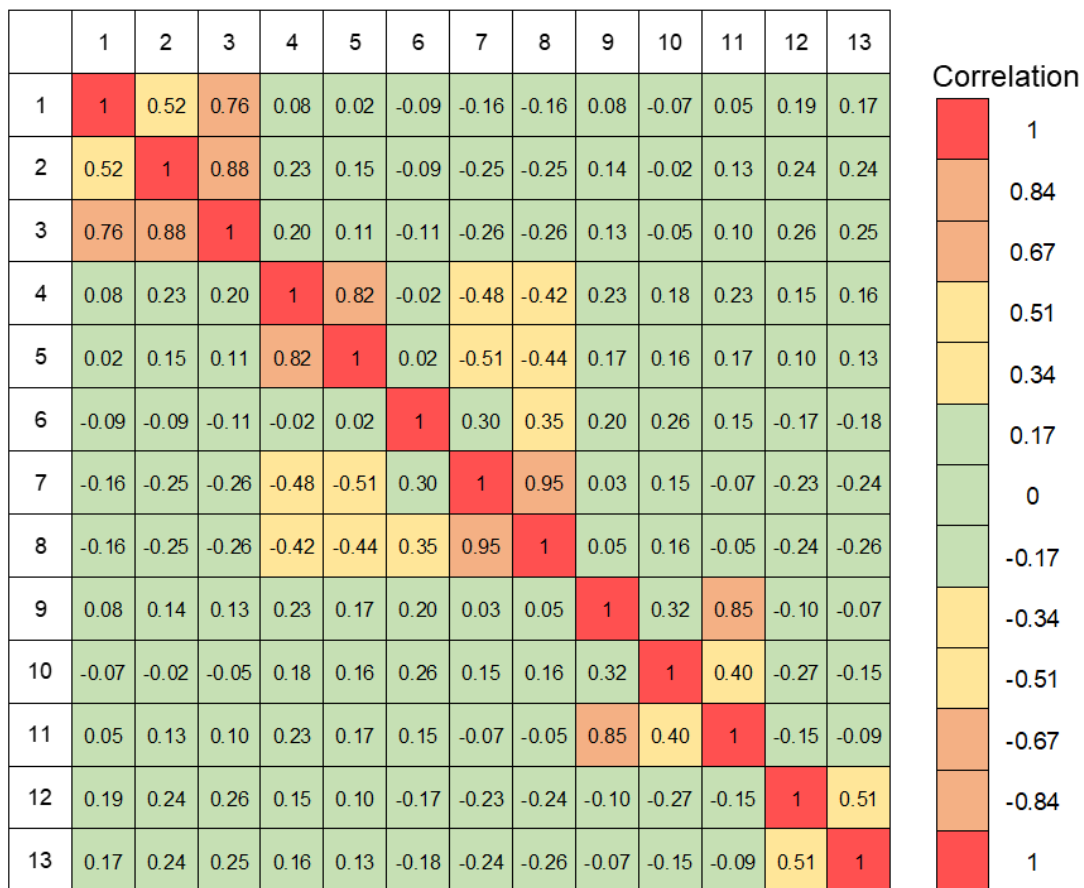


Рисунок 7.3 – Матрица корреляций меры активности динамических показателей μD_f : 1–13 меры: рельефа, $\mu L_{Re}^1(w)$; $\mu L_{Re}^2(w)$; градиента рельефа, $\mu \nabla_{Re}(w)$; кратчайшего расстояния до разлома, $\mu \rho(w, \mathcal{P})$; плотности разломов, $\mu \rho(w)$; напряжения, $\mu \sigma_{xx}(w)$; $\mu \sigma_{yy}(w)$; интенсивности напряжений, $\mu \sigma_i(w)$; мера деформации, $\mu e_{xx}(w)$; $\mu e_{yy}(w)$; дилатации, $\mu E_D(w)$; аномального магнитного поля, $\mu L_M^2(w)$; $\mu \nabla_M(w)$.

В итоге, вычисление интегральной меры $S_F(w)$ производилось на основе соединения



4-х мер: особенностей рельефа, близости и плотности разломов, напряженно-деформированного состояния и особенностей аномального магнитного поля:

$$S_F(w) = \frac{S_{Re}(w) + S_p(w) + S_s(w) + S_M(w)}{4}$$

Пространственное распределение интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ приведено на рис. 7.4. Зеленый оттенок соответствует наиболее устойчивому состоянию, красный – наименее устойчивому, желтый – промежуточные зоны. Шкала карты разделена на 3 части: условно безопасные ($S_F \geq 0,65$), нейтральные ($0,45 < S_F < 0,65$), опасные ($S_F \leq 0,45$).

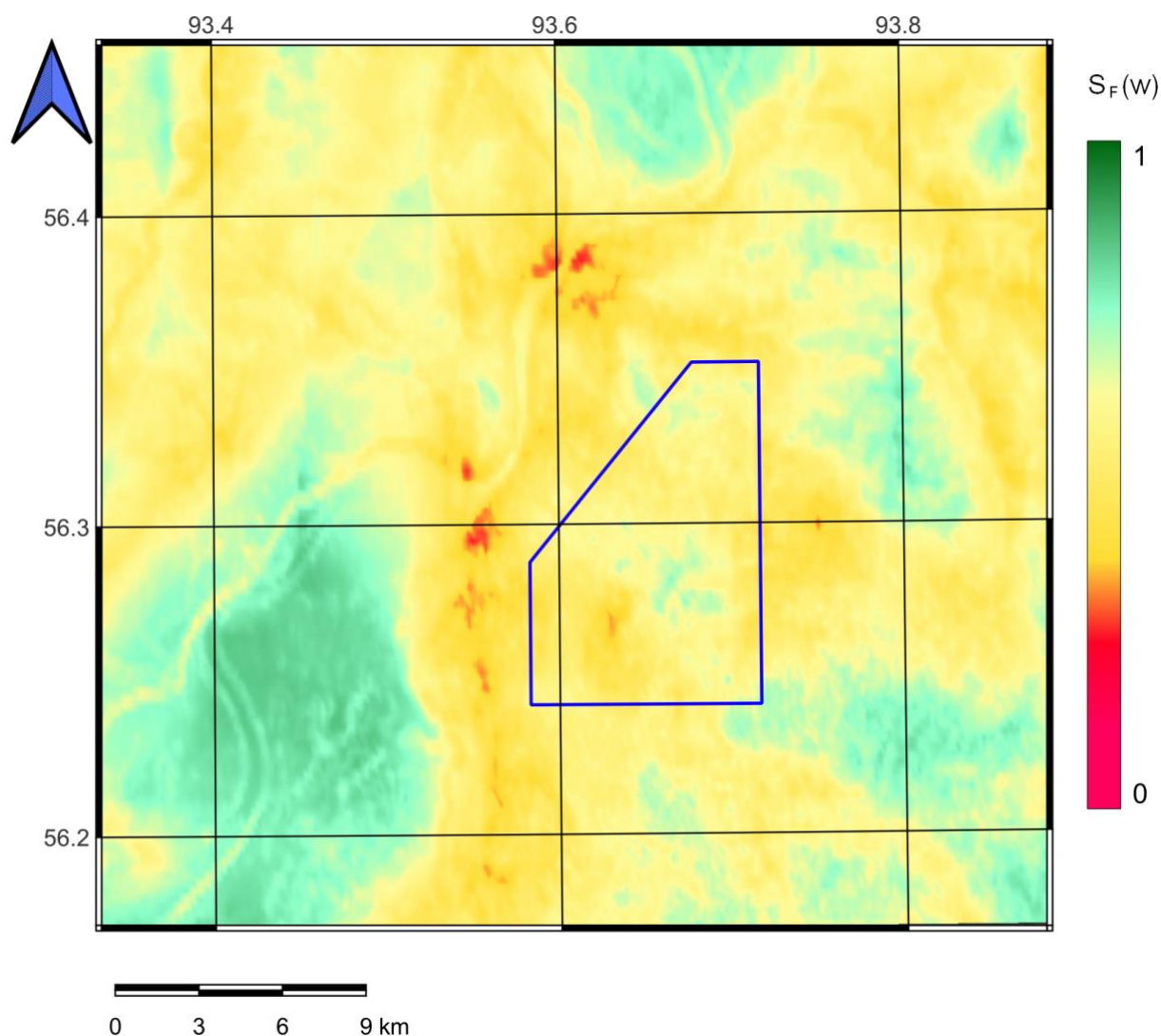


Рисунок 7.4 – Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$. Шкала: безопасные ($S_F \geq 0,65$), переходные ($0,45 < S_F < 0,65$), опасные ($S_F \leq 0,45$)

Карта обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности, представленная на рис. 7.3, затем была обработана с помощью алгоритма *FDPS*. На рисунке 7.5 показаны результаты использования алгоритма *FDPS* с показателем уровня плотности

$\alpha=0,30 \dots \alpha=0,45$ для интегральной меры безопасности и $\gamma=0,00437$. Видно, что на западе площадка ПГЗРО граничит с мощной неустойчивой зоной (синий цвет), связанной с зоной контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы.

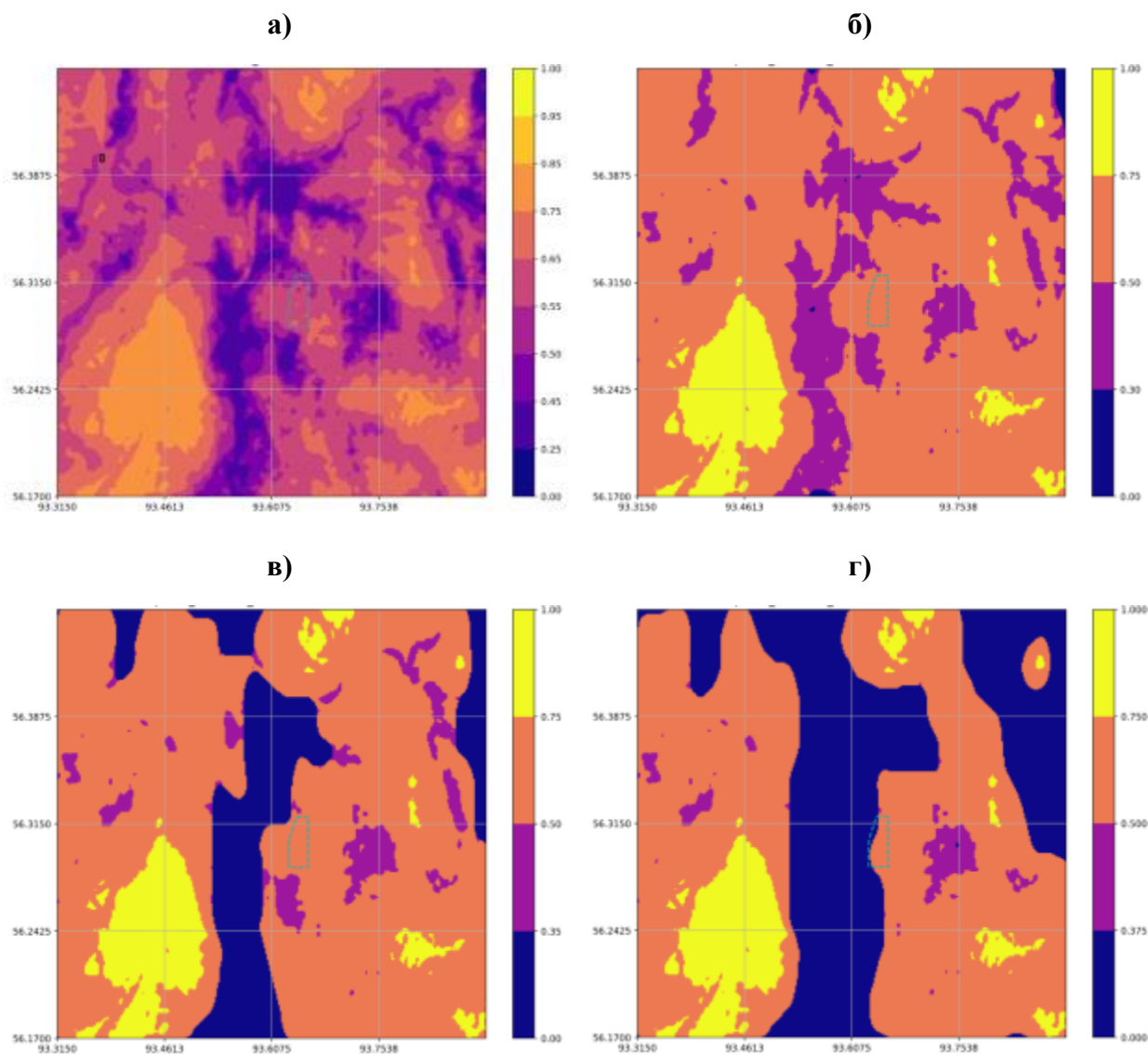


Рисунок 7.5– Результаты кластеризация алгоритмом FDPS обобщенной интегральной меры геодинамической безопасности $S_F(w)$ а – исходные данные, с границами $\alpha =0,30$; б – $\alpha =0,35$; в – $\alpha =0,375$; г – $\alpha =0,4$

Актуальной задачей при прогнозе сохранности изоляционных свойств пород является выделение в многомерном массиве геопространственных данных (геофизические поля, геохимия, космические снимки, рельеф, карты современных движений, данные сейсмологического мониторинга и др.) линейно вытянутых аномалий. Идеология системного подхода, заложенная в алгоритме FCAZ, созданном ранее для анализа

распределения точечных объектов, получила дальнейшее развитие. Для поиска и выделения сгущений в виде линейных зон в облаке точечных геопространственных данных был создан принципиально новый алгоритм системного анализа данных LDPS (*Linear Discrete Perfect Sets*), продолжающий DPS-серии алгоритмов ДМА-кластерного анализа. На рис. 7.6 показаны работы на выбранном массиве Q всех упомянутых выше алгоритмов. Верхнее правое сгущение алгоритм LDPS линейным не считает, в то время как оно вошло в результат работы DBSCAN и OPTICS.

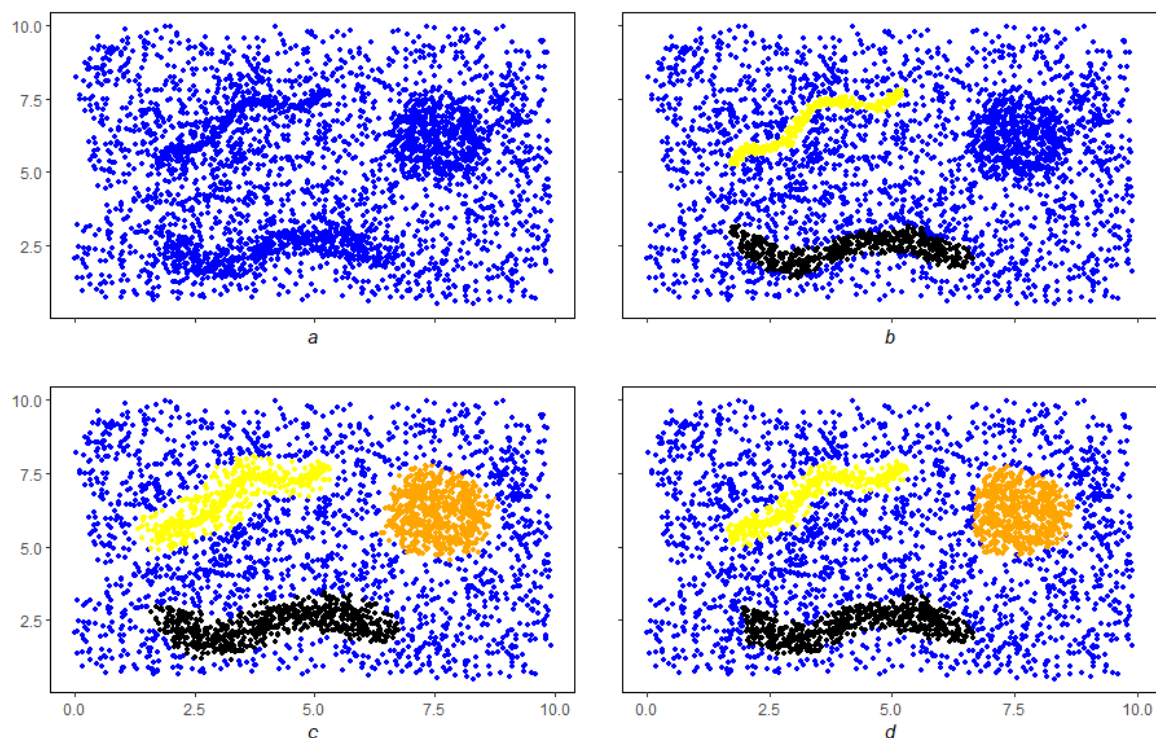


Рисунок 7.6 – Сравнение работы (а) на массиве Q , (b) алгоритма LDPS, (c) с алгоритмом DBSCAN, и (d) OPTICS

В 2021 году были собраны каталоги сейсмических явлений, которые были систематизированы по трем масштабным уровням 300 км, 30 км, 5 км, рекомендованным МАГАТЭ, и введены в ГИС. В качестве иллюстрации на рис. 7.7 отображены в ГИС-данные, собранные из федерального и регионального каталогов сейсмических событий за период 1960–2018 годов, а также, полученные ССМ «НО РАО» за период с 15 ноября 2018 года по 31 декабря 2020 года.

Системный подход в организации и проведении полевых наблюдений, моделировании НДС и последующий анализ и интерпретация геолого-геофизических данных с использованием алгоритмов системного анализа, разработанных школой академика А. Д. Гвишиани, позволили в итоге получить новые фундаментальные знания об устойчивости геологической среды, необходимые для прогнозирования изоляционных

свойств породных массивов и обеспечения геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО на участке «Енисейский» Нижнеканского массива.

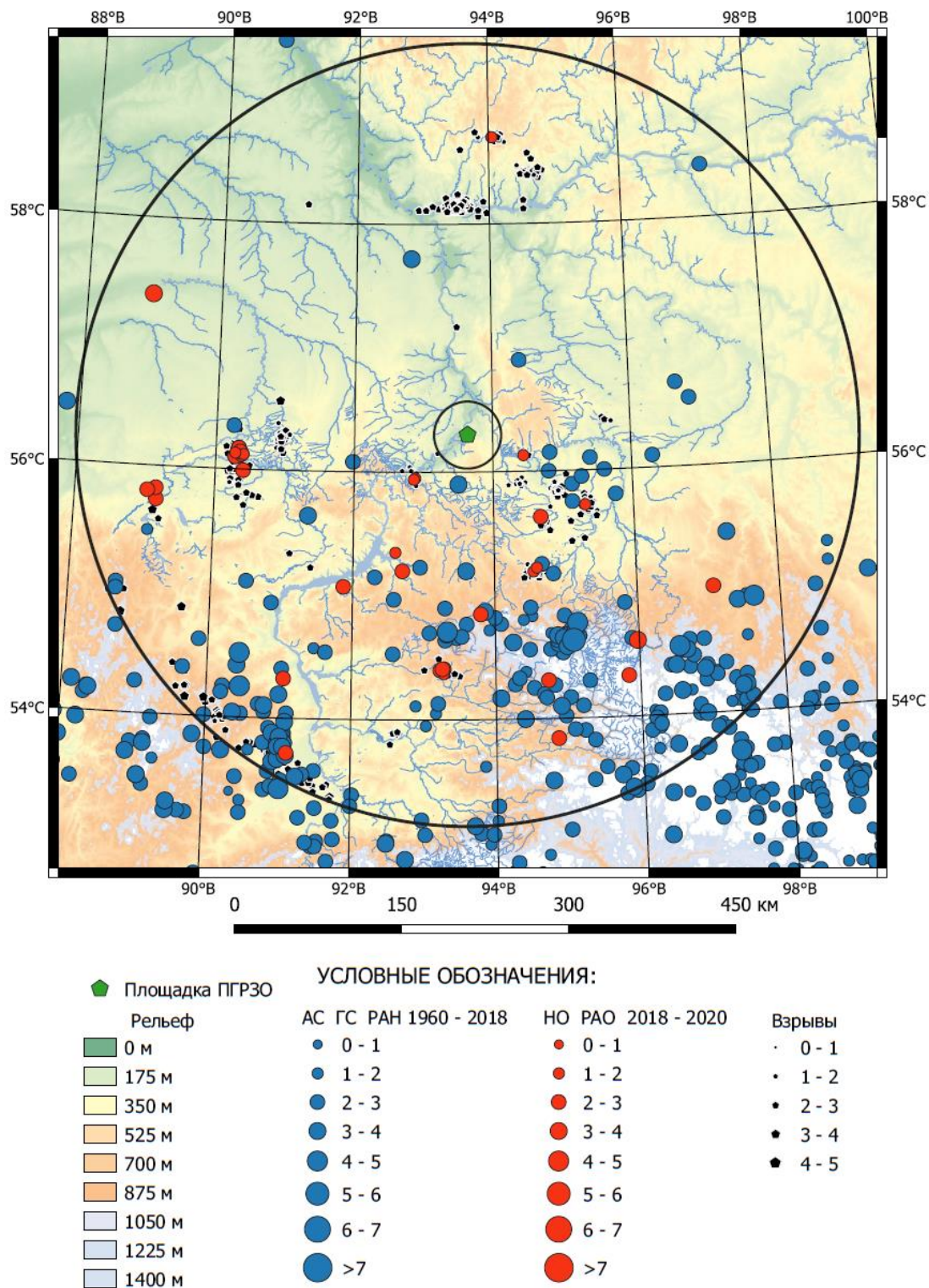


Рисунок 7.7 – Сейсмические события из федерального и регионального каталогов за период 1960–2018 годов. и данные системы сейсмологического мониторинга НО «РАО» за период с 15 ноября 2018 года по 31 декабря 2020. Большой круг – район исследования $R=300$ км, маленький – пункт $R=25$ км



Scopus, из них – одна в журнале с квартилем Q1.

A. D. Gvishiani, V. N. Tatarinov, A. I. Manevich, V. I. Kaftan. Geodynamic interpretation of modern geodynamic movements in the Southern part of the Yenisei ridge (in application to the problem of underground isolation of radioactive waste) // Eurasian Mining. 2021. №2. P.7–11. DOI: 10.17580/em.2021.02.02. Scopus: SJR(2020) – 1,07, Q1.

Agayan S., Bogoutdinov S., Kamaev D., Kaftan V., Osipov M., Tatarinov V. Theoretical framework for determination of linear structures in multidimensional geodynamic data arrays // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 24:11606. DOI: 10.3390/app112411606. Scopus: SJR (2020) – 0,44, Q2.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Лосев И. В., Татаринов В. Н. Методика оценки геодинамической опасности структурного блока, вмещающего объект подземной изоляции РАО // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 5–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_5. Scopus: SJR (2020) – 0,33, Q2.

Kolesnikov I.Yu., Tatarinov V. N., Tatarinova T. A. Deformation transverse shear bending state of a thin plate layer of an anisotropic geological medium from the action of concentrated energy impulses // Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. 2021. Vol. 1. p. 117–121. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6510. Scopus.



8 Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса

Грант РФФИ: 19-77-10075

Номер: АААА-А19-119082190032-6

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

8.1 Проведение аналитических исследований и результаты полевых исследований

Конкретным научным направлением настоящего проекта РФФИ 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, 13,6 и 16,6. Были проведены необходимые лабораторные исследования: были измерены и исследованы стандартные магнитные параметры: естественная остаточная намагниченность NRM, магнитная восприимчивость



α , 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 $\alpha(T)$, 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 региона 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.

8.1 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 отсутствии 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 региоярусов 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 лессах, 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. 8.1) [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].

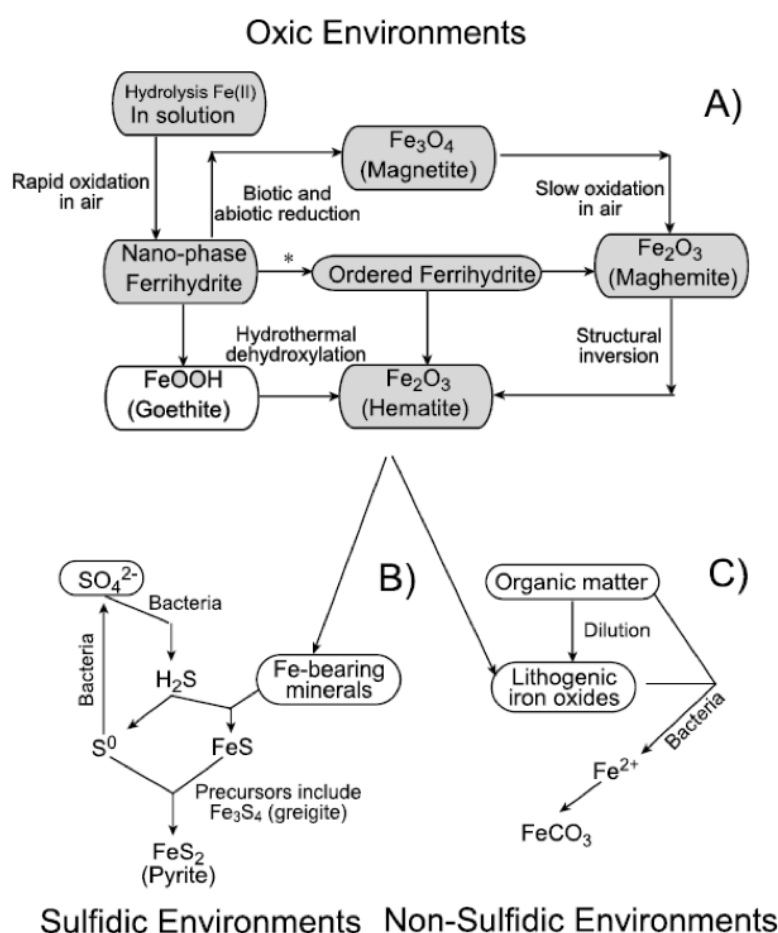


Рисунок 8.1 – Трансформация оксидов железа и сульфидов железа в (а) – кислородных средах; (б) – сульфидных средах; (с) – несulfидных бескислородных средах



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.

Магнетизм окружающей среды в основном связан с циклом Fe^{2+} и Fe^{3+} на небольшой глубине или на поверхности Земли, включая: выветривание и образование почв, эрозию и переотложение осадка, а также ранний диагенез. Преобразование Fe^{2+} в 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. 8.2).

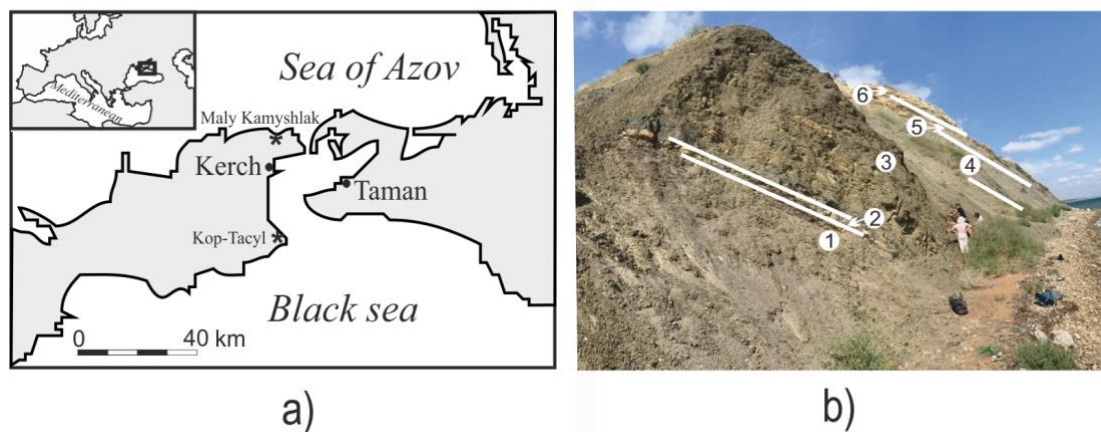


Рисунок 8.2 – (а) Схематическая карта местоположения разреза. На вставке в квадрате указано местоположение области исследования на географической карте. (б) Общий вид Тарханских отложений в разрезе Коп-Такыл (Керченский полуостров)

Осадки стратотипического разреза Керченского полуострова Коп-Такыл представляют собою глубоководные отложения среднего миоцена (рис. 8.3). Глубоководные осадки в отличие от мелководных в полной мере отражают геологическую летопись, что во многом определяет необходимость их изучения. В 2019–2020 годах 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 вкрест простирания 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 тарханчокракские породы, составляет 56 метров. По особенностям литологического строения отложений выделены интервалы монотонного строения глинистых толщ (Слои 1 и низы Слая 3), опесчанивания (верхи Слая 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.

Для получения данных по циклостратиграфии в камеральных условиях имеющие 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 K 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 χ , 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 Ю. К. Виноградова по зависимости $M_s(T)$ в магнитном поле 0,7 Тл; 2) на каппаметре Multi-Function Kappabridge (AGICO, Чехия) по $\alpha(T)$ на порошкообразных пробах массой $\sim 1 \text{ г}$; 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).

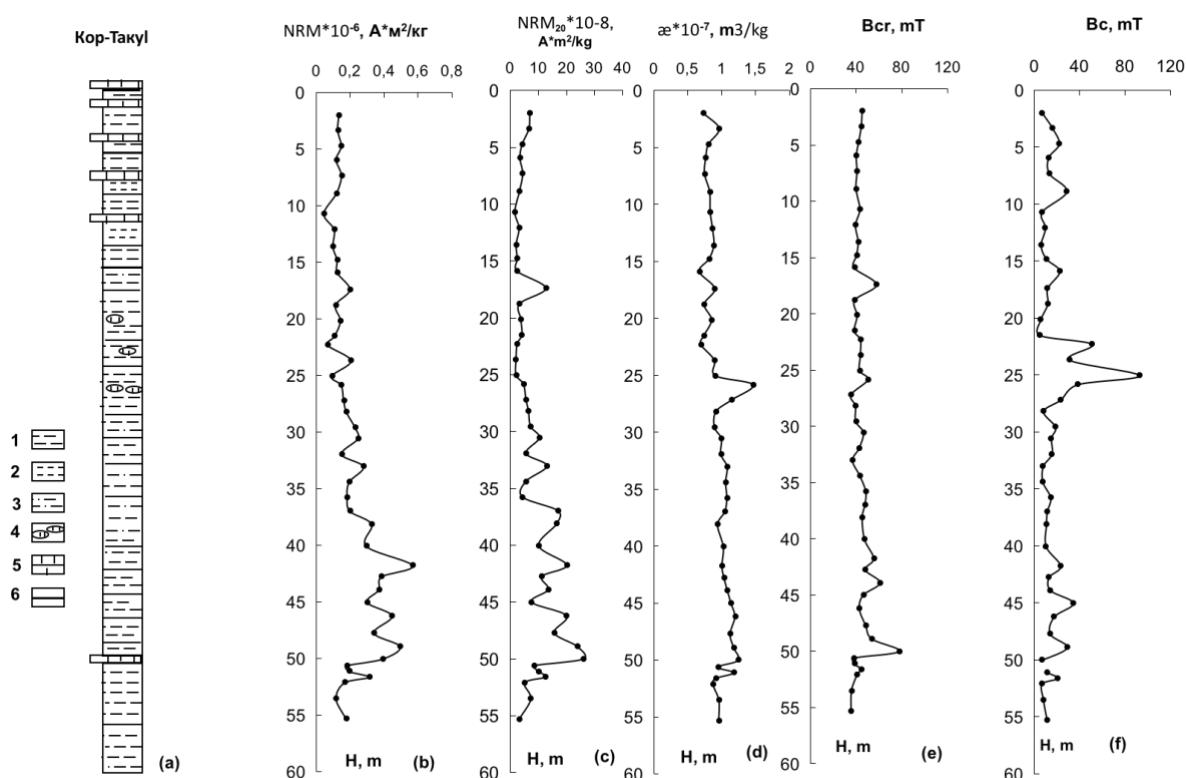


Рисунок 8.3 – (а) Литологическая колонка разреза Коп-Такыл. Обозначения: 1 – глина, 2 – известняковая глина, 3 – глина с тонкими песчаными слоями, 4 – карбонатные конкреции, 5 – карбонатные слои, 6 – границы слоев. Кривые вариаций магнитных характеристик от глубины разреза Н: (b) естественная остаточная намагниченность NRM, (c) естественная остаточная намагниченность NRM20 после размагничивания переменного поля 20 мТл, (d) магнитная восприимчивость α , (e) остаточная коэрцитивная сила B_{cr} , (f) коэрцитивная сила B_c .



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.



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

Номер темы в ИСГЗ: 21-77-30010

Номер регистрации: 121041200191-6

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

Проект посвящен комплексным геолого-геофизическим и климатическим исследованиям Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), включающим оценку влияния космической погоды, изучение структуры земной коры и осадочных бассейнов, исследование сейсмичности и оценку целого ряда климатических факторов. Объединяющим звеном проекта служит единая геоинформационная система (ГИС), предназначенная для комплексного анализа и визуализации новых данных, полученных по каждому из упомянутых направлений.

9.1 Исследование электромагнитных процессов околоземной среды и воздействий космической погоды на технологические системы

Для количественной оценки влияния спектрального состава пульсаций диапазона первых миллигерц ($Pc5-6/Pi3$) на эффективность возбуждения геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) был выполнен статистический анализ данных многолетних наблюдений ГИТ в ЛЭП «Северный транзит» на пункте Выходной (север Мурманской обл.) и магнитометрических данных на станциях сети IMAGE. Было установлено, что пульсации с несколькими спектральными максимумами вызывают ГИТ большей амплитуды, чем пульсации той же амплитуды с единственным максимумом. Показано, что амплитуды ГИТ, связанных с геомагнитными пульсациями умеренных амплитуд, могут быть сравнимы с ГИТ во время бури. Кроме прямого воздействия электромагнитных процессов в околоземной среде на наземные энергетические системы, возможно и обратное антропогенное воздействие на верхнюю ионосферу излучением ЛЭП на промышленных частотах 50/60 Гц и их гармоник. Для оценки механизмов и эффективности этого воздействия проведен количественный расчет электромагнитного «загрязнения» околоземного пространства излучением промышленных ЛЭП. Разработана численная модель, которая позволяет рассчитать пространственную структуру электромагнитного возмущения в атмосфере и ионосфере для любых широт (кроме экватора) с произвольным наклоном геомагнитного поля B_0 . Расчеты показали, что при распространении в ионосфере возмущение рассматриваемого частотного диапазона не гидируется геомагнитным полем, но максимум волновой мощности на высотах F-слоя оказывается смещен к экватору от



вертикали. Величина отклика ночной верхней ионосферы слабо уменьшается с уменьшением широты. Амплитуда электрической составляющей излучения в верхней ионосфере, генерируемая несбалансированным током в ЛЭП с амплитудой 10 А, может достигать величин порядка 1 мВ/м, что достаточно для обнаружения спутником на низкой околоземной орбите (до 1000 км). Полученные результаты показывают, что в диапазоне 50–150 Гц наша планета находится в электромагнитном окружении в большей степени создаваемым промышленной деятельностью, чем природными процессами.

Предложен метод, позволяющий в квазиреальном времени моделировать пространственно-временное распределение электротеллурического поля с использованием трехмерной модели проводимости Земли. Апробация методики проведена для трехмерной модели проводимости Фенноскандии с высоким разрешением и реалистичного источника, построенного с использованием метода сферических элементарных токовых систем (SECS) применительно к данным сети магнитных станций. Показано, что при таком подходе время на вычисление теллурических полей для сетки 512×512 не превышает 25 мс, что позволяет вести расчет в квазиреальном времени. Предложенный метод апробирован для расчета теллурических полей во время магнитной бури 7–8 сентября 2017 года.

Описаны разработанные средства визуализации аврорального овала и планетарного распределения значений возмущений и производных по времени геомагнитного поля dB/dt. Рассмотрена организация информационного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников наблюдений МПЗ. Исследования, проведенные на примере многоуровневой системы цифровых двойников магнитных станций, показали целесообразность предложенного решения для сокращения физического объема формируемого пакета данных (заголовка с метаданными) по сравнению с известным подходом на основе текстового или DTDL-описания метаданных. Разработан подход, сформированы архитектура и методы динамической многопараметрической 2D/3D визуализации возмущений геомагнитного поля на базе фреймворка Django и открытых веб-ориентированных ГИС-платформ. Важная особенность системы заключается в представлении анализируемых параметров в виде изодинам и векторного поля. Разработанная система доступна по адресу <https://geomagnetic.ru/>. На основании этой системы началась разработка региональной статистической модели ГИТ, параметризованной по региональным геомагнитным индексам, которая даст возможность оценивать и прогнозировать интенсивность ГИТ в интересующем регионе РФ. Модель передана в РЖД для сопоставления с качеством поставляемой электроэнергии на северные участки ж/д-магистралей.



В качестве первого этапа для определения природы всплесков УНЧ-шумов на границах аврорального овала и создания статистической параметризованной модели продольных магнитосферно-ионосферных токов разработана онлайн-система для визуализации и анализа данных измерений продольных токов на спутниках SWARM. Система включает первичные данные (Level-1), производные продукты (Level-2), модели МПЗ и аврорального овала. С использованием этой онлайн-системы отобраны для дальнейшего анализа локализованные импульсные возмущения на авроральных широтах.

Подготовлен первый в отечественной литературе аналитический обзор возможных прямых и косвенных воздействий космической погоды на функционирование ж/д-автоматики и средств связи и навигации. Большая часть информации в мировой литературе рассеяна по труднодоступным источникам: отчетам, материалам совещаний, ведомственным сборникам. Анализ всех доступных источников показывает, что экстремальные возмущения космической погоды могут повлиять на ж/д-инфраструктуру как из-за прямого, так и косвенного воздействия на компоненты системы. В обзоре выделены сведения об основных факторах космической погоды, которые могли бы представлять угрозу для технологических систем. Особое внимание обращено на анализ модели работы рельсовых реле систем железнодорожной сигнализации во внешних теллурических полях. Показано, что косвенное воздействие космической погоды на технологические системы железных дорог может проявляться в нарушениях электроснабжения и происходить из-за деградации сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в авроральной области. Соответствующая статья была опубликована в соавторстве ГЦ РАН и АО НИИАС в журнале «Железнодорожный транспорт» (№ 12, 2021, с. 20–26).

В результате рекогносцировочных работ и предварительных геомагнитных измерений, проведенных на территории строящейся Международной арктической станции «Снежинка» (Приуральский район ЯНАО), определено место для развёртывания будущей высокоточной магнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. По итогам магнитной съемки выбраны участки с минимальными градиентами магнитного поля Земли – до 1 нТл/м по абсолютной величине, что соответствует рекомендациям IAGA по развёртыванию стационарных обсерваторских магнитных наблюдений. Определены места будущей установки приборных постаментов. Развёртывание новой обсерватории для мониторинга магнитного поля Земли на территории АЗРФ предоставит возможности для выполнения широкого круга исследований, включая изучение векового хода МПЗ, уточнение моделей МПЗ, изучение процессов в полярной ионосфере и магнитосфере и др.



9.2 Исследование крупных геологических структур и осадочных бассейнов на основе комплексного анализа гравитационного поля и других геофизических данных

В дополнение к имеющимся моделям осадочного чехла для центральной и западной части АЗРФ построены новые модели осадков для восточно-азиатского региона АЗРФ. Наибольшая глубина залегания кристаллического фундамента в рассмотренных осадочных бассейнах достигает 4–5 км. По результатам совместного анализа гравитационного поля, его градиентов и сейсмической томографии были определены глубины до границы Моховичича в восточной части АЗРФ, для которой практически отсутствуют сейсмические данные. В частности, выявлено повышение мощности земной коры до 47 км под Верхоянским хребтом. Новая модель также демонстрирует углубление Мохо в континентальной части, прилегающей к морю Лаптевых. Таким образом, вместе с картами для центральной и западной зон, основанными на интерполяции сейсмических данных, построены модели Мохо и кристаллического фундамента для всей АЗРФ.

Изучено распределение сейсмических скоростей в консолидированной коре и верхней мантии. Томографическая модель SL2013sv, выбранная в качестве основной, представляет значения аномалий вертикально поляризованных скоростей поперечных волн в коре верхней мантии. Латеральные вариации сейсмической скорости могут быть обусловлены изменениями температуры, локальными фазовыми переходами и неоднородностью состава. Как следует из анализа модели SL2013sv, скорости поперечных волн прямо коррелируют также с возрастом литосферы – на определенной глубине скорость возрастает с увеличением возраста. Однако эта зависимость становится практически неразличима вблизи нижней границы литосферы. Все эти особенности необходимо учитывать в дальнейшем при комплексном анализе плотностного и температурного строения литосферы.

Для восточной части АЗРФ в результате исследования структуры и плотности осадочных бассейнов на основе декомпенсационных аномалий силы тяжести получена плотностная модель осадочного чехла (значения плотности, усредненные по вертикали). В частности, в некоторых участках морей арктического шельфа выявлены локальные зоны с пониженными значениями плотности (рис. 9.1). Места со значениями плотности от 2,5 до 2,7 г/см³ соответствуют либо областям с малой мощностью осадков (такими, как область Верхоянской складчатости), либо местам распространения локальных уплотнений осадочных пород в ходе метаморфизма – например, при внедрении интрузий, что заметно в окрестностях Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Для консолидированной коры



распределение плотности было получено на основании вариаций сейсмических скоростей с использованием эмпирических соотношений. Значения средних скоростей в консолидированной коре варьируются от 2,75 до 2,9 г/см³ и прямо связаны с типом коры.

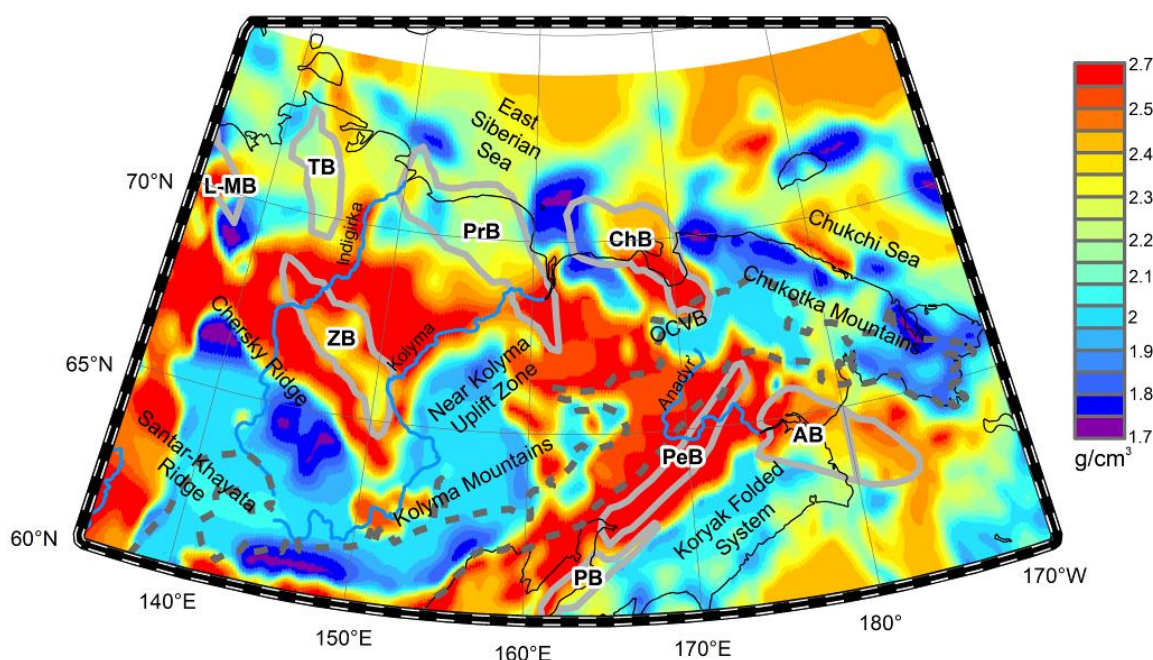


Рисунок 9.1 – Плотностная модель осадочных отложений для региона восточно-азиатской арктической зоны (плотность усреднена вертикально)

На основе топографической модели по значениям скоростей поперечных волн были рассчитаны значения температуры и плотности для слоёв верхней мантии с центрами на глубинах 50–300 км с шагом 50 км. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что, с увеличением глубины среза для одних и тех же значений скорости наблюдается увеличение значений температуры. Так, для скорости 4,5 км/с наблюдается последовательное возрастание температуры верхней мантии с 1000°C для глубины 50 км до примерно 1400°C для глубин 300 км. Типичные погрешности могут составлять 100°C и 0,01 г/см³ для крупных структур (500–600 км и более). Была создана и проанализирована база имеющихся в изучаемом районе инструментальных данных о тепловом потоке. Она была дополнена глобальной теоретической моделью.

Гравитационное поле и его градиенты представлены на сетках высокого разрешения, примерно соответствующего 10×10 км. Для этого была использована модель EIGEN-6с4. Кроме того, были вычислены поправки за рельеф, что позволило получить аномалии Буге, на основании которых были рассчитаны изостатические и декомпенсационные аномалии силы тяжести. Градиенты гравитационного поля получены непосредственно по данным спутника GOCE и, таким образом, дополняют данные о гравитационном поле.



9.3 Оценка сейсмической и иных геодинамических опасностей в районах перспективного развития инфраструктуры российской Арктики

Проведен анализ возможных геодинамических опасностей для населения и инфраструктуры в Арктических регионах. Показано, что большинство из них имеют узколокальный характер. По этой причине с учетом масштаба решаемых в проекте задач основное внимание должно быть сосредоточено на исследовании землетрясений. Для целей комплексной оценки сейсмической опасности и ассоциированных рисков создана ГИС-база данных, включающая материалы геофизических наблюдений, промышленные объекты и объекты инфраструктуры, которая будет включена в общую ГИС проекта. В процессе работ оказалось, что анализ сейсмичности восточной части Балтийского щита является предметом исследований коллег из ФИЦКИА УрО РАН. Во избежание возможного дублирования, целесообразно дождаться результатов исследования коллег, публикация которых была запланирована на 2021 год. Было принято решение на текущем этапе вместо восточной части Балтийского щита рассмотреть регион от восточной Сибири до полуострова Чукотка включительно. Исследованы существующие глобальные и национальные базы данных по основным параметрам землетрясений для региона Якутия-Северо-Восток-Чукотка. На основе новой методики автоматической идентификации дублей при объединении каталогов, созданной в рамках проекта, сформирован однородный калиброванный каталог землетрясений этого региона (1962 – июль 2021 года). На основе каталога получены локальные оценки коэффициентов закона повторяемости, параметры общего закона подобия и закона продуктивности землетрясений, которые в дальнейшем будут использованы для моделирования сейсмического режима и построения синтетического каталога землетрясений. Сформированный объединенный каталог составит основу данных, которые будут использованы для расчета сейсмической опасности и риска для линейных объектов (железные дороги, линии электропередач, трубопроводы и др.). Модифицирован системно-аналитический метод FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Это позволит в 2022 году провести анализ сейсмичности пояса Черского–Хараулахской зоны и распознать в его пределах места возможного возникновения сильных землетрясений в виде сейсмогенерирующих структур различной геометрии.

Исследованы существующие решения по оценке сейсмической опасности – карты Общего сейсмического районирования ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016. На основе анализа реальных землетрясений, которые произошли в период после публикации ОСР-97, установлено, что карты ОСР не только допускают пропуски сильнейших землетрясений (в частности, Абыйское землетрясение 2013 года с $M = 6,9$ на севере Якутии), но и значительно завышают сейсмическую опасность на огромных территориях – в среднем примерно в 10 раз в Арктических регионах.



9.4 Исследование климатических процессов, критичных для развития железнодорожной инфраструктуры

Изменения климата в регионе Белого моря связаны с крупномасштабной циркуляцией атмосферы в регионе Северной Атлантики и Европы. По данным о среднемесячной завихренности скорости ветра на уровне моря из данных реанализа NCEP/NCAR за период 1950–2020 годов выделено три периода ее роста (1950–1976 и 1999–2020) и падения (1977–1998) над акваторией Белого моря и территориями Мурманской и Архангельской областей и Республики Карелия, которые связаны как с ослаблением или усилением циклонической циркуляции, так и с глобальными климатическими сдвигами 1976/77 и 1998/99.

За весь рассматриваемый период (1950–2020 годы) рост температуры воздуха у поверхности (ТВП) составлял в среднем от +0,1 до +0,4 гр. С за 10 лет (рис. 9.2). Однако в первый выделенный период (1950–1976 годы) наблюдалось понижение ТВП на большей территории исследуемого региона в среднем от –0,02 гр. С за 10 лет, в особенности, в районах существования вечной мерзлоты (до –0,4 гр. С за 10 лет). Во второй период наблюдался рост ТВП в среднем от +0,1 до +0,4 гр. С за 10 лет. В третий же период этот рост существенно ускорился и составил в среднем от +0,4 до +1,0 гр. С за 10 лет. Показано продвижение тепла с юга на север (например, изотерма 2 гр. С на долготе 38 в.д. поднялась с 60 с.ш. практически до 65 с.ш.), что привело не к смещению холодных областей к северу, а к их выжиманию на запад и восток, соответственно.

С 1992 по 2018 год по данным альтиметрических измерений (спутники TOPEX/Poseidon, Jason–1/2/3, ERS–1/2, ENVISAT и SARAL/Altika) уровень Белого моря рос со скоростью $+3,32 \pm 0,61$ мм/год. Для сезона, когда ледяной покров на акватории моря не наблюдается (июнь, июль, август и сентябрь), скорость роста уровня моря изменяется от $+2,85 \pm 0,19$ мм/год в августе, до $+5,42 \pm 0,30$ мм/год в сентябре. Скорость сезонных изменений уровня моря составляет $2,94 \pm 1,59$ мм/год. Максимальная величина $8,17 \pm 3,42$ мм/год наблюдается в октябре, а минимальная $-3,43 \pm 1,42$ мм/год – в феврале. Значимые высоты волн для сезона, когда ледяной покров на акватории моря не наблюдается, показали общую тенденцию на снижение. Максимальный линейный тренд $-1,29 \pm 0,64$ см/год наблюдается в сентябре, минимальный $1,10 \pm 0,53$ см/год – в августе.

Межгодовая изменчивость уровней Ладожского и Онежского озер, по данным альтиметрических измерений (спутники TOPEX/Poseidon и Jason–1/2/3) за 28 лет (1993–2020 годы), составила +6,9 мм/год и +4,59 мм/год соответственно, а размах межгодовых

колебаний – 2,28 м и 1,49 м, соответственно. По результатам вейвлет-анализа подтверждено наличие в данных об уровне Ладожского и Онежского озер волн с периодом 4–5 лет и 15 лет, соответственно.

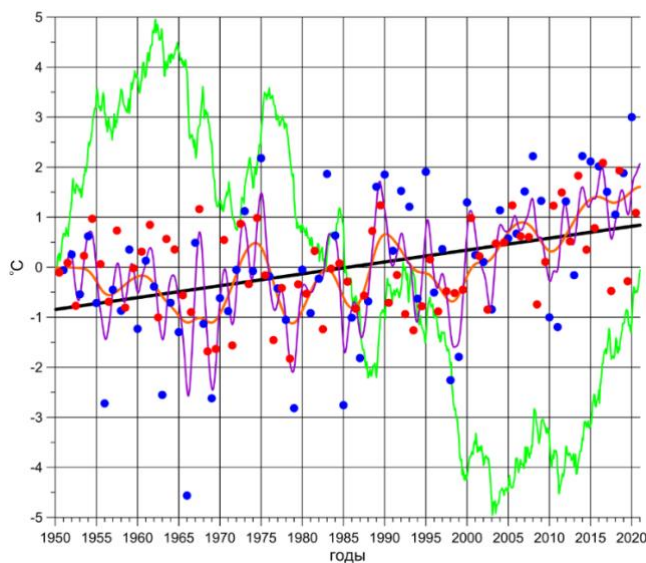


Рисунок 9.2 – Изменения средних аномалий ТВП в регионе Белого моря за 1950–2020 годы, сглаженные 2-летним (фиолетовый) и 7-летним (оранжевый) фильтрами Баттерворта нижних частот. Их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май-октябрь) (красный) и холодного (ноябрь-апрель) (синий) полугодий

Исследована межгодовая изменчивость глобальных среднемесячных аномалий ТВП, давления на уровне моря, скорости ветра у поверхности, количества осадков и общей облачности. Рассчитаны амплитуды аномалий этих гидрометеорологических характеристик между противоположными фазами Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). Результаты показывают, что колебания этих характеристик связаны с ГАО не только в тропическом поясе Земли, но и в средних и высоких широтах, особенно в Арктике и Северной Евразии (рис. 9.3). Выяснилось, что ГАО вызывает рекордные температурные аномалии в Арктике и на севере Евразии, которые могут оказать значительное влияние на вечную мерзлоту и, как следствие, на жилую, железнодорожную, автомобильную и трубопроводную инфраструктуру в этом регионе России.

Проанализированы возможные механизмы возникновения полярных аэрозолей. Наиболее перспективным для будущего исследования – механизмы возникновения и транспорта вещества микрометеоритов. Первую порцию энергии влетающая частица получает при столкновении с молекулами (ионами) верхней ионосферы. Это может приводить к каскадному развалу влетевшего метеорита с дальнейшим испарением его обломков. Из выброшенных паров в нижних слоях ионосферы образуются аэрозольные



частицы. Как раз ионные температуры этих слоев соответствуют условиям образования ионосферного аэрозоля. Задача, которая ставится, – построить теорию этих процессов. Стартуя с простых комбинаторных соображений, была построена кинетическая модель полимеризации в аэрозольных частицах. В основе модели лежит кинетическое уравнение, сходное с тем, которое используется в теории коагуляции аэрозолей. Это уравнение в рассмотренном случае описывает временную эволюцию функции распределения полимерных кластеров по массам и функциональностям. Предполагая, что скорость коагуляционного процесса определяется произведением функциональностей кластеров, нами построено аналитическое решение кинетического уравнения. Само это решение имеет чрезвычайно сложную структуру. Тем не менее, оказалось возможным найти целый ряд макрохарактеристик полимеризующихся частиц, таких как счетная концентрация полимерных кластеров, полная массовая концентрация полимера и другие моменты функции распределения. Впервые в явном виде удалось проследить процесс образования макроскопического кластера и найти его характеристики. Полностью решена задача о спектре масс полимеризующихся частиц. Показано, что в асимптотическом пределе (большие времена) этот спектр имеет степенной характер. Разработанный прототип аэрозольной станции [Khodzher *et al.*, 2021] признан годным для попытки построения аналогичной станции в Арктике.

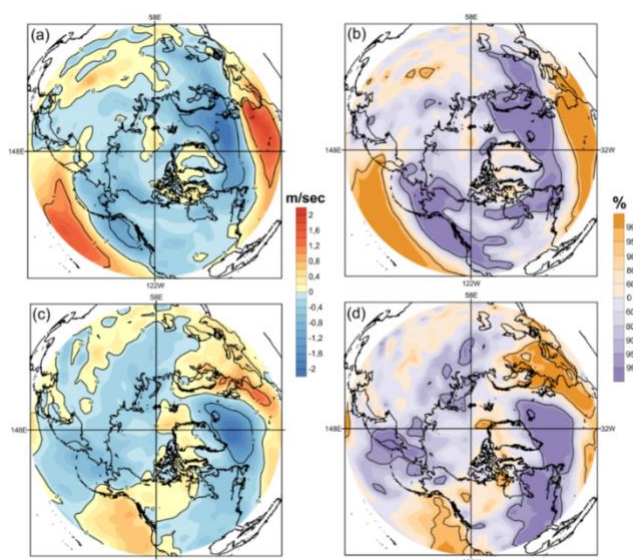


Рисунок 9.3 – (а) Разница аномалий средней зональной скорости ветра у поверхности между противоположными фазами Глобального атмосферного колебания и (б) значения вероятности согласно t-критерию Стьюдента; (в) разница аномалий средней меридиональной скорости ветра у поверхности между противоположными фазами Глобального атмосферного колебания и (г) значения вероятности согласно t-критерию Стьюдента. По данным NCEP/NCAR Reanalysis за 1950–2020 годы. Все карты построены на сетке $1 \times 1^\circ$



9.5 Комплексный анализ и визуализация новых данных, полученных по проекту, методами геоинформатики

На основе технологии ESRI Web AppBuilder и ArcGIS Portal в рамках создания единой ГИС проекта был разработан геопортал как главный инструмент визуализации и изучения данных арктического региона РФ. Был определен постоянный адрес геопортала: <https://arctic-gis.gcras.ru/> (рис. 9.4). В 2021 году наполнение ГИС было заключалось в формировании веб-сервисов и добавлении следующие данные:

1. Топография и батиметрия региона, представленные моделью ETOPO-1 (км);
2. Аномалии силы тяжести в редукции Буге, полученные на основе модели гравитационного поля EIGEN-6с4 (мГал);
3. Изначальная мощность осадочного чехла, основанная на компиляции данных модели GlobSed для акваторий и моделей [Stolk et al., 2013] и [Kaban, 2001] для суши (км);
4. Остаточные аномалии Буге, полученные путем вычитания гравитационного эффекта от осадочного чехла из исходных данных гравитационного поля в редукции Буге (мГал);
5. Скорректированная топография, которая, представляет собой единую нагрузку на поверхность со стандартной плотностью топографии ($2,67 \text{ г/см}^3$), выражается в км. В частности, обширные континентальные области характеризуются отрицательной скорректированной топографией из-за наличия отложений низкой плотности;
6. Глубина до раздела Мохо (км). Используются данные [Stolk et al., 2013] и [Kaban, 2001] для суши и данные модели Crust 1.0 для акваторий;
7. Эффективная упругая мощность литосферы, полученная по данным [Tesauro et al., 2012];
8. Карта изостатической поправки к гравитационному полю (мГал);
9. Карта изостатических аномалий силы тяжести (мГал);
10. Карта декомпенсационной поправки к гравитационному полю (мГал);
11. Карта декомпенсационных аномалий силы тяжести (мГал);
12. Модель мощности осадочного чехла, полученная по данным декомпенсационных аномалий силы тяжести (км);
13. Модель мощности осадочного чехла, полученная по данным декомпенсационных аномалий силы тяжести (версия 2) (км);
14. Карта поправки к плотности (г/см^3);
15. Скорректированная плотность, усредненная вертикально (г/см^3);
16. Объединённый каталог землетрясений востока российской Арктики;
17. Сейсмические станции в Арктике в 21-м веке.

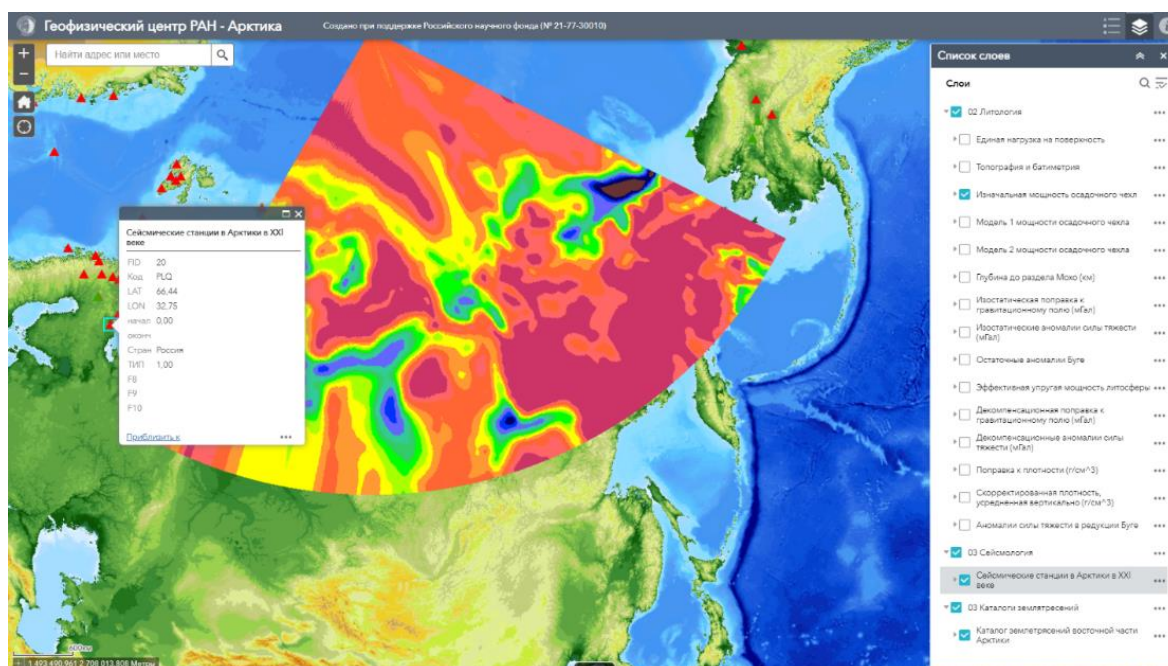


Рисунок 9.4 – Интерфейс геопортала: интерактивная карта, открыто контекстное меню с атрибутивной информацией об объекте, список доступных слоев

Разработан прототип архитектуры единой геоинформационной системы (системы интерактивных сферических визуализаций, ИСВ). Детально проработана структура базы данных слайдов для ИСВ, предложен механизм реализации сценариев. Предложен вариант клиент-серверной архитектуры для системы ИСВ, центральным звеном которой является система управления данными. Веб-сервер, опираясь на её функционал, обрабатывает запросы сетевого клиента. База данных сферических визуализаций хранится на файл-сервере. В качестве сетевых клиентов были предложены аппаратно-программный комплекс со сферическим экраном, а также программное приложение типа виртуальный глобус.

9.6 Всероссийская школа молодых учёных

С 20 по 21 сентября 2021 года на базе Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова (САФУ) в городе Архангельске была проведена Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике». В школе приняли участие 37 слушателей – студентов, аспирантов и молодых ученых в возрасте до 35 лет включительно со всей страны и ближнего зарубежья (рис. 9.5).

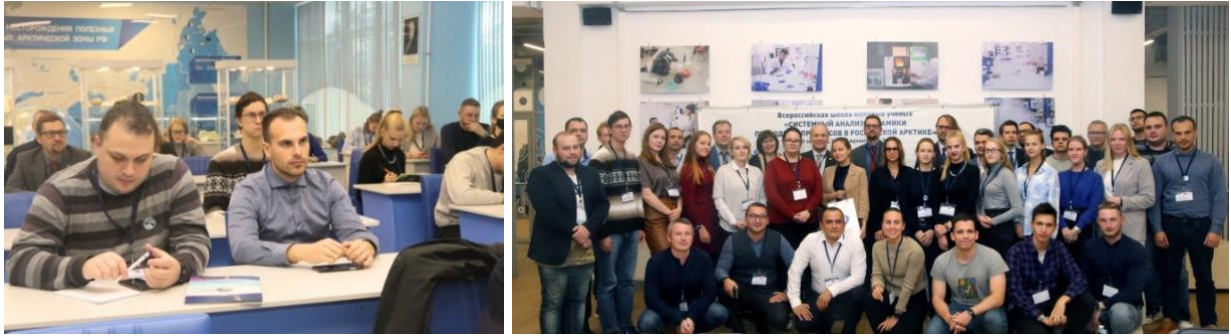


Рисунок 9.5 – Слушатели в аудитории Геологического музея им. Н. П. Лавёрова САФУ (слева) и групповое фото участников школы (справа)

Список использованных источников

- T. V. Khodzher; V. A. Zagaynov; A. A. Lushnikov; V. D. Chausov; G. S. Zhamsueva; A. S. Zayakhanov; V. V. Tsydyпов; V. L. Potemkin; I. I. Marinaite; V. V. Maksimenko; I. E. Agranovski. Study of Aerosol Nano- and Submicron Particle Compositions in the Atmosphere of Lake Baikal During Natural Fire Events and Their Interaction with Water Surface. *Water Air Soil Pollut* (2021) 232:266 <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05237-6>
- Stolk W., Kaban M. K., Beekman F., Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh S. High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas // *Tectonophysics*, 602, 55–68, doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.022, 2013
- Kaban M. A Gravity Model of the North Eurasia Crust and Upper Mantle: 1. Mantle and Isostatic Residual Gravity Anomalies, *Russian Journal of Earth Sciences*, 3, <https://doi.org/10.2205/2001ES000062>, 125–144, 2001
- Tesauro M., Audet P., Kaban M. K., Brgmann R., Cloetingh S. The effective elastic thickness of the continental lithosphere: Comparison between rheological and inverse approaches, *Geochem. Geophys. Geosy.*, 13, 1–18, [doi:10.1029/2012GC004162](https://doi.org/10.1029/2012GC004162), 2012



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

Номер темы в ИСГЗ: 19-55-80021 БРИКС_т

Номер: АААА-А20-120061690061-2

Руководитель: академик Бондур В. Г.

Ответственные исполнители: директор, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев,
в.н.с., д.ф.-м.н. С. А. Лебедев

10.1 Валидация альтиметрических измерений

Были выполнены разработка и программная реализация алгоритмов интерполяции данных на регулярной сетке в точку проведения альтиметрических измерений методами бикубической интерполяции и сплайн-интерполяции. Данные программы предназначены для расчета «сухой» тропосферной поправки и поправки на влажность по данным реанализа MERRA-2 и данным СВЧ-радиометрии спутников DMSP F08–F13. Для данных СВЧ-радиометрии реализована линейная интерполяция данных по времени.

Результаты анализа показали, что оптимальными для обработки данных альтиметрических измерений спутников Гео-ИК-1 № 1–9 являются:

- модель атмосферы Национального центра прогноза окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) MERRA-2 для расчетов «сухой» тропосферной поправки и поправки на влажность;
- модель FES14 для расчетов приливной поправки;
- модель ионосферы IRI2007 для расчетов ионосферной поправки.

Именно эти модели и будут использоваться для создания базы данных альтиметрических измерений спутников Гео-ИК-1 № 1–9 версии В.

Для расчета «сухой» поправки и поправки на влажность при обработке данных используют результаты расчетов по моделям атмосферы Национального центра прогноза окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) MERRA-2 на сетке $0,5^\circ\text{ш.} * 0,625^\circ\text{д.}$ за период 1985–1995 годов. Результаты сравнения «сухой» тропосферной поправки, рассчитанной по данным об атмосферном давлении на уровне моря из реанализа MERRA-2 с результатами расчетов по модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF), показал, что разница между этими расчетами составляет менее 1,2 м (рис. 10.1).

Максимальная разница между расчетами по этим моделям наблюдается в умеренных и полярных районах.

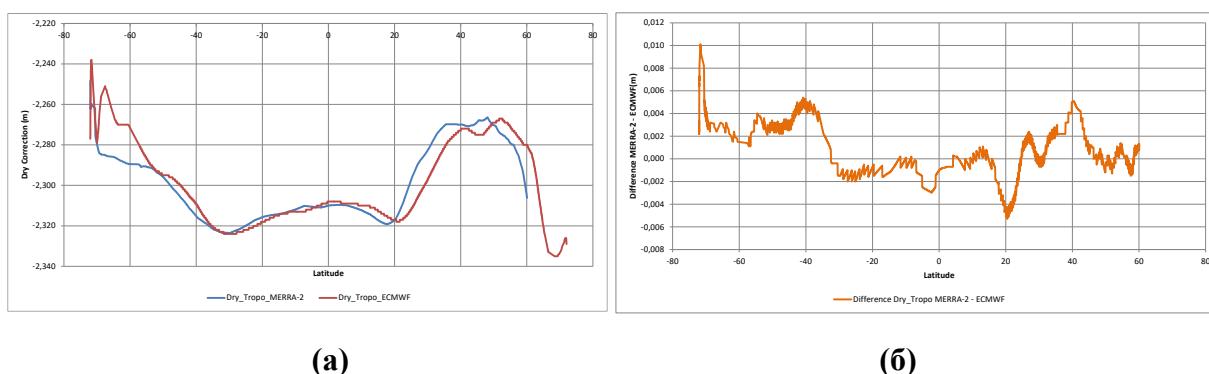


Рисунок 10.1 – Изменчивость «сухой» тропосферной поправки (м), (а) рассчитанной по моделям ECMWF и MERRA-2, и (б) их разница вдоль трека спутника Гео–ИК–1 № 1

Результаты сравнения поправки на влажность, рассчитанной по данным реанализа MERRA-2 с результатами расчетов по данным СВЧ-радиометрии, показал, что разница между этими расчетами составляет менее 0,15 м (рис. 10.2). Максимальная разница между расчетами по этим моделям наблюдается в тропических широтах.

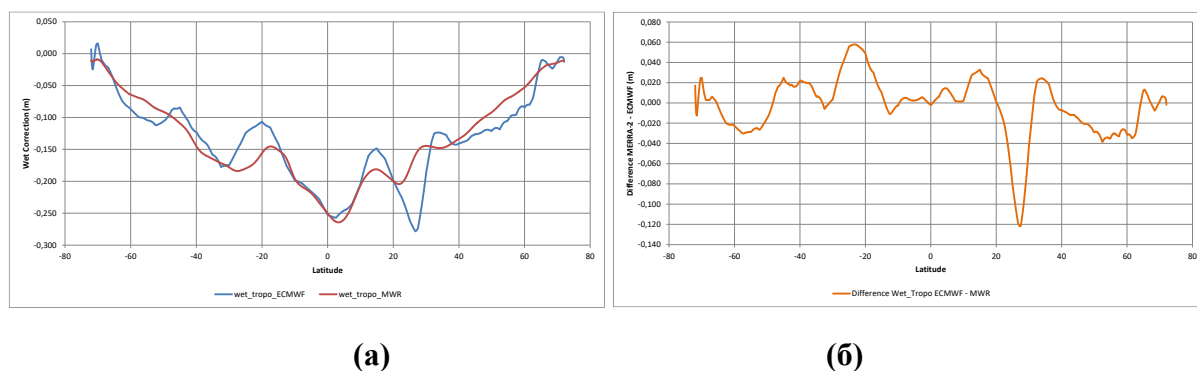


Рисунок 10.2 – Изменчивость поправки на влажность (м), (а) рассчитанной по модели MERRA-2 и данным СВЧ-радиометрии, и (б) их разница вдоль трека спутника Гео–ИК–1 № 1

Результаты сравнения приливной поправки, рассчитанной по моделям Шведерского и FES14, показал, что разница между этими расчетами составляет менее 0,2 м (рис. 10.3). Максимальная разница между расчетами по этим моделям достигается в арктических широтах.

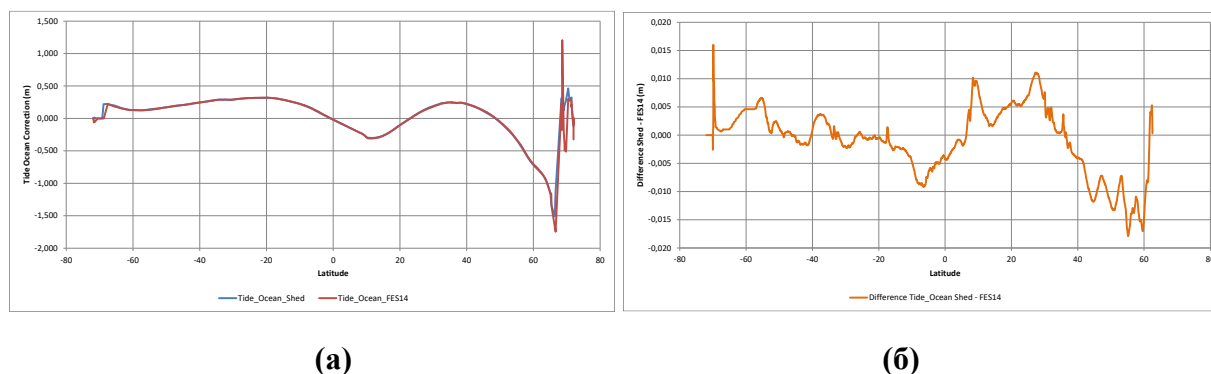


Рисунок 10.3 – Изменчивость приливной поправки на влажность (м), (а) рассчитанной по моделям Шведерского и FES14 (а), и (б) их разница вдоль трека спутника Гео-ИК-1 № 1

Сравнение моделей ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) 2007 года (IRI2007) и NIC (New Ionosphere Climatology) 2009 года (NIC09) показало, что эти данные хорошо коррелируют друг с другом. Однако, наблюдаются небольшие расхождения, как в экваториальной области, так и в высоких широтах (рис. 10.4). Разница в расчетах по различным моделям не превышает 1 см.

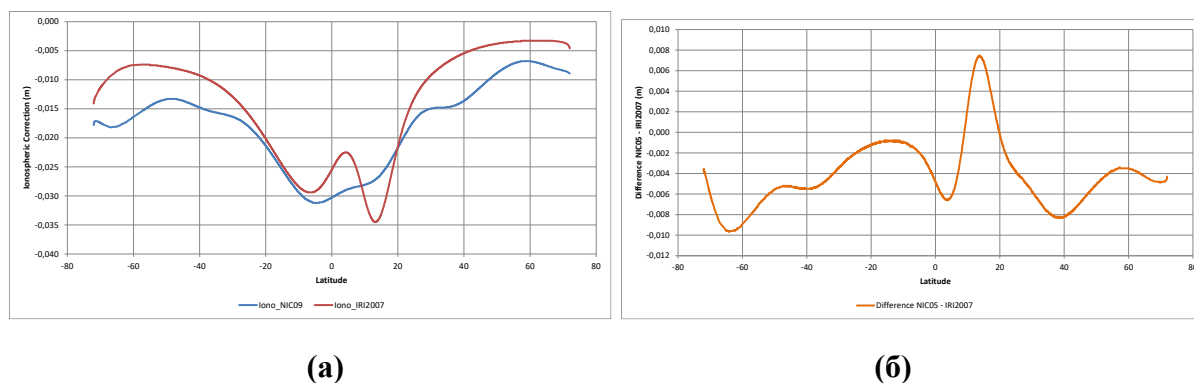


Рисунок 10.4 – Изменчивость ионосферной поправки (м), (а) рассчитанной по моделям IRI2007 и NIC09, и (б) их разница вдоль трека спутника Гео-ИК-1 № 1

Был создан массив данных альтиметрических измерений и поправок в точках пересечения треков спутника GEOSAT и спутника Гео-ИК-1 № 1. Рассчитаны поправки на тропосферу («сухая» поправка и поправку на влажность), атмосферу и ионосферу. Была проведена верификация поправок на тропосферу («сухая» поправка и поправка на влажность), атмосферу и ионосферу в точках пересечения треков спутника GEOSAT и спутника Гео-ИК-1 № 1.



1.2 Валидация данных измерений геомагнитного поля

10.2.1 Интеграция цифрового архива магнитометрических измерений спутников СССР в Мировую систему данных

Интеграция Цифрового архива в систему Мирового центра данных (МЦД) по солнечно-земной физике (СЗФ) позволила впервые пополнить ее уникальными спутниковыми данными по магнитному полю Земли (МПЗ) и межпланетному магнитному полю, полученными путем оцифровки силами ГЦ РАН архивных материалов со спутников Космос-49 и Космос-321 [Krasnoperov et al., 2020]. Была проведена работа по приведению архива в соответствие требованиям Мировой системы данных для обеспечения более широкого доступа к уникальным спутниковым магнитным данным.

10.2.2 Анализ возможности использования архива геомагнитных K-индексов для валидации исходных спутниковых данных при построении моделей внутреннего МПЗ

В периоды повышенной магнитной активности, которые выявляются с помощью больших значений K- и K_p-индексов, сигнал главного МПЗ (ГМПЗ) в спутниковых данных в большей степени искажен и зашумлен. Поэтому для более точного выделения из них сигнала именно ГМПЗ рассматриваются спокойные периоды данных. Для расчета K_p (планетарного K-индекса) используются K-индексы 13 обсерваторий по всему миру, однако их распределение по земному шару не оптимально. Поэтому оценивать уровень магнитной возмущенности только по K_p и, соответственно, вычисленным из него спокойным (q) и возмущенным (d) дням не всегда корректно. Наличие же рассчитанных K-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 был вычислен расширенный планетарный K-индекс (K_{pe}) с использованием дополнительных данных по K-индексам 17 обсерваторий СССР (табл. 10.1) из архива МЦД СЗФ, выполнявших непрерывные наблюдения во время полета Космос-49 и Космос-321 в 1964 и 1970 году соответственно.



Таблица 10.1 – Список использованных станций из архива МЦД СЗФ.

Станция	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
MMK (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

По полученным расширенным планетарным индексам (K_{pe}) 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 K_r -индексу. В целом, вычисленные по K_{pe} -индексам q - и d -дни совпали на 80–100% с вычисленными по K_r -индексам. На период работы спутника Космос-49 (с 24 октября по 3 ноября 1964 года) выпало 4 спокойных (25, 28, 30, 31 октября) и 2 возмущенных (26 октября, 1 ноября) дня (рис. 10.5). Кроме того, день 3 ноября попал в список q -дней по K_{pe} -индексу, но не попал в 10 самых спокойных дней для ноября по K_r -индексу.

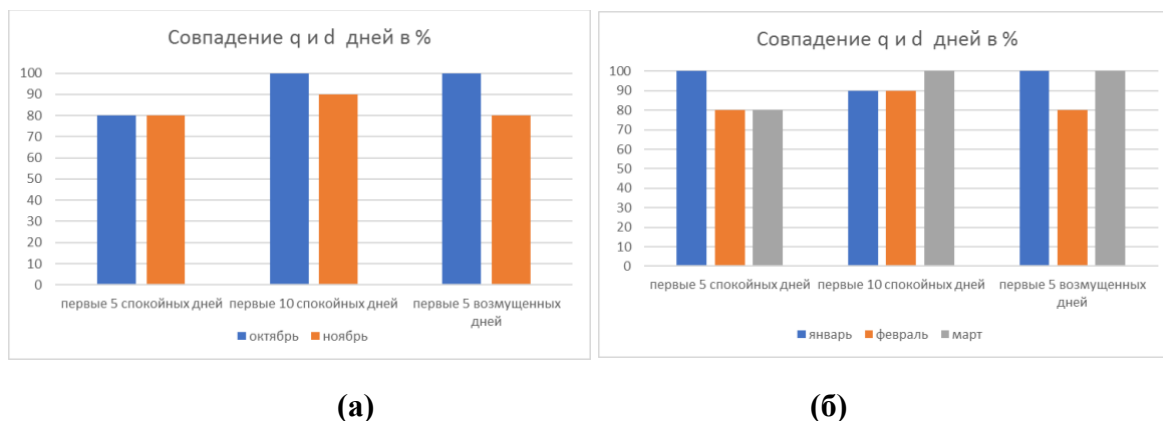


Рисунок 10.5 – Совпадение q- и d-дней, полученных по Кр- и Кре-индексам, а) за октябрь/ноябрь 1964 года, б) за январь-март 1970 года

Вычисленные q- и d-дни по разным вариантам Кр за три месяца 1970 года также совпали на 80–100%. На период работы спутника Космос-321 (с 20 января по 13 марта 1970) 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. 10.9). 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. 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 ГМПЗ. При использовании более равномерного пространственного распределения данных обсерваторий по поверхности Земли точность определения q- и d-дней может повышаться.

10.2.3 Сопоставление оцифрованных спутниковых данных с прогнозом модели главного МПЗ для эпохи 1965–1970 годов

Первые спутниковые измерения МПЗ, начатые в 60-е годы XX века, были скалярными, то есть измерялся только его модуль. К ним относятся и данные магнитометрических спутников Космос-49 (1964 год) и Космос-321 (1970 год). Математические модели магнитного поля являются аналитическими и допускают расчет

его компонент и модуля в любой точке пространства вне источника, что дает возможность сравнивать модуль МПЗ, вычисленного по модели, с непосредственно измеренным значением. Эталонной моделью ГМПЗ является модель IGRF [Alken et al., 2021a], которая обновляется каждые пять лет, начиная с эпохи 1900.0. Для оценки качества спутниковых измерений, проводимых более полувека назад, выполнялось их сравнение с прогнозными величинами согласно модели IGRF, вычисленными на соответствующие эпохи. Т.к. модель IGRF описывает только внутренние источники ГМПЗ, из измеренных значений отфильтровывались исходные данные, содержащие в себе сигнал внешних источников МПЗ. Для этого отбирались только измерения на ночной стороне Земли с 22:00 до 05:00 по локальному времени за геомагнитно-спокойные временные интервалы, которым соответствовали значения $Kp \leq 20$ и $|Dst| < 20$ (рис. 10.6a).

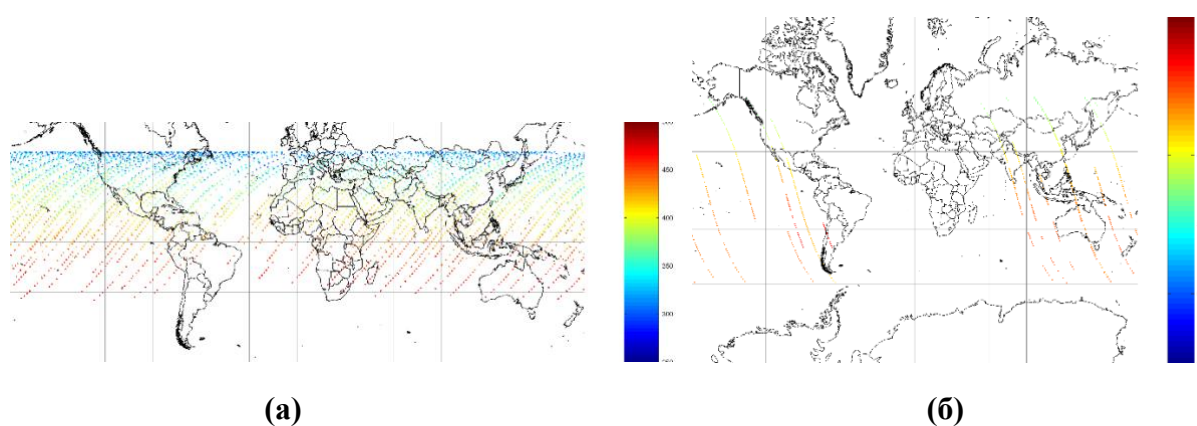


Рисунок 10.6 – Пространственное распределение отобранных данных спутников (а) Космос-49 и (б) Космос-321. Цветом обозначена высота полета в километрах

На рис. 10.7а приведена гистограмма распределения разностей модулей МПЗ, рассчитанных по модели IGRF и непосредственно измеренных спутником Космос-49. По горизонтали отложены бины разностей размером 10 нТл, а по вертикали – плотность вероятности, пересчитанная по количеству измерений с такими разностями. Эту гистограмму можно описать гауссовым распределением со средним 2,78 и среднеквадратичным отклонением (СКО) 32,83 (табл. 10.2).

Таблица 10.2 – Средние и среднеквадратичные отклонения различных моделей от измерений спутников Космос-49 и Космос-321

	IGRF, 24.10.1964	IGRF, 22.02.1970	M-1	M-2
Среднее	2,78	15,07	0,47	12,41
СКО	32,83	25,12	25,56	75,82

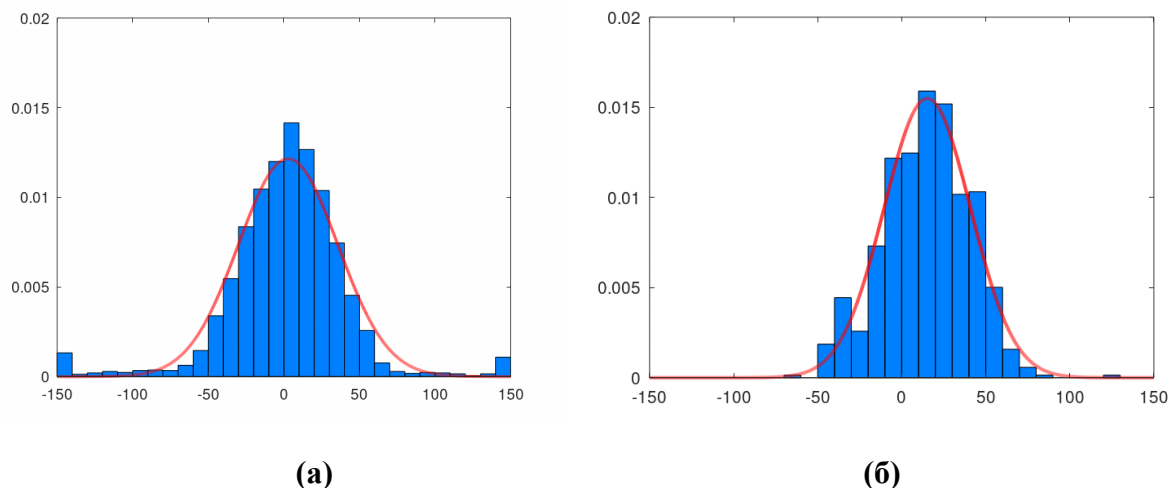


Рисунок 10.7 – Гистограммы распределения разности модулей вектора магнитного поля (полной напряженности), вычисленных по модели IGRF и непосредственно измеренных спутниками (а) Космос-49 и (б) Космос-321

Для анализа данных Космос-321 было отобрано 698 измерений из 4910, критерии отбора данных были те же, что в случае Космос-49 (рис. 10.6б). Дополнительно отбрасывались данные, полученные на высоких широтах более 60° в северном и южном полушариях, во избежание систематического искажения сигнала ГМПЗ внешними источниками МПЗ магнитосферного и ионосферного происхождения. На рис. 10.7б приведена гистограмма распределения разности измеренных и смоделированных значений модуля вектора МПЗ; статистические характеристики приведены в табл. 10.2.

Для выявления пространственного распределения отклонений были построены карты разностей в зависимости от широты (рис. 10.8). Из-за небольшого наклона орбиты спутника Космос-49 (49°) большую часть времени он находился на ночной стороне Земли в северном полушарии (см. рис. 10.8а). Отобранные значения измерений, полученных спутником Космос-321 с наклоном орбиты 71° , более равномерно распределены между 50° ЮШ и 50° СШ (рис. 10.8б). При этом, можно наблюдать закономерный рост отклонений при приближении спутника к полюсам, что обусловлено интенсивными электромагнитными процессами, характерными для полярной ионосферы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в целом модель IGRF вполне удовлетворительно аппроксимирует фактические наблюдения магнитного поля.

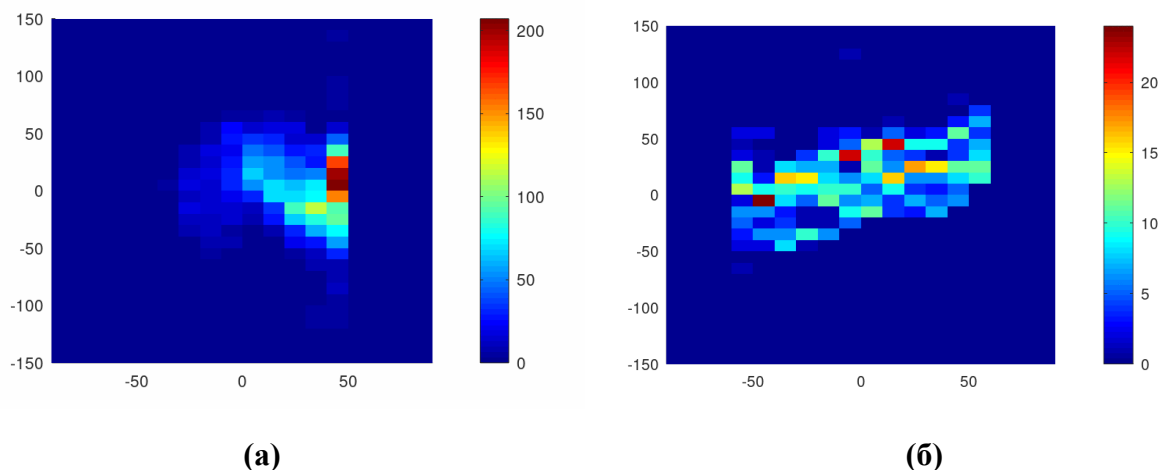


Рисунок 10.8 – Распределение разностей по широте по отфильтрованным данным спутников (а) Космос-49, (б) Космос-321. По горизонтали – широта, по вертикали – разность модулей вектора МПЗ, вычисленных по модели IGRF и непосредственно измеренных спутником. Цветом показано количество измерений

При первоначальном анализе данных измерений Космос-49 и Космос-321 были построены аналитические модели магнитного поля на эпохи 1964 (далее модель «М-1») и 1970 (далее модель «М-2») года. Они приведены в соответствующих каталогах [Долгинов и др., 1967, 1976]. Заявленная точность аппроксимации измерений аналитическими моделями составляет 15 нТл. Ниже мы приводим сравнение этих исторических аналитических моделей с эталонной моделью IGRF, которая, как было показано выше, неплохо аппроксимирует прямые наблюдения МПЗ. Очевидно, в данном случае единственно возможный подход к сравнению заключается в оценке разности отдельных компонент векторов магнитного поля, вычисленных по двум моделям. Аналогичный способ сравнения используется при оценке моделей-кандидатов для формирования IGRF [Alken et al., 2021b]. Полученные отклонения по вертикальной Z-компоненте достигают более 1000 нТл по модулю, что является недопустимой погрешностью при исследовании вековой вариации ГМПЗ, которая составляет несколько десятков нТл в год.

Наличие моделей ГМПЗ за несколько соседних эпох позволяет оценивать его вековую вариацию. По аналогии с вышеизложенным, проводилось сравнение вековой вариации Z-компоненты, полученной как разность моделей «М-2» и «М-1», деленная на соответствующий интервал времени (около пяти лет), с вековой вариацией, вычисленной по модели IGRF на тот же период 1965–1970 годов. (рис. 10.9). Огромные пространственные расхождения между двумя моделями, обусловленные разницей в секторальных членах разложений по сферическим гармоникам, являются хорошо известным проявлением т.н. «эффекта Бакуса» [Backus, 1970], очевидно, неучтенного при построении моделей «М-1» и «М-2». Этот эффект является существенным источником

ошибок в моделях МПЗ, построенных только по скалярным данным наблюдений [Stern and Bredekamp, 1975]. Из-за этого, полученная вековая вариация по этим моделям ожидаемо содержит большие ошибки на низких широтах, в то время как в модели IGRF эффект Бакуса минимизирован.

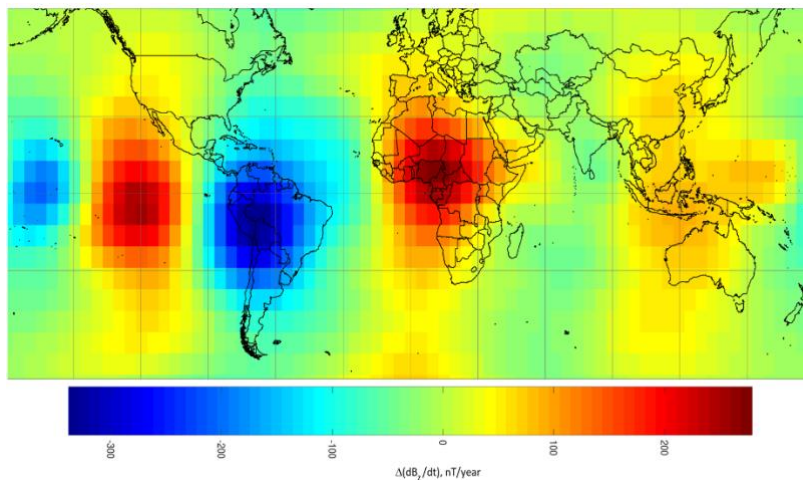


Рисунок 10.9 – Сравнение вековой вариации Z-компоненты, построенной по моделям «М-1» и «М-2» по соседним эпохам 1964 и 1970 года, с вычисленной по модели IGRF

10.2.4 Сравнение данных спутника Космос-321 с данными других ИСЗ

Сравнение данных разных спутников за один период времени позволяет лучше оценить точность измерений, выявить возможные недостатки в методике измерений и дает возможность в будущем внести коррективы в научную программу. Для сравнительного анализа были выбраны данные советского спутника Космос-321, а также спутника OGO-6 американского проекта OGO (Орбитальная геофизическая обсерватория). OGO-6 был запущен 5 июня 1969 года и работал до марта 1972 года [Архив, 2021]. Поскольку измерения спутников не проводились одновременно в одной и той же точке пространства, было принято решение сравнить полученные измерения с данными модели IGRF. Для анализа отбирались только те измерения спутников Космос-321 и OGO-6, которые попадали в окрестность 1° по широте и $1,5^\circ$ по долготе относительно месторасположения наземных обсерваторий бывшего СССР. Таким образом, региональные характеристики магнитного поля были близки как для обоих спутников, так и для соответствующей наземной обсерватории. Кроме того, такой отбор позволил оценить расхождения модельных и обсерваторских данных. В результате анализа и сортировки спутниковые траектории попали в окрестности 6 обсерваторий (рис. 10.10). Что касается геомагнитной обстановки в дни пролета спутников над районами обсерваторий, то 21 февраля 1970 года являлся



спокойным днем, а 28 февраля – слабовозмущенным. Остальные дни не являлись ни спокойными, ни возмущенными [Данные по q - и d - дням, 2021].

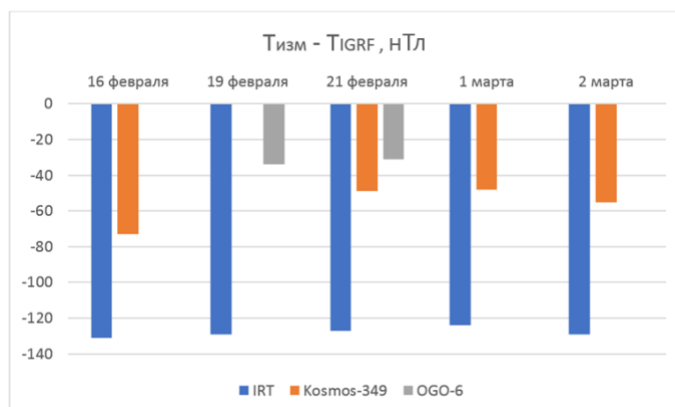


Рисунок 10.10 – Отклонения измеренных значений полной напряженности МПЗ от модельных на примере окрестности магнитной обсерватории IRT («Иркутск»). Синим обозначено среднесуточное отклонение обсерваторских данных, оранжевым – данных Космос-321, серым – данных OGO-6

Как видно из рис. 10.10, отклонения обсерваторских данных по модулю от модели составляют большую величину, чем отклонения спутниковых данных, причем такая картина сохраняется для всех рассматриваемых обсерваторий. Очевидно, это вызвано локальным влиянием неоднородной намагниченности пород (аномальное магнитное поле), которое стремительно убывает с высотой обратно пропорционально кубу расстояния. Таким образом, на высотах рассматриваемых спутников вклад аномального поля практически незаметен. Среднее значение отклонений по всем рассматриваемым обсерваториям за все дни составляет 178 нТ. Более важным является то обстоятельство, что изменчивость магнитного поля во времени в рассматриваемых окрестностях одинаково хорошо прослеживается как в обсерваторских данных, так и в наблюдениях обоих спутников (см. рис. 10.10).

Спутниковые данные в большей степени приближены к модельным прогнозам, чем обсерваторские измерения, поскольку спутниковые и модельные данные в основном содержат сигнал ГМПЗ и не учитывают региональное коровое поле. Для разных окрестностей обсерваторий вариационная составляющая измерений, полученных на двух спутниках, различается ввиду (1) достаточно грубой пространственной аппроксимации, обеспечиваемой моделью IGRF, и (2) разной степени локального влияния быстро меняющихся внешних полей на разных высотах орбит. Действительно, высота орбиты Космоса-321 в рассматриваемый период времени изменялась в пределах от 6642 до 6752 км (в геоцентрической системе координат), а спутника OGO-6 – от 6766 до 7440 км. Разброс высот за вычетом среднего радиуса Земли 6371 км при пролете спутников над



обсерваториями приведен в табл. 10.3. Разность высот двух спутников достигала нескольких сотен километров, что является существенным пространственным масштабом с точки зрения изменчивости магнитных полей ионосферного происхождения.

Таблица 10.3 – Колебания высоты орбиты спутников Космос-321 и OGO-6 (в км) при пролете над обсерваториями

Обсерватория	Космос-321			OGO-6			Среднее (OGO-6 – Космос-321)
	max	min	max-min	max	min	max-min	
IRT	354,2	271,9	82,3	520,3	431,7	88,6	163,0
LNN	285,1	276,9	8,1	415,0	400,6	14,4	126,8
MMK	322,2	292,3	29,9	412,1	395,1	17,0	96,3
NVL	381,6	271,0	110,6	1069,3	1069,3	0,0	743,1
PET	349,9	347,0	2,9	491,0	396,6	94,3	95,3
YAK	334,4	275,6	58,8	456,5	399,6	57,0	123,0

В среднем получилось, что данные Космоса-321 слегка ближе к модельным (среднее отклонение по всем дням и по окрестностям всех обсерваторий составило 16 нТл по модулю), чем данные OGO-6 (среднее отклонение составило 21 нТл по модулю). Вместе с тем, данный результат в большей степени носит качественный характер ввиду крайне непродолжительных и немногочисленных скалярных измерений магнитного поля в 60–70е годы XX века, когда только зарождались космические программы по изучению геофизических полей.

10.2.5 Взаимодействие с китайской стороной

16–17 ноября 2021 года организацией LASAC (Китай) проводился Международный форум по сотрудничеству в области спутниковой гравиметрии, куда были приглашены сотрудники ГЦ РАН. Китайская сторона поделилась планами, ожидаемыми характеристиками, методами повышения точности в отношении готовящихся миссий. Основной план китайских коллег – воспроизвести разрешающую способность успешной миссии GOCE. В форуме приняли участие европейские (Германия, Нидерланды) и американские специалисты, которые имеют богатый опыт предшествующих спутниковых гравиметрических миссий. Были намечены планы сотрудничества с ГЦ РАН. В случае



реализации намеченных планов можно будет рассчитывать на более интенсивный взаимный обмен данными.

Список использованных источников

- Alken P., Thébault E., Beggan C. D. et al. (2021a). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space* 73, 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Alken P., Thébault E., Beggan C. D. et al. (2021b). Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field. *Earth Planets Space* 73, 48. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01281-4>
- G. E. Backus, Non-uniqueness of the external geomagnetic field determined by surface intensity measurements. *J. Geophys. Res.* 75, 6337–6341 (1970)
- 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, 555–561. <https://doi.org/10.5194/essd-12-555-2020>
- Stern, D. P. & Bredekamp, J. H., 1975. Error enhancement in geomagnetic models derived from scalar data, *J. geophys. Res.*, 80, 1776–1782
- Архив Датского технического университета, https://www.space.dtu.dk/english/Research/Scientific_data_and_models/Magnetic_Satellites
- Данные по q- и d- дням, утвержденным IAGA, на сайте Немецкого научного центра по геонаукам в Потсдаме, <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>
- Ш. Ш. Долгинов, В. И. Наливайко, А. И. Тюрмин, М. М. Чинчевой, Р. Е. Бродская, Г. Н. Злотин, И. Н. Кикнадзе, Л. О. Тюрмина. Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника Космос-49. М.: Академия наук СССР, ИЗМИРАН, 1967.



11 Системный подход к комплексированию алгоритмов распознавания для оценки сейсмической опасности

Грант РФФИ: 20-35-70054

Номер: АААА-А20-120012090122-8

Руководитель: зав. лаб., г.н.с., д.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев

Задача оценки сейсмической опасности состоит в анализе и прогнозе параметров сейсмического воздействия от будущих сильных землетрясений. Первые методы поиска решений этой задачи были детерминистскими (Deterministic Seismic Hazard Analysis – DSHA) [Mualchin, 2011; Wang, 2011]. В 70-х годах XX века началась разработка вероятностных карт сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA) в национальном [например, Bommer and Abrahamson, 2006; Ulomov, 1999], региональном [например, Заалишвили и Дзеранов, 2014; Заалишвили и др., 2011; Эртельева и Аптикаев, 2013] и городском (микрорайонирование) [например, Алешин, 2017; Джурик и др., 1988; Заалишвили и Рогожин, 2011] масштабах. В классическом подходе PSHA [Cornell, 1968] определяется вероятность того, что в течение определенного периода времени будут превышены различные уровни сотрясаемости, вызванные землетрясениями.

Сегодня альтернативой PSHA являются методы NDSHA (Neodeterministic Seismic Hazard Assessment – NDSHA) [Panza and Bela, 2020; Panza et al., 2012]. Они позволяют дать детерминистское описание сейсмического движения грунта, вызванного землетрясением с заданными эпицентральной / гипоцентральной расстоянием и магнитудой. Такие методы базируются на моделировании на основе детального знания очага землетрясения [Аптекман и Татевосян, 2007; Dzierwonski et al., 1981; Mäntyniemi et al., 2014; Rebetsky and Tatevossian, 2013] и сценария распространения от него сейсмических волн [Parvez and Rosset, 2014]. Тем самым становится возможным определение набора сценариев землетрясений и моделирование на их основе синтетических сейсмических сигналов, не дожидаясь появления реального сильного землетрясения.

Одним из ключевых условий успешного применения методов NDSHA является наличие адекватной информации о возможных местах сильных землетрясений в исследуемом регионе. Гибкость NDSHA позволяет успешно инкорпорировать дополнительную информацию о возможных местах сильных землетрясений, полученную с помощью независимых методов и расчетов. Это сокращает существующие пробелы в знаниях о сейсмичности, получаемых из каталогов землетрясений. В работах [Peresan et al., 2015; Rugarli et al., 2019] продемонстрировано, что использование в NDSHA дополнительных знаний о местах возможного возникновения сильных землетрясений,



полученных путем применения методов распознавания образов к данным о морфоструктурном строении региона [Гвишиани и др., 1988; 2020], позволяет создавать эффективные превентивные карты сейсмической опасности. Анализ морфоструктурных данных на базе распознавания образов позволяет получить количественные и качественные критерии для определения областей, подверженных сильным землетрясениям [Rugarli et al., 2019].

В рамках проекта в 2021 году были существенно развиты идейная, системно-математическая и вычислительная базы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

Процесс определения зон повышенной сейсмической опасности в тектонически активных регионах представляет собой сложную систему. Состояние системы зависит как от пространственных координат объектов распознавания, так и от времени. В этой связи задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений методом FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2016], разработанным ранее исполнителями проекта, рассмотрена с точки зрения системного анализа. Так, создана системно-аналитическая версия метода FCAZ. Пространственно-временная модель $T(n) \times \text{FCAZ}$ ($T = \{t_n; n = 1, 2, \dots\}$ – значения времени) позволяет создать временной план будущих итераций по распознаванию мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений. Т.е. сформулирован критерий выбора неравномерных отрезков времени для проведения повторных FCAZ-распознаваний. Это дает возможность распознавать места возможного возникновения землетрясений как функцию времени. При этом для классификации на высоко- и низкосейсмичные зоны используются динамически возникающие объекты – эпицентры землетрясений. Это позволяет воспроизводить распознавание искомых высокосейсмичных зон по мере появления новых объектов. Последнее повышает не только практическую значимость, но и достоверность результатов FCAZ-распознавания [Дзобоев, 2021].

Проведено FCAZ-распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в новом регионе – Альпы-Динариды. Проведена верификация ранее полученных результатов FCAZ-распознавания. Разработана новая математическая конструкция некоторых вычислительных блоков метода FCAZ.

Совокупность вычислительных контрольных экспериментов, проведенных в многочисленных изученных методом FCAZ регионах, подтвердила достоверность и воспроизводимость интерпретации FCAZ-зон как мест возможного возникновения



землетрясений. Показано, что FCAZ-зоны занимают сравнительно небольшую площадь по сравнению с полем общей сейсмичности – 30% – 40% от площади всей сейсмичности и 50% – 65% от площади, где происходят слабые землетрясения, используемые в качестве объектов FCAZ-распознавания. Это иллюстрирует пространственную нетривиальность полученных результатов [Дзобоев, 2021].

Результаты проекта в части FCAZ-распознавания показали и то, что слабая сейсмичность на самом деле может «проявлять» свойства геофизических полей, которые в классическом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений EPA (Earthquake-Prone Areas) используются непосредственно в виде характеристик объектов распознавания [Дзобоев, 2021].

Впервые оценен вклад форшоковых и афтершоковых последовательностей в каталогах землетрясений в формирование результата распознавания мест возможного возникновения землетрясений методом FCAZ. На примере Калифорнии и Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка показано, что наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на результаты FCAZ-распознавания.

Развит оригинальный алгоритм распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений «Барьер-3», разработанный исполнителями проекта, базирующийся на классификации объектов с обучением по одному классу, основанный на принципах дискретного математического анализа и элементах искусственного интеллекта. В частности, построена математическая схема вычисления оптимальных значений свободных параметров алгоритма «Барьер-3». Такая схема базируется на идее, что при отбрасывании из рассмотрения одного или нескольких объектов единственной обучающей выборки, алгоритм «Барьер-3» должен распознавать их как высокосейсмичные основываясь на обучении по оставшимся в выборке объектам. Показано, что «Барьер-3» может эффективно использоваться в классическом подходе EPA в качестве блока распознавания [Дзобоев, 2021].

С использованием алгоритма «Барьер-3» в качестве блока распознавания EPA выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Крыму и в регионе Альпы-Динариды, сильнейших землетрясений на Тихоокеанском побережье полуострова Камчатка. Алгоритмом «Барьер-3» выявлены численные интервалы значений геолого-геофизических и геоморфологических характеристик, свойственные объектам, классифицированным как высокосейсмичные: высокая степень тектонической



раздробленности, наличие плотностных глубинных неоднородностей, а также специфическое строение и состав земной коры. Выполнена верификация ранее полученных результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с обучением по одному (алгоритм «Барьер-3») и по двум (алгоритм «Кора-3») классам. Обоснована возможность варьирования блока распознавания образов в классической процедуре ЕРА: «Алгоритм дихотомии» ↔ «Барьер-3».

Предложена интерпретация в виде нечеткого множества для интегрального результата ЕРА-определения высокосейсмичных зон блоками распознавания «Барьер-3» (один класс обучения) и «Кора-3» (два класса обучения). Показано, что авторский алгоритм «Барьер-3» с обучением по единственному классу в композиции с алгоритмами дихотомии и конструкцией нечеткого множества улучшает качество распознавания. 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. Для преобразования распознанной информации о положениях эпицентров возможных сильных землетрясений в оценки максимальной балльности использовалось уравнение макросейсмического поля с коэффициентами по Н. В. Шебалину.

В рамках выполнения проекта получила свое развитие ранее созданная Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности. Разработанные и развитые в рамках проекта методы и алгоритмы включены в интерактивную ГИС в качестве инструментов геообработки данных. Созданная ГИС-база карт зон возможного возникновения землетрясений для изученных в проекте регионов также включена в интерактивную ГИС.

На базе результатов, полученных, в том числе, в рамках выполнения проекта, руководителем проекта Борисом Аркадьевичем Дзедобоевым подготовлена диссертационная работа «Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных



ископаемых. Работа успешно защищена на заседании Диссертационного совета, функционирующего на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

За два года реализации проекта получены следующие основные результаты:

- Впервые места возможного возникновения сильных землетрясений представлены в виде нечеткого множества.
- Приведены аргументы в пользу того, что данные по литосферным магнитным аномалиям обладают высокой информативностью для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений.
- Впервые классическая задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений заменена системно более сложной задачей.
- Впервые показано, что наличие в каталогах землетрясений форшоковых и афтершоковых последовательностей не оказывает существенного влияния на конечный результат распознавания мест возможного возникновения землетрясений, выполненного на базе кластеризации (топологической фильтрации) множества эпицентров слабых землетрясений.
- Впервые показано, что места возможного возникновения сильных землетрясений занимают сравнительно небольшую площадь по сравнению с площадью, где происходят землетрясения с магнитудой на 3–4 меньше, чем порог распознаваемых сильных землетрясений.
- Впервые высказана гипотеза, что слабая сейсмичность может «проявлять» свойства геофизических полей, которые используются в виде характеристик объектов распознавания для определения высокосейсмичных районов.
- Впервые сформулирован критерий выбора неравномерных отрезков времени для проведения повторных распознаваний мест возможного возникновения землетрясений.

В рамках реализации проекта опубликовано три статьи в журналах, индексируемых в Web of Science Core Collection / Scopus.

**Список использованных источников**

- Алешин А. С. Фундаментальные аспекты сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 8–17.
- Аптекман Ж. Я., Татевосян Р. Э. О возможности выявления сложных очагов землетрясений по данным каталога СМТ (тензора центроида момента) // Физика Земли. – 2007. – № 5. – С. 17–23.
- Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Ранцман Е. Я., Систернас А., Соловьев А. А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. – 176 с.
- Гвишиани А. Д., Соловьев 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.
- 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.
- Джурик В. И., Севостьянов В. В., Потапов В. А. и др. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. – 223 с.
- Дзобоев Б. А. Системно-аналитический метод распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: ИФЗ РАН. – 2021. – 309 с.
- Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В. Детальное сейсмическое районирование и построение вероятностных карт сейсмической опасности (на примере территории Республики Северная Осетия-Алания). Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН. – 2014. – 139 с.
- Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В., Габараев А. Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – № 1. – С. 48–58.
- Заалишвили В. Б., Рогожин Е. А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального районирования и сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 3. – С. 31–43.
- Эртельева О. О., Аптикаев Ф. Ф. Что такое детальное сейсмическое районирование? // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 4. – С. 63–68.
- Bommer J. J., Abrahamson N. A. Why do modern probabilistic seismic hazard analyses often lead to increased hazard estimates? // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96. – Is. 6. – P. 1967–1977. – DOI: 10.1785/0120060043.
- Cornell C. A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1968. – Vol. 58. – Is. 5. – P. 1583–1606.
- Dziewonski A. M., Chou T.-A., Woodhouse J. H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical



- Research. – Vol. 86. – Is B4. – 1981. – P. 2825–2852. – DOI: 10.1029/JB086iB04p02825.
- Mäntyniemi P., Tatevossian R. E., Tatevossian T. N. Uncertain historical earthquakes and seismic hazard: theoretical and practical considerations // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. – 2014. – Vol. 5. – Is. 1. – P. 1–6. – DOI: 10.1080/19475705.2012.751633.
- Mualchin L. History of Modern Earthquake Hazard Mapping and Assessment in California Using a Deterministic or Scenario Approach // *Pure and Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 168. – Is. 3–4. – P. 383–407. – DOI: 10.1007/s00024-010-0121-1.
- Panza G. F., Bela J. NDSHA: A new paradigm for reliable seismic hazard assessment // *Engineering Geology*. – 2020. – Vol. 275. – 105403. – DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105403.
- Panza G. F., La Mura C., Peresan A., Romanelli F., Vaccari F. Seismic hazard scenarios as preventive tools for a disaster resilient society // *Advances in Geophysics*. – 2012. – Vol. 53. – P. 93–165. – DOI: 10.1016/B978-0-12-380938-4.00003-3.
- Parvez I. A., Rosset Ph. The Role of Microzonation in Estimating Earthquake Risk // In: Shroder J., Wyss M. (Eds.), *Earthquake Hazard, Risk, and Disasters*. – 2014. – Chapter 11. – ISBN: 978-0-12-394848-9. – DOI: 10.1016/B978-0-12-394848-9.00011-0.
- 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.
- Rebetsky Y. L., Tatevossian R. E. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // *Bulletin de la Société géologique de France*. – 2013. – Vol. 184. – Is. 4–5. – P. 335–346. – DOI: 10.2113/gssgfbull.184.4-5.335.
- Rugarli P., Vaccari F., Panza G. Seismogenic nodes as a viable alternative to seismogenic zones and observed seismicity for the definition of seismic hazard at regional scale // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 41. – Is. 4. – P. 289–304. – DOI: 10.15625/0866-7187/41/4/14233.
- Ulomov V. I. Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. – 1999. – Vol. 42. – Is. 6. – P. 1023–1038.
- Wang Z. Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives // *Pure and Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 168. – Is. 1–2. – P. 11–25. – DOI: 10.1007/s00024-010-0148-3.



12 Системный анализ особенностей характера распространения COVID-19 для стран Европы и регионов России опасности

Грант РФФИ: 20-57-82003 ИИАСА
Номер госрегистрации: 121032900088-0
Руководитель: зав. лаб., к.г.-м.н. А.И. Рыбкина

На первом этапе исследования проведен поиск источников данных, удовлетворяющих задачам проекта. Все открытые источники данных можно разделить на три группы в соответствии с типом агрегируемых данных:

1. фиксирующие хронологию мер, принимаемых странами (регионами) в связи с пандемией;
2. фиксирующие эпидемиологические и модельные маркеры: заражения, выздоровления, смерти, летальность, коэффициент распространения инфекции (R_t) и пр.
3. комбинирующие в себе оба направления.

Используемыми источниками первой группы являются массивы данных CoronaNet (не актуализируется с октября 2020 года) и World Health Organization (WHO). Во втором случае на сегодняшний день присутствует более 500 записей по регионам РФ, примерно треть из которых непосредственно относится к г. Москве. Ряд событий может быть верифицирован по периодически обновляемому обзорному документу «Перечень мер в связи с коронавирусом (COVID-19)» в системе «КонсультантПлюс», где представлены основные меры, принятые для снижения распространения коронавируса.

Используемым источником второй группы ежедневных эпидемиологических и модельных данных по регионам РФ и миру является база данных издательства Яндекс, агрегирующая данные Johns Hopkins University, с сайта стопкоронавирус.рф и собственных сервисов. Оригинальным показателем является индекс самоизоляции, ежедневно отражающий уровень городской активности по использованию различных приложений и сервисов Яндекса.

Дополнительно использованным источником, не входящим ни в одну категорию, являются ежедневные региональные температурные данные «Яндекс.Погода».

Для визуального анализа эпидемиологических маркеров на втором этапе создано веб-ориентированное приложение «ORBUS Web 1.0 COVID-19» (Свидетельство РИД № 2021665068 от 2021.09.17), предназначенное для платформонезависимой визуализации динамики распространения коронавирусной инфекции в ракурсе «страны / регионы РФ –

количество заражений / выздоровлений / смертей» в диапазоне дат с 22.01.2020 по сегодняшний день.

На третьем этапе на основании вышеописанных наборов данных г. Москвы были проанализированы перекрестная зависимость временных рядов заболеваний, выздоровлений, смертности, индекса самоизоляции и температуры, а также взаимосвязь распространения SARS-CoV-2 и принятых социально-экономических мер и решений по сдерживанию этого распространения.

При включении в модель индекса самоизоляции весь временной диапазон течения пандемии сокращается до периода, за который фиксировался искомый индекс, т.е. с 12.03.2020 по 22.09.2021 (560 дней) (рис. 12.1).

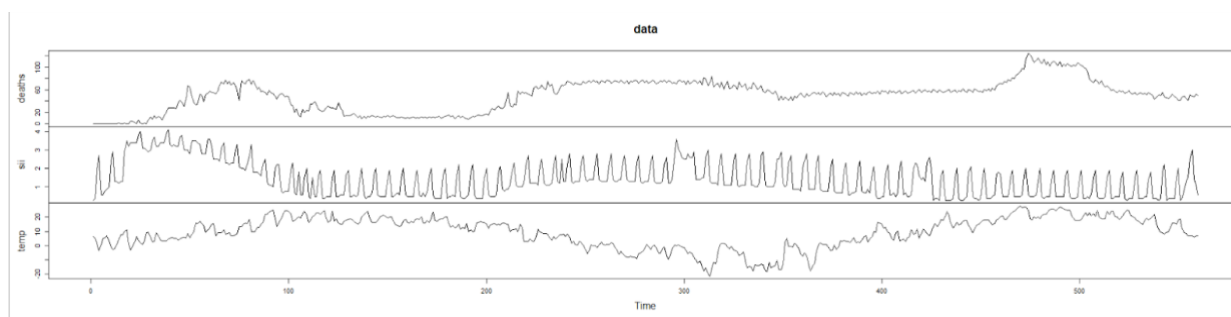


Рисунок 12.1 – Несглаженные данные временных рядов смертности, индекса самоизоляции и температуры (сверху вниз).

Изначально применялась модель векторной авторегрессии (англ. Vector AutoRegression, VAR) – модель динамики нескольких временных рядов, в которой текущие значения этих рядов зависят от прошлых значений этих же временных рядов (лагов). Однако анализ остатков модели посредством не показал четких закономерностей.

Тогда был проведён анализ на основе классической SIR-модели, подразумевающей разделение населения на три группы: S – количество лиц, восприимчивых к заболеванию, I – количество инфицированных лиц, R – количество лиц, выздоровевших и имеющих иммунитет или погибших, и $N = S + I + R$ – численность населения (13 млн человек для г. Москвы).

Рассмотрим уравнение заболеваемости

$$\frac{dI}{dt} = \frac{S}{N} \beta I - \gamma I,$$

где β – коэффициент интенсивности контактов с инфицированным, γ – коэффициент интенсивности выздоровления.

Преобразовав его:



$$\frac{d}{dt}(\log I) = \frac{S}{N} \beta - \gamma$$

и введя некоторые предположения:

- $\frac{S}{N} \rightarrow 1$, т. е. все выздоровевшие восприимчивы к повторному заражению, количество активных случаев невелико по сравнению с общей численностью населения;
- вместо постоянной скорости выздоровления γ предполагается, что все инфицированные покидают пул активных случаев через фиксированное количество дней, таким образом, γ не играет никакой роли в модели;
- предполагается линейная зависимость $\beta_t \sim aSII_t$ (индекс самоизоляции здесь инвертирован);

получается следующее уравнение

$$\Delta \log I_t = aSII_{t-1} + \varepsilon_t.$$

Результат подгонки модели прироста заболеваемости (3) показал наличие информации в остатках, поэтому они были смоделированы как процесс авторегрессии AR:

$$\Delta \log I_t = aSII_{t-1} + \varepsilon_t,$$

$$\varepsilon_t = \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + u_t.$$

Выразив первое уравнение через второе, получается модель авторегрессии и распределенного лага ARDL:

$$\Delta \log I_t = \theta_1 \Delta \log I_{t-1} + \theta_2 \Delta \log I_{t-2} + aSII_{t-1} - \theta_1 aSII_{t-2} - \theta_2 aSII_{t-3} + u_t$$

Результат подгонки скорректированной модели (5) (рис. 12.2):

```
Call:
dynlm(formula = as.formula(model.text), data = data, start = 1)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0,046761 -0,009232  0,002168  0,012058  0,054304

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
X.t -0,014324   0,001009 -14.197 < 2e-16 ***   (a)
X.1 -0,007434   0,001501   4,953 1,01e-06 *** (-a/θ1)
X.2 -0,006005   0,001172   5,123 4,33e-07 *** (-a/θ2)
Y.1  0,624572   0,043294  14.426 < 2e-16 ***   (θ1)
Y.2  0,285824   0,043857   6,517 1,78e-10 ***   (θ2)
---
Signif. codes:  0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 0,01553 on 490 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0,7697, Adjusted R-squared:  0,7673
F-statistic: 327.5 on 5 and 490 DF, p-value: < 2,2e-16
```

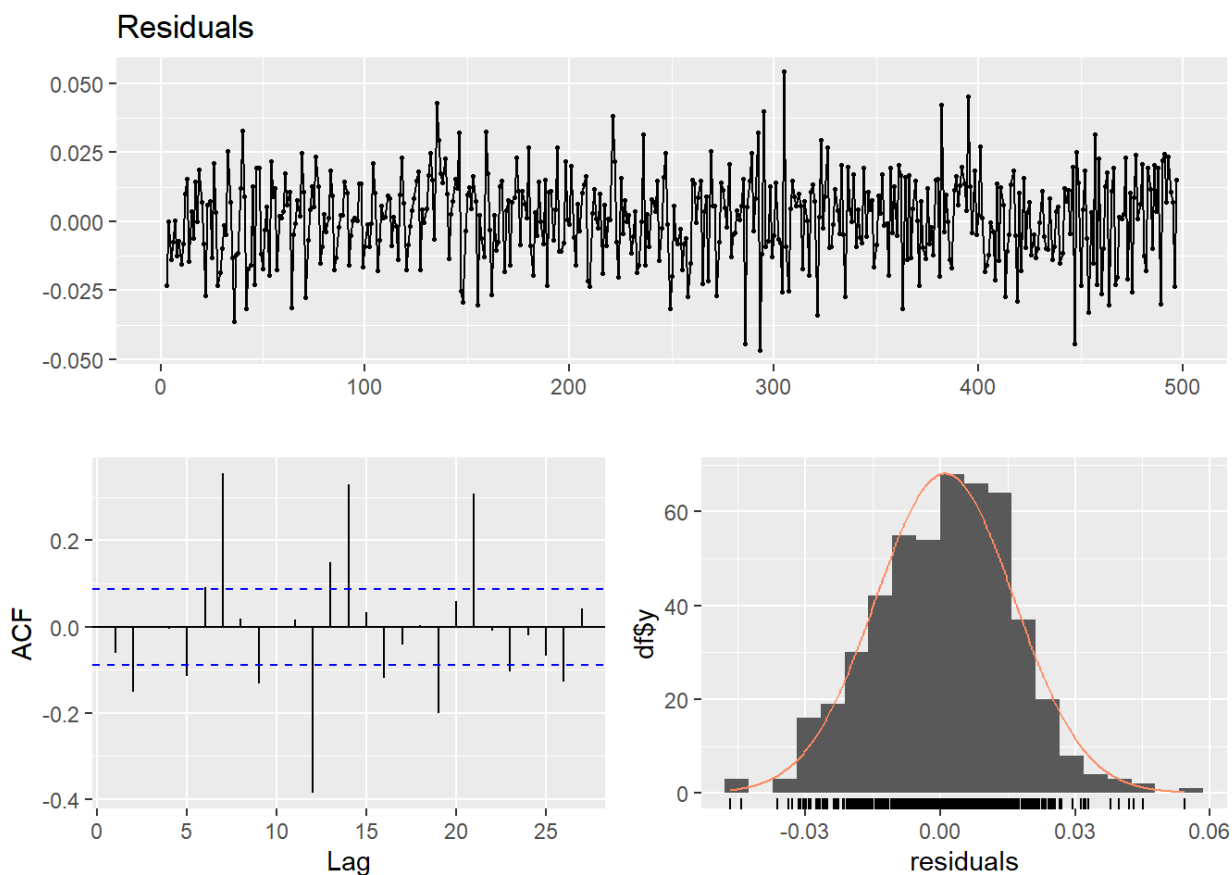


Рисунок 12.2 – Подгонка скорректированной модели прироста заболеваемости. Сверху изображён график остатков; снизу слева функция автокорреляции остатков; снизу справа – функция плотности остатков.

Скорректированная модель достаточно хорошо определена:

- остатки не коррелируют друг с другом, за исключением, по-видимому, сохранения некоторой сезонности;
- остатки имеют нулевое среднее значение во времени;
- остатки не коррелируют с SII;
- распределение остатков близко к нормальному.

Поэтому модель можно считать достаточно надежной.

Параллельно анализировалась взаимосвязь распространения SARS-CoV-2 и принятых социально-экономических мер и решений по сдерживанию этого распространения в г. Москве за период с 12 января 2020 по 7 июня 2021 года.

Метод основан на применении ДМА (дискретного математического анализа) и свёртки (конволюции) – операции в функциональном анализе. Свёрткой находятся места, где производная возрастает (начало возрастания временного ряда), или убывает (начало убывания временного ряда). Далее, с помощью регрессионных производных на базе ДМА,



находится граница, выделяющая на графике свертки локальные максимумы (пики), которые служат контрольными точками для нахождения событий, имеющих наиболее сильное влияние на динамику течения пандемии. Затем сопоставляются те события из базы данных, которые произошли за 14 дней (время инкубации коронавируса) до выделенных контрольных точек со сдвигом в 2 дня до и после. Такой подход облегчает дальнейший анализ, а также позволяет более тонко выделять закономерности и оценивать эффективность принимаемых мер.

На основе базы данных WHO была сделана выборка 8 социально-экономических событий из 141 (рис. 12.3), внесших существенный вклад в снижение динамики заболеваемости (категории самоизоляция, ограничение собраний людей, а также ношение индивидуальных средств защиты органов дыхания).

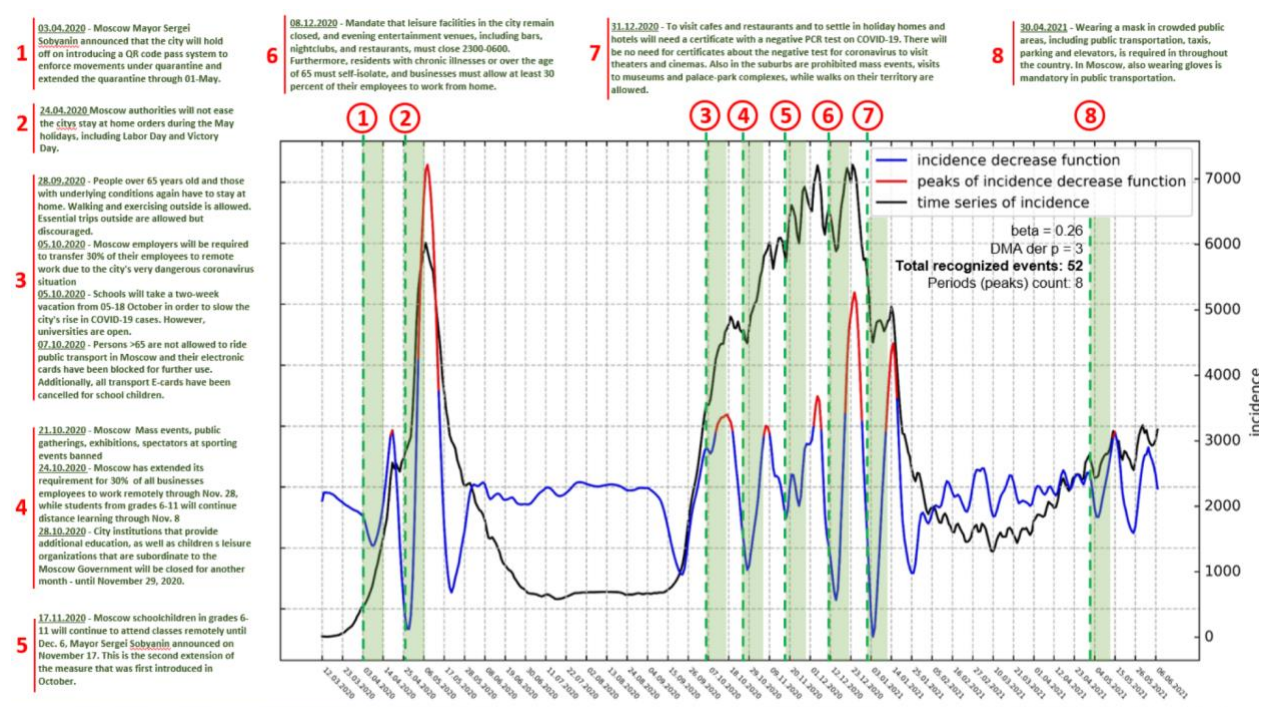


Рисунок 12.3 – Распознанные даты начала снижения уровня заболеваемости в г. Москве: исходный ряд заболеваемости показан на графике черным цветом; функция начала снижения уровня заболеваемости показана синим; локальные максимумы функции, указывающие на начало снижения заболеваемости, показаны красным. Цифрами помечены установленные временные отметки, которым соответствуют значимые меры (их описание приведено на рисунке).



Список использованных источников

- Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Dobrovolsky M. N., Kagan A. I. Weighted gravitational time series smoothing // Russ. J. Earth. Sci. – 2019. – №14, ES3002. DOI: 10.2205/2014ES000543
- Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Soloviev A. A., Sidorov R. V. The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications // Data Science Journal – 2016. – № 15. – P. 1–21. DOI: 10.5334/dsj-2016-016
- Агаян С. М., Соловьев А. А., Богоутдинов Ш. Р., Николова Ю.И Регрессионные производные и их применение в изучении геомагнитных джерков // Геомагнетизм и аэрономия – 2019. – Т. 59, № 3. – С. 383–392. DOI: 10.1134/S0016794019030027
- CoronaNet Research Project. – URL: <https://www.coronanet-project.org/> (дата обращения 19.07.2022).
- Public Health and Social Measures. – URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/phsm> (дата обращения 19.07.2022).
- Обзор: "Перечень мер в связи с коронавирусом (COVID-19)" (КонсультантПлюс, 2022). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348585/ (дата обращения 19.07.2022).
- Коронавирус. Дашборд и данные | Yandex Cloud – Marketplace). – URL: <https://cloud.yandex.ru/marketplace/products/yandex/coronavirus-dashboard-and-data> (дата обращения 19.07.2022).
- Погода | Yandex Cloud – Marketplace. – URL: <https://cloud.yandex.ru/marketplace/products/yandex/weather> (дата обращения 19.07.2022).



13 Международная деятельность ГЦ РАН в 2021 году

В 2021 году 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, член-корреспондент РАН А. А. Соловьев 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) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) и офицером по взаимодействию IUGG и Международного комитета по данным для науки и техники CODATA (IUGG Liaison Officer to the Committee on Data for Science and Technology, CODATA). Научный руководитель ГЦ РАН академик А. Д. Гвишиани является членом Коллегии экспертов Европейского научного фонда ("ESF College of Expert Reviewers"), председателем Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики и членом Межведомственного координационного совета по международному научному и научно-техническому сотрудничеству под руководством президента РАН А. М. Сергеева. Заместитель директора по развитию, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина – вице-президент Международного комитета по данным для науки и технологий при Международном совете по науке CODATA (The Committee on Data for Science and Technology ICSU) и представитель Комиссии по данным и информации (UCDI) в IUGG.

В 2021 году 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). Происходит обмен данными между обсерваторией «Алма-Ата» и сервером центра геомагнитных данных. Данные передаются в оперативном режиме. Осуществляется обмен историческими данными по линии Мировых центров данных, функционирующих в ГЦ РАН.

В 2021 году продолжается работа совместной геомагнитной обсерватории «Гюлагарак» в Армении, созданной в результате кооперации между Институтом геофизики и инженерной сейсмологии Республики Армения (ИГИС НАН) и ГЦ РАН.

В октябре 2021 году в ходе совместной экспедиции ГЦ РАН, Московского физико-технического института (МФТИ) и Российского центра освоения Арктики (НП «РЦОА», г. Салехард) на территории развертывания Международной арктической станции «Снежинка»



была проведена магнитоградиентометрическая съемка с целью исследования характера распределения аномалий магнитного поля Земли и определение участков, пригодных для размещения павильонов планируемой геомагнитной обсерватории.

В октябре 2021 году в с. Удабно (Грузия) состоялась совместная экспедиция сотрудников ГЦ РАН и ИГИС НАН (Армения). Были проведены измерения магнитной восприимчивости пород ширакской свиты разреза Удабно для оценки влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса. Экспедиционные задачи также включали в себя отбор образцов для литологических и палеонтологических исследований с целью дальнейшего описания изучаемых отложений и уточнения их геологического возраста. Работа выполнялась в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) 19-77-10075 «Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса».

В 2021 году ведущему научному сотруднику лаборатории геофизических данных ГЦ РАН, директору Мирового центра данных (МЦД) по солнечно-земной физике и МЦД по физике твердой Земли Наталии Александровне Сергеевой была присуждена премия Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии IAGA «Медаль IAGA за многолетнюю работу».

Издаваемый ГЦ РАН журнал "Russian Journal of Earth Sciences", включенный в третий квартиль (Q3) в отрасли знаний "Earth and Planetary Sciences", является в полной мере авторитетным международным изданием в области наук о Земле. Журнал "Russian Journal of Earth Sciences" издается с 1998 года. Главная цель журнала – ознакомить научное сообщество с наиболее важными научными результатами, полученными российскими учеными. Главным редактором журнала является академик РАН А. Д. Гвишиани; в редколлегию журнала входят такие известные ученые, как академик РАН А. О. Глико, член-корреспондент РАН А. А. Соловьев, П. Кабат (Швейцария) и другие ведущие ученые в области наук о Земле из разных стран.

В июле 2021 года директор ГЦ РАН, член-корреспондент РАН А. А. Соловьев выступил приглашенным редактором в спецвыпуске журнала "Applied Sciences" по теме «Наземные геомагнитные наблюдения: методы, инструменты и научные результаты». Специальный выпуск посвящен широкому кругу аспектов, связанных с развертыванием и эксплуатацией магнитных станций, обсерваторий и пунктов векового хода, а также современным методам полевых, воздушных и морских магнитных съемок. Научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани и зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Б.А. Дзедобоев выступили приглашенными редакторами в другом спецвыпуске журнала "Applied Sciences", посвященном теме "Геоинформатика и интеллектуальный анализ данных в



науках о Земле". Выпуск посвящен широкому кругу исследований в области интеллектуального анализа данных в науках о Земле: системному анализу, геоинформатике, data mining, Большим Данным и другим актуальным вопросам. Журнал "Applied Sciences" издается MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) – крупнейшим в мире издательством научных журналов с открытым доступом.

В 2021 году 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 2021 году:

- 22 апреля 2021 года научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН Гвишиани выступил с докладом «Большие данные в научных исследованиях» на Международной научно-практической конференции молодых учёных Московского международного университета (ММУ) «Сократовские чтения – 2021». Тематика конференции: «Стратегические национальные цели развития России: новое качество роста».
- ГЦ РАН совместно с Майкопским государственным технологическим университетом (МГТУ) выступили организаторами VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», которая прошла в г. Майкопе 17–21 мая 2021 года. Конференция проводилась в рамках «Года науки и технологий в России».
- Заместитель директора ГЦ РАН по развитию, заведующая лабораторией инновационных проектов А. И. Рыбкина выступила с докладом на конференции 35th IAS Meeting of Sedimentology, состоявшейся 21 июня 2021 года. Тема доклада: "The Depositional Setting and Astronomical Tuning of the East Georgia Konkian" (грант РФФИ № 19-77-10075 «Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса»).



- Коллектив ГЦ РАН во главе с директором чл.-корр. А. А. Соловьевым принял участие во II Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая проходила в Москве с 29 по 30 сентября 2021 года. Сотрудники Центра выступили на конференции с научными докладами.
- В октябре 2021 года проходила международная конференция CODATA SciDataCon-2021. С докладом по теме работы Комиссии по данным Группы земных наблюдений выступила заместитель директора по развитию ГЦ РАН А. И. Рыбкина, одна из четырех сопредседателей Рабочей группы по данным (Data-WG).
- В ноябре 2021 года прошла Генеральная ассамблея Комитета по данным при Международном совете по науке (CODATA ISC). Мероприятие было организовано онлайн. В нем принимали участие официальные делегаты национальных комитетов CODATA, а также Международных союзов Международного совета по науке. От национального комитета CODATA делегатом 2021 года был директор ГЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Соловьев. Также в программе и организации мероприятия принимала участие вице-президент CODATA, заместитель директора по развитию ГЦ РАН А. И. Рыбкина. Генеральная ассамблея поддержала рабочую группу по продвинутому системному анализу данных и новым математическим методам под руководством чл.-корр. РАН И. А. Шеремета.
- В декабре 2021 года состоялся российско-индийский вебинар "Scientific Webinar on Disaster Management Technologies" / «Технологии управления стихийными бедствиями», организованный Управлением международного сотрудничества РАН (УМС РАН), при содействии Посольства Индии в Москве. На вебинаре с приветственным словом выступил директор ГЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Соловьев. Свой доклад представил ученый секретарь ГЦ РАН Р. И. Краснопёров.



14 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 года.

Деятельность секций НГК РАН в 2021 году была направлена на подготовку к участию российских ученых и специалистов в научных мероприятиях, проводимых под эгидой IUGG и его ассоциаций. Ключевыми были научные ассамблеи ассоциаций IUGG.

С 28 июня по 2 июля 2021 года в Пекине (Китай) состоялась научная ассамблея Международной ассоциации геодезии (IAG) (<https://www.iag2021.com/>). В связи с пандемией COVID-19 Ассамблея впервые была организована как гибридное мероприятие. Главным местным организатором было Китайское общество геодезии, фотограмметрии и картографии (CSGPC) с более чем 20 соорганизаторами в Китае.

Неизвестным фактором при планировании было влияние пандемии COVID-19 на количество участников и число тезисов докладов. Несмотря на это, число зарегистрированных участников составило 1269 человек, что стало рекордом за всю историю ассамблей IAG, более чем в два раза превысив предыдущий рекорд. 435 (34%) участников были студентами и молодыми учеными. Тема Ассамблеи – «Геодезия для устойчивого развития Земли». Всего было проведено семь симпозиумов. Всего было подано 615 тезисов докладов, что также более чем в два раза превысило ожидаемое количество. Продолжительность устных выступлений была ограничена пятью минутами. На каждом заседании около половины времени отводилось на вопросы и обсуждения, что должно было смягчить недостаток личных контактов. Каждый день проводились три параллельные устные сессии и одна стендовая сессия, что позволило делать около 150 ежедневных докладов, из которых около 42% были устными.

В течение пяти дней было организовано в общей сложности 36 сессий. Наиболее популярными были сессии, посвященные новым методам наблюдений, темам, связанным с изменением климата, и геодезическим наблюдениям за опасными природными явлениями,



в дополнение к традиционным симпозиумам по системам отсчета, гравиметрии и исследованиям движений и деформаций. В работе ассамблеи приняли участие 10 представителей России. Российские ученые, включая членов НГК РАН, выступили конвенерами ряда научных сессий.

С 21 по 27 августа 2021 года в Хайдарабаде (Индия) в формате виртуальной конференции была организована совместная научная ассамблея Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии и Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли (Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI 2021 <http://iaga-iaspei-india2021.in/>). Ассамблея объединила 828 специалистов из 53 стран, более 500 из IAGA и почти 300 из IASPEI. В работе мероприятия приняли участие 212 студентов из 37 стран. Программа включала в себя три совместных пленарных доклада, восемь совместных сессий, 27 симпозиумов IAGA и 17 симпозиумов IASPEI с общим количеством 778 тезисов для устных и стендовых докладов. 25 августа 2021 года на Церемонии награждения IAGA ведущему научному сотруднику лаборатории геофизических данных ГЦ РАН, директору МЦД по солнечно-земной физике Наталии Александровне Сергеевой была вручена «Медаль IAGA за многолетнюю работу» (IAGA Long Service Award).

В работе ассамблеи приняли участие более 20 представителей России. Российские ученые, включая членов НГК РАН, выступили конвенерами ряда научных сессий. Национальным делегатом на заседаниях Совета IAGA был назначен ученый секретарь НГК РАН к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов. Национальным делегатом на заседаниях Совета IASPEI была назначена ученый секретарь ИТПЗ РАН к.ф.-м.н. А. А. Скоркина.

С 3 по 6 августа 2021 года на базе МГУ им. М. В. Ломоносова в онлайн-формате состоялась 4-я Международная конференция «Состояние и будущее больших рек мира» (4th International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers). Конференция проводилась под эгидой Международной ассоциации гидрологических наук (IAHS). В работе конференции приняли участие президент географического факультета МГУ академик РАН Н. С. Касимов, профессор биологического факультета, проректор МГУ Ю. А. Мазей, директор Института водных проблем РАН и член Секции гидрологических наук НГК РАН, чл.-корр. РАН А. Н. Гельфан, зав. кафедрой гидрологии суши МГУ профессор Н. Л. Фролова, зам. декана географического факультета МГУ, генеральный секретарь конференции доцент С. Р. Чалов, ведущие специалисты из России, Австралии, Австрии, Франции, Швеции, и других стран.



В связи с тяжелой эпидемиологической ситуацией совместная ассамблея IAMAS–IACS–IAPSO, запланированная на июль 2021 года в Пусане (Республика Корея), была отменена. Научные ассамблеи IAHS и IAVCEI были перенесены на 2022 год:

- IAHS, Монпелье, Франция, 29 мая – 3 июня 2022 года (<http://www.iahs2022.org/>).
- IAVCEI, Роторуа, Новая Зеландия, 30 января – 3 февраля 2023 года (<https://confer.eventsair.com/iavcei2023/>).

Следующая 28-я Генеральная ассамблея IUGG должна состояться с 11 по 20 июля 2023 году в Берлине, Германия.

Участие российских ученых в деятельности IUGG имеет большое научное и политическое значение для нашей страны, поскольку Союз является одним из ключевых игроков в сфере научной дипломатии и международного научного сотрудничества.

Представители России в Международном геодезическом и геофизическом союзе и его ассоциациях в 2020–2022 годах.

Национальный геофизический комитет РАН

Председатель: ГВИШИАНИ Алексей Джерменович (ГЦ РАН)

Заместитель председателя: МОРОЗОВ Евгений Георгиевич (ИО РАН)

Заместитель председателя: ЛЮБОВЦЕВА Юлия Сергеевна (ГЦ РАН)

Ученый секретарь: КРАСНОПЕРОВ 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 IAHS
Институт водных проблем 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



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

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 2021 год

Монографии

1. Гетманов В. Г. Цифровая обработка сигналов с приложениями для геофизики и экспериментальной механики. Учебник. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. — 356 с. ISBN 978-5-94836-620-3
2. Кудрявцев Н. Г., Кудин Д. В., Фролов И. Н., Темербекова А. А. Автоматизация проведения научных измерительных экспериментов в процессе проектной работы студентов и школьников. Горно-Алтайск: Горно-Алтайский государственный университет, 2021. — 218 с. ISBN: 978-5-91425-178-6

Статьи в журналах

1. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Добровольский М. Н., Иванченко О. В., Камаев Д. А. (2021). Регрессионное дифференцирование и регрессионное интегрирование конечных рядов. Чебышевский сборник, 22(2), 27-47. DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-2-27-47
2. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Иванченко О. В., Камаев Д. А. (2021). ДМА-алгоритмы регистрации проявления цунами в записях уровня моря. Вулканология и сейсмология, - (2), 59-66. DOI: 10.31857/S0203030621020024
3. Базилевская Г. А., Логачёв Ю. И., Дайбог Е. И., Власова Н. А., Гинзбург Е. А., Ишков В. Н., Лазутин Л. Л., Нгуен М. Д., Сулова Г. М., Яковчук О. С. (2021). Статистические связи между солнечными космическими лучами, радиоизлучением II типа и корональными выбросами массы. Геомагнетизм и аэрономия, 61(5), 672-679. DOI: 10.31857/S0016794021050035
4. Базилевская Г. А., Дайбог Е. И., Логачев Ю. И., Власова Н. А., Гинзбург Е. А., Ишков В. Н., Лазутин Л. Л., Нгуен М. Д., Сулова Г. М., Яковчук О. С. (2021). Некоторые особенности солнечных протонных событий и длительных гамма-вспышек в 24 цикле солнечной активности. Известия РАН. Серия физическая, 85(8), 1185-1188. DOI: 10.31857/S0367676521080044
5. Базилевская Г. А., Дайбог Е. И., Логачёв Ю. И., Власова Н. А., Гинзбург Е. А., Ишков В. Н., Лазутин Л. Л., Нгуен М. Д., Сулова Г. М., Яковчук О. С. (2021). Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24-м циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий. Геомагнетизм и аэрономия, 61(1), 1-8. DOI: 10.31857/S0016794021010028
6. Билалова А. Д., Гвишиани А. Д., Посёлов В. А. Ключевые научные институты скандинавских стран и международные проекты, ведущие исследования по изучению и освоению Арктики // Вестник ОНЗ РАН, 2022.
7. Воробьев А. В. (2021). Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика, 21(4), 46-58. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-4-532-543



8. Воробьев А. В., Воробьева Г. Р., Христуло О. И. (2021). Программная система пространственной визуализации прогностических и ретроспективных данных вероятности наблюдения полярных сияний. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 21(2), 225-233. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-225-233
9. Воробьев А. В., Пилипенко В. А. (2021). Подход к восстановлению геомагнитных данных на базе концепции цифровых двойников. Солнечно-земная физика, 7(2), 54-62. DOI: 10.12737/szf-72202105
10. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Еникеев Т. А., Воробьева Г. Р., Христуло О. И. (2021). Система динамической визуализации геомагнитных возмущений по данным наземных магнитных станций. Научная визуализация, 13(1), 162-176. DOI: 10.26583/sv.13.1.11
11. Гвишиани А. Д. (2021). Л. А. Вайсберг – крупный организатор, большой ученый, талантливый педагог и мудрый наставник. Горный журнал, -(11), 4-12. DOI: -
12. Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Лосев И. В., Татаринев В. Н. (2021). Методика оценки геодинамической опасности структурного блока, вмещающего объект подземной изоляции РАО. Горный информационно-аналитический бюллетень, -(12), 5-18. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_5
13. Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Агаян С. М., Белов И. О., Николова Ю. И. (2021). Нечеткие множества высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линейментов на Кавказе и в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Вулканология и сейсмология, -(2), 3-10. DOI: 10.31857/S0203030621020036
14. Гвишиани А. Д., Кедров Э. О., Любовцева Ю. С., Барыкина Ю. В. (2021). История исследований Геофизического центра РАН. 2016 год. Вестник ОНЗ РАН, 13, 1-26. DOI: 10.2205/2021NZ000368
15. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. (2021). Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 18(5), 277-291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291
16. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. (2021). Климатические изменения гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.). Океанология, 61(6), 900-912. DOI: 10.31857/S003015742106006X
17. Гусев И. В., Даргель Е. В., Лангеман И. П., Лебедев С. А. (2021). Результаты калибровки альтиметрических измерений космической геодезической системы «ГЕО-ИК-2» на акватории Рыбинского водохранилища. Геодезия и картография, 7, 43-55. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-973-7-43-55
18. Добровольский М. Н., Добровольский Н. Н., Добровольский Н. М. (2021). Об одном функциональном уравнении. Чебышевский сборник, 22(5), 359-364. DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-5-359-364
19. Захаров В. Н., Гвишиани А. Д., Вайсберг Л. А., Радченко Д. Н., Клебанов Д. А., Дзеранов Б. В. (2021). Большие Данные и устойчивое функционирование горно-технических систем. Горный журнал, 11. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06
20. Кафтан В. И. (2021). Анализ движений и деформаций земной поверхности по тринадцатилетним GPS наблюдениям до и во время землетрясений Риджквест (июль 2019, США, Калифорния). Вулканология и сейсмология, 2, 29-38. DOI: 10.31857/S0203030621010041



21. Кафтан В. И., Кафтан И., Гёк Е. (2021). Исследование движений и деформаций земной коры восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23 октября 2011 г., Mw=7.2) с использованием данных GPS наблюдений. *Физика Земли*, 3, 30-44. DOI: 10.31857/S0002333721030078
22. Кафтан В. И., Татаринцов В. Н. (2021). Анализ возможностей сетей локального деформационного ГНСС мониторинга в сейсмоопасных районах. *Вулканология и сейсмология*, 6, 21-29. DOI: 10.31857/S0203030621060043
23. Кишкина С. Б., Татаринцов В. Н., Бугаев Е. Г., Гупало В. С., Забродин С. М. (2021). Подземная исследовательская лаборатория: преодоление неопределённости в оценке сейсмических условий участка Енисейский Нижнеканского массива. *Радиоактивные отходы*, 3-(, 80-93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93
24. Ковыляева А. А., Барбашина Н. С., Гетманов В. Г., Дмитриева А. Н., Добровольский М. Н., Мишутина Ю. Н., Соловьев А. А., Чинкин В. Е., Шутенко В. В., Яковлева Е. И., Яшин И. И. (2021). Исследование Форбуш-эффектов во время мощных солнечных вспышек по данным мюонного годоскопа УРАГАН. *Известия РАН. Серия физическая*, 85(4), 605-608. DOI: 10.31857/S0367676521030145
25. Кудин Д. В., Соловьев А. А., Сидоров Р. В., Старостенко В. И., Сумарук Ю. П., Легостаева О. В. (2021). Система ускоренной подготовки квазиокончательных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. *Геомагнетизм и аэрономия*, 61(1), 46-59. DOI: 10.31857/S0016794021010090
26. Лебедев С. А., Гусев И. В. (2021). Международный опыт калибровки данных спутниковой альтиметрии на стационарных и временных полигонах. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(2), 18-35. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-18-35
27. Лебедев С. А., Гусев И. В. (2021). Перспективный полигон калибровки альтиметрических измерений российской космической геодезической системы. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(3), 67-80. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-67-80
28. Маневич А. И., В. И. Кафтан, Лосев И. В., Шевчук Р. В. (2021). Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга территории размещения подземной исследовательской лаборатории в Нижне-Канском массиве. *Сейсмические приборы*, 57(2), 43-61. DOI: 10.21455/si2021.2-3
29. Морозов В. Н., Маневич А. И. (2021). Механизм формирования разрыва землетрясения Хансин-Авадзи (г. Кобе, Япония) 17.01.1995 M 6.9. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 499(2), 151-158. DOI: 10.31857/S2686739721080089
30. Павлов В. Э., Богоутдинов Ш. Р., Мещерякова О. А. (2021). Влияние факторов, искажающих палеомагнитную запись, на оценку параметров древних вековых геомагнитных вариаций по результатам послойных исследований осадочных разрезов. *Геомагнетизм и аэрономия*, 61(3), 390-407. DOI: 10.31857/S0016794021020097
31. Пилипенко В. А. (2021). Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*, 7(3), 72-110. DOI: 10.12737/szf-73202106
32. Пилипенко В. А. (2021). МГД волны в космосе и на Земле: исторический аспект. *Вестник ОНЗ РАН*, 13(-), 1-15. DOI: 10.2205/2021NZ000371
33. Розенберг И. Н., А. Д. Гвишиани, А. А. Соловьев, В. А. Воронин, В. А. Пилипенко Влияние космической погоды на надежность функционирования железнодорожного транспорта в арктической зоне России // *Железнодорожный Транспорт*, 2022.



34. Рябов А. В., Пилипенко В. А., Ермакова Е. Н., Мазур Н. Г., Федоров Е. Н., Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н. (2021). Регистрация искусственных УНЧ-сигналов на магнитной станции старая пустынь во время эксперимента FENICS-2019. *Геомагнетизм и аэрономия*, 61(3), 354-365. DOI: 10.31857/S0016794021030147
35. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. (2021). Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи. *Известия РАН. Серия физическая*, 85(3), 445-450. DOI: 10.31857/S0367676521030236
36. Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Камнев Е. Н., Маневич А. И. (2021). Геодинамические аспекты захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (Нижнеканский массив). *Горный журнал*, -(3), 108-112. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05
37. Уваров Д. Н. (2021). Проблемы и перспективы космической отрасли России. *Вестник ОНЗ РАН*, 13(-), 1-10. DOI: 10.2205/2021NZ000370
38. Чинкин В. Е., Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Яшин И. И., Ковыляева А. А. (2021). Метод оценивания вариаций интенсивностей мюонных потоков на основе временных рядов матричных наблюдений годоскопа УРАГАН. *Известия РАН. Серия физическая*, 85(5), 749-752. DOI: 10.31857/S036767652103008X
39. Чинкин В. Е., Гетманов В. Г., Яшин И. И. (2021). Синтез цифрового низкочастотного квазигауссовского фильтра для снижения шумов в пуассоновских наблюдениях. *Автометрия*, 57(4), 118-125. DOI: 10.15372/AUT20210414
40. Abdalla S., Lebedev S. et al. (2021). Altimetry for the future: Building on 25 years of progress. *Advances in Space Research*, 68(2), 319-363. DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.022
41. Agayan S. M., Bogoutdinov Sh.R., Kamaev D. A. , Kaftan V. I. , Osipov M. O., Tatarinov V. N. (2021). Theoretical framework for determination of linear structures in multidimensional geodynamic data arrays. *Applied Sciences*, 11(24), 1-24. DOI: 10.3390/app112411606
42. Agayan S. M., Bogoutdinov Sh.R., Krasnoperov R. I., Sidorov R. V. (2021). A multiscale approach to geomagnetic storm morphology analysis based on DMA activity measures. *Applied Sciences*, 11(24), 1-18. DOI: 10.3390/app112412120
43. Badulin S., Kostianoy A., Shabanov P., Sharmar V., Grigorieva V., Lebedev S. (2021). Self- and Inter-Crossover Points of Jasons' Missions as New Essential Add-on of Satellite Altimetry in the Sub-Arctic Seas and the Southern Ocean. *Remote Sensing*, 13(4), 1-23. DOI: 10.3390/rs13040658
44. Chinkin V. E., Soloviev A. A., Pilipenko V. A., Engebretson M. J., Sakharov Ya.A. (2021). 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*, 212(105514), 1-7. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105514
45. Dzeboev B., Gvishiani A., Agayan S., Belov I., Karapetyan J., Dzeranov B., Barykina Yu. (2021). System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition. *Applied Sciences*, 11(17), 1-30. DOI: 10.3390/app11177972
46. Fedorov E. N., Mazur N. G., Pilipenko V. A. (2021). Electromagnetic response of the mid-latitude ionosphere to power transmission lines. *Journal of Geophysical Research*, 126(10), 1-19. DOI: 10.1029/2021JA029659
47. Getmanov V., Chinkin V., Sidorov R., Gvishiani A., Dobrovolsky M., Soloviev A., Dmitrieva A., Kovylyayeva A., Osetrova N., Yashin I. (2021). Low-pass filtering method for poisson data time series. *Applied Sciences*, 11(10), 1-12. DOI: 10.3390/app11104524



48. Getmanov V. G., Chinkin V. E., Dobrovolsky M. N., Sidorov R. V., Kryanev A. V., Yashin I. I. (2021). A Method for Estimating the Normalized Instrument Response Function of the URAGAN Muon Hodoscope. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 18(1), 115-122. DOI: 10.1134/S1547477121010064
49. Getmanov V. G., Chinkin V. E., Sidorov R. V., Gvishiani A. D., Dobrovolsky M. N., Solovyev A. A., Dmitrieva A. N., Kovylyaeva A. A., Yashin I. I. (2021). Methods for recognizing local anisotropies of muon fluxes in the time series of matrix observations of the URAGAN hodoscope. *Physics of Atomic Nuclei*, 84(6), 1080-1086. DOI: 10.1134/S106377882113010X
50. Getmanov V. G., Dobrovolsky M. N., Butyrsky E. Yu., Gvishiani A. D., Dobrovol'skii M. N., Sidorov R. V., Yashin I. I., Dmitrieva A. N. (2021). A Method for Local Anisotropy Recognition in Muon Fluxes Based on Matrix Observations of the URAGAN Hodoscope Using Calculations of Systems of Confidence Intervals and Spatiotemporal Filtering. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 31(4), 758-768. DOI: 10.1134/S1054661821040106
51. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Losev I. V., Manevich A. I. (2021). GIS-Oriented Database for the System Analysis and Prediction of the Geodynamic Stability of the Nizhne-Kansky Massif. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 57(9), 1151-1161. DOI: 10.1134/S0001433821090486
52. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Manevich A. I., Kaftan V. I. (2021). Geodynamic interpretation of modern geodynamic Movements in the southern part of the Yenisei Ridge (in application to the problems of underground isolation of radioactive waste). *Eurasian Mining*, - (2), 7-11. DOI: 10.17580/em.2021.02.02
53. Kaban M., Gvishiani A., Sidorov R., Oshchenko A., Krasnoperov R. (2021). Structure and Density of Sedimentary Basins in the Southern Part of the East-European Platform and Surrounding Area. *Applied Sciences*, 11(2), 1-16. DOI: 10.3390/app11020512
54. Khodzher, T. V., Zagaynov, V. A., Lushnikov, A. A., Chausov, V. D., Zhamsueva, G. S., Zayakhanov, A. S., Tsydygov, V. V., Potemkin, V. L., Marinaite, I. I., Maksimenko, V. V., & Agranovski, I. E. (2021). Study of Aerosol Nano- and Submicron Particle Compositions in the Atmosphere of Lake Baikal During Natural Fire Events and Their Interaction with Water Surface. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(7), 1-12. DOI: 10.1007/s11270-021-05237-6
55. Kholodkov K., Aleshin I., Arakelov A., Burov V., Vasiliev A., Ivanov S. (2021). Sino-Russian space weather effort for global air navigation safety. *Russian Journal of Earth Sciences*, 21(4), 1-4. DOI: 10.2205/2021ES000774
56. Kronberg E. A., Daly P. W., Grigorenko E. E., Smirnov A. G., Klecker B., Malykhin A. Yu. (2021). Energetic charged particles in the terrestrial magnetosphere: Cluster/RAPID results. *Journal of Geophysical Research*, 126(9), 1-18. DOI: 10.1029/2021JA029273
57. Marshalko E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., Juusola L., Kaggwa Kwagala N., Sokolova E., Pilipenko V. (2021). Comparing three approaches to the inducing source setting for the ground electromagnetic field modeling due to space weather events. *Space Weather*, 19(2), 1-18. DOI: 10.1029/2020SW002657
58. Peregoudov D. V. (2021). On the Construction of Phenomenological Coronal Mass Ejection Models. *Space Weather*, 19(3), 1-9. DOI: 10.1029/2020SW002659
59. Pilipenko O. V., Salnaya N. V., Rostovtseva Yu. V., Novruzov Z. (2021). Rock-magnetic studies of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch Peninsula). *Russian Journal of Earth Sciences*, 21(2), 1-15. DOI: 10.2205/2021ES000765
60. Rigaud R., Kruglyakov M., Kuvshinov A., Pinheiro K. J., Petereit J., Matzka J., Marshalko E. (2021). Exploring effects in tippers at island geomagnetic observatories due to realistic depth-



- and time-varying oceanic electrical conductivity. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 1-22. DOI: 10.1186/s40623-020-01339-3
61. Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., Krasnoperov R. (2021). Historical K index data collection of Soviet magnetic observatories, 1957–1992. *Earth System Science Data (ESSD)*, 13(5), 1987–1999. DOI: 10.5194/essd-13-1987-2021
62. Serykh I. V., Sonechkin D. M. (2021). El Niño – Global Atmospheric Oscillation as the Main Mode of Interannual Climate Variability. *Atmosphere*, 12(1443), 1-28. DOI: 10.3390/atmos12111443
63. Sidorov R., Kaban M., Soloviev A., Petrunin A., Gvishiani A., Oshchenko A., Popov A., Krasnoperov R. (2021). Sedimentary basins of the Eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompensative gravity anomalies. *Solid Earth*, -(12), 2773-2788. DOI: 10.5194/se-12-2773-2021
64. Soloviev A., Bogoutdinov Sh., Nisilevich M. (2021). On the frequency distribution of geomagnetic K indices in the northwestern Pacific region over the 19-24 solar cycles. *Pure and Applied Geophysics*, 178(-), 1-18. DOI: 10.1007/s00024-021-02862-4
65. Vorobev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Khristodulo O. (2021). Development and application of problem-oriented digital twins for magnetic observatories and variation stations. *Information and Control Systems*, -(2), 60-71. DOI: 10.31799/1684-8853-2021-2-60-71
66. Yagova N. V., Pilipenko V. A., Sakharov Y. A., Selivanov V. N. (2021). Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 1-13. DOI: 10.1186/s40623-021-01407-2

Статьи в сборниках или главы книг

1. Dzeboev B., Dzeranov B., Pasishnichenko M. (2021). Recognition of Strong Earthquake-Prone Areas with a Single Learning Class. *Caucasus, $M \geq 6.0$. Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere / «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering».*, 441-453. DOI: 10.1007/978-3-030-63571-8_26
2. Gvishiani, A., Dobrovolsky, M., & Rybkina, A. (2021). Chapter 6 Big Data and FAIR Data for Data Science. In *Resilience in the Digital Age* (pp. 105–117). Springer International Publishing.
3. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Kravchenko P. N., Shevyakova O. P. (2021). Seasonal and interannual variability of NDVI in the Republic of Adygea. *The Handbook of Environmental Chemistry*
4. Morozov V., Tatarinov V., Kagan A. (2021). Seismotectonic model of the western margin of the South American Plate . *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere / «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering».*, 469-479. DOI: 10.1007/978-3-030-63571-8_28
5. Odintsova A., Rybkina A., Nikolova J., Korolkova A. (2021). ROSA Database and GIS Project: accumulation of the world largest oil and gas deposits in geological history. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere / «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering».*, 337-250. DOI: 10.1007/978-3-030-63571-8_19
6. Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Rashidov V., Nisilevich M., Krylova T. (2021). Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere / «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering».*, 411-428. DOI: 10.1007/978-3-030-63571-8_24



Конференции

1. Гвишиани А. Д. Большие Данные, ГОСТ РФ и науки о Земле // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
2. Дзебоев Б. А. О методах распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
3. Дзеранов Б. В. Российские стандарты больших данных // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
4. Краснощёров Р. И. Магнитные наблюдения в России: история и современность // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
5. Лебедев С. А. Спутниковая альтиметрия Белого и Баренцева морей // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
6. Маневич А. И. Моделирование поля скоростей горизонтальных движений Нижне-Канского массива по данным ГНСС-наблюдений // XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2021», сессия «Инженерная геология и маркшейдерское дело» (г. Москва, 25 – 29 января, НИТУ «МИСиС»), 2021.
7. Пилипенко В. А. Что такое космическая погода и какое нам до нее дело? // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
8. Сидоров Р. В. Наземные геофизические съемки в геологических и технических изысканиях // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
9. Соловьёв А. А. Динамика геомагнитного поля в Арктическом регионе: источники, наблюдения и модели // Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (20–21 сентября 2021 г., г. Архангельск), 2021.
10. Соловьёв А. А. Факторы влияния геофизических процессов в российской Арктике на технологическую инфраструктуру железнодорожного транспорта // Научно-практический семинар «Экология и транспорт» на базе АО НИИАС и ИФА им. А. М. Обухова РАН, 30 июня 2021 г. (г. Москва), 2021.



Статьи в сборниках трудов конференций

1. Королев Р. Ю., Лебедев С. А. Метод наименьших квадратов для нахождения параметров модели Брауна // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
2. Костяная Е. А., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Серых И. В. Воздействие экстремальных погодных условий и регионального изменения климата на инфраструктуру железных дорог // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
3. Костяной А. Г., Костяная Е. А., Лебедев С. А., Серых И. В., Прокофьев Я. А. Межгодовая изменчивость уровня озер северо-запада России // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
4. Лебедев С. А., Костяной А. Г., Костяная Е. А., Серых И. В. Межгодовая и сезонная изменчивость основных гидрометеорологических параметров состояния Белого моря по данным спутниковой альтиметрии // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
5. Лебедев С. А., Костяной А. Г., Кравченко П. Н., Шевякова О. П. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости индекса NDVI на территории Республики Адыгея // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
6. Ростовцева Ю. В., Краснова А. В. Бокситоносные отложения кровли доюрского комплекса западно-сибирской плиты // "Россыпи и месторождения кор выветривания XXI века: задачи, проблемы, решения" Материалы XVI Международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания. Воронеж, 2021.
7. Сахно А. В., Лебедев С. А. Перспективы использования цифровой модели рельефа для решения прикладных задач геологии и геофизики // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
8. Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О междекадных изменениях температуры воздуха у поверхности в регионе Белого моря // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
9. Третьяк И. Д., Лебедев С. А. Методы ассимиляции данных наблюдений в математических моделях геофизической гидродинамики // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В. О.», 2021.
10. Kolesnikov I., Tatarinov V., Tatarinova T. (2021). Deformation transverse shear bending state of a thin plate layer of an anisotropic geological medium from the action of concentrated energy impulses. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 1(-), 117-121. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6510
11. Manevich A., Kaftan V., Shevchyk R., Urmanov D. (2021). Modelling the horizontal velocity field of the Nizhne-Kansk massif according to GNSS Observations. Environment. Technology.



- Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 1(-), 162-169. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6545
12. Pobedinsky G. G., Kaftan V. I., Yerukov S. V. Metrological support of geodetic GNSS equipment in the field of long distance measurement // Сборник трудов конференции "Доклады X международного симпозиума «Метрология времени и пространства", 2021.
13. Presnyakov S., Boyarshinov G., Borovskaya T., Rybkina A. (2021). Graphic file formats for web virtual globe. GraphiCon 2021: 31st International Conference on Computer Graphics and Vision, September 27-30, 2021, Nizhny Novgorod, Russia, 2(-), 580-588. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-580-588
14. Yashin, I., Gvishian, A. G., Astapov, I. I., Dmitrieva, A. N., Gvishiani, A. G., Getmanov, V. G., Kovylyayeva, A. A., Mishutina, Yu. N., Soloviev, A. A., & Shutenko, V. V. (2021). Study of the anisotropy of cosmic rays during the periods of the minima of the 24th solar cycle using the muonography method according to the data of the URAGAN muon hodoscope. In Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021). 37th International Cosmic Ray Conference.

Тезисы

1. Гвишиани А. Д. Big Data in Earth Sciences and Zilitinkevich's Conception // The Atmospheric and Climate Competence Center (ACCC) Impact Week, 2021.
2. Гвишиани А. Д. Russian Perspectives in Arctic Science Collaboration // The Atmospheric and Climate Competence Center (ACCC) Impact Week, 2021.
3. Кафтан В. И. Коровая погода и сильные землетрясения. Дефицит современных движений и деформационные волны по ГНСС наблюдениям // II Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», 2021.
4. Комитов Б. П., Кафтан В. И. Эффект Данжона, солнечная активность, вулканизм и климат // XXV Всероссийская ежегодная конференция "Солнечная и солнечно-земная физика-2021", 2021.
5. Кудин Д. В., Красноперов Р. И. Расчет амплитуд экстремальных событий на территории России по данным наземных наблюдений во время 24-го солнечного цикла // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений XII международная конференция 27 сентября - 1 октября 2021 г., с. Паратунка, Камчатский край, 2021, 64-65.
6. Маневич А. И., Лосев И. В., Шевчук Р. В. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // XXIX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 11–16 мая 2021 г.), 2021.
7. Серых И. В., Костяной А. Г. О климатических изменениях температуры в регионе Белого моря // XIX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2021.



8. Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О переходе климата северо-запада России в новое фазовое состояние // IV Всероссийская конференция "Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России" 24-26 ноября 2021, Иркутск, 2021.
9. Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О причинах климатической изменчивости температуры Баренцева моря // X Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование. MARESEDU-2021" 25-29 октября 2021, 2021.
10. Соловьев А. А., Сидоров Р. В., Ощенко А. А., Зайцев А. Н., Чинкин В. Е., Кудин Д. В. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в АЗРФ // VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021) г. МОСКВА, 4 – 9 ОКТЯБРЯ 2021 г, Институт Океанологии РАН, 2021.
11. Хомутов С. Ю., Сапунов В. А., Денисов А. Ю., Бородин П. Б., Кудин Д. В., Сидоров Р. В., Бебнев А. С., Черепанова Е. А., Котиков А. Л., Канониди К. Х., Барышев П. Е., Турбин Ю. Г. Векторный Оверхаузеровский магнитометр POS-4: опыт использования и перспективы применения // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений XII международная конференция 27 сентября - 1 октября 2021 г., с. Паратунка, Камчатский край, 2021, 42-43.
12. Шевчук Р. В. Исследование движений и деформаций земной коры на семилетнем интервале перед сильными сейсмическими событиями Кумамото, Япония, (2016) // XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». (г. Санкт-Петербург, 14–16 апреля 2021 г.), 2021.
13. Chinkin V., Getmanov V., Gvishiani A., Dobrovolsky M., Sidorov R., Soloviev A., Dmitrieva A., Kovylyayeva A., Yashin I. Recognition of extreme magnetospheric processes based on neural network technologies using data from the URAGAN muon hodoscope and a system of neutron monitors // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
14. Chinkin V., Soloviev A., Pilipenko V. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
15. Firsov I., Gillet N., Jault D., Manda M. Inversion for the quasi-geostrophic stream function in the fluid outer core from geomagnetic observations // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
16. Getmanov V. G., Gvishiani A. D., Dobrovolsky M. N., Sidorov R. V., Soloviev A. A., Chinkin V. E., Dmitrieva A. N., Kovylyayeva A. A., Yashin I. I. Application of digital processing of muonogram time series to the analysis of extreme events in the heliosphere // The 3-rd International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics 08-10.06.2021.(ISCRA-2021), 2021.
17. Kaban M., Gvishiani A., Sidorov R., Oshchenko A., Krasnoperov R. A new sedimentary cover model for the southern area of the East European Platform and the Pre-Caucasus based on



- decompensation gravity anomalies data // EGU General Assembly 2021 (vEGU21: Gather Online. 19–30 April 2021), 2021.
18. Kolesnikov I., Tatarinov V., Tatarinova T. Deformation transverse shear bending state of a thin plate layer of an anisotropic geological medium from the action of concentrated energy impulses // 13th International Scientific and Practical Conference. June 17-18, 2021, Rezekne Academy of Technologies, Rezekne, Latvia, 2021.
 19. Kudin D., Soloviev A. Advanced Production of Quasi-Definitive Magnetic Observatory Data of the INTERMAGNET Standard // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
 20. Manevich A., Kaftan V., Shevchyk R., Urmanov D. Modelling the horizontal velocity field of the Nizhne-Kansk massif according to GNSS Observations // 13th International Scientific and Practical Conference. June 17-18, 2021, Rezekne Academy of Technologies, Rezekne, Latvia, 2021.
 21. Sergeeva N. A., Zaitsev A. N., Kanonidi K. K., Petrov V. G., Zabarinskaya L. P., Kudin D. V., Nisilevich M. V., Khafizov A. S. Historical data on the Earth's magnetic field for research on magnetosphere physics // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
 22. Serykh I. V., Kostianoy A. G. Interannual variability and predictability of the Barents Sea temperature // BjercknesCPU/Blue-Action/ROADMAP/CLIVAR workshop on "Multi-annual to Decadal Climate Predictability in the North Atlantic-Arctic Sector", 20-22 September 2021, 2021, 29-30.
 23. Sidorov R., Chinkin V., Getmanov V., Gvishiani A., Dobrovolskiy M., Dmitrieva A., Kovylyayeva A., Yashin I., Tsibizov L. Identification of extreme events in magnetosphere based on the indicator functions system for the URAGAN hodoscope data // Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI. Hyderabad, India. 21-27 August 2021, 2021.
 24. Sidorov R., Getmanov V., Chinkin V., Gvishiani A., Dobrovolsky M., Soloviev A., Tsibizov L., Dmitrieva A., Kovylyayeva A., Osetrova N., Yashin I. A method for muon flux intensity modulations recognition using the indicator matrices for the URAGAN hodoscope matrix data // EGU General Assembly 2021 (vEGU21: Gather Online. 19–30 April 2021), 2021.
 25. Sidorov R., Kaban M., Soloviev A., Petrunin A., Gvishiani A., Oshchenko A., Popov A., Krasnoperov R. New features of sedimentary basins in North-eastern Asia revealed by the decompensative gravity anomalies // AGU Fall Meeting. 13-17 December 2021, 2021.
 26. Soloviev A., Zaitsev A., Pilipenko V., Ptitsyna N., Sokolov S., Soldatov V., Tyasto M., Krasnoperov R. History of space weather studies and observations: Russian aspect // 26th International Congress of History of Science and Technology (25-31 July 2021, online), 2021.

Данные

1. Soloviev, A., Y. Kopytenko, A. Kotikov, D. Kudin, R. Sidorov, M. Matveev. (2021), 2020 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. ESDB repository, GCRAS, Moscow, <https://doi.org/10.2205/SPG2020min-def>



2. Soloviev, A., Y. Kopytenko, A. Kotikov, D. Kudin, R. Sidorov. (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. ESDB repository, GCRAS, Moscow, <https://doi.org/10.2205/SPG2017min-def>

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

Программы для ЭВМ

1. Богоутдинов Ш. Р., Агаян С. М., Фирсов И. А. Программа для решения систем линейных уравнений методом Грама-Шмидта / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668741 от 19 ноября 2021 г.
2. Бояршинов Г. С., Пресняков С. В., Рыбкина А. И. ORBUS Web 1.0 COVID-19 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665068 от 17 сентября 2021 г.
3. Бояршинов Г. С., Пресняков С. В., Рыбкина А. И. ORBUS Web 1.1 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666638 от 18 октября 2021 г.
4. Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Сидоров Р. В., Соловьев А. А., Добровольский М. Н. PRFL / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668669 от 18 ноября 2021 г.
5. Гетманов В. Г., Гвишиани А. Д., Сидоров Р. В., Соловьев А. А., Добровольский М. Н. SQFL / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668727 от 19 ноября 2021 г.
6. Гетманов В. Г., Цибизов Л. В., Соловьев А. А., Чинкин В. Е., Сидоров Р. В. Программа фильтрации для “индикаторных матриц” - матриц аномальных значений мюонного потока, зарегистрированного мюонным годоскопом УРАГАН / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661367 от 09 июля 2021 г.
7. Кедров Э. О. RJES RA-style 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666635 от 18 октября 2021 г.
8. Колесников И. Ю., Татаринцов В. Н., Татаринцова Т. А. Программа конечно-элементного расчета на изгиб геологического пластинчатого слоя на основе спектральных неалгебраических 8-узловых КЭ и схемы функциональной декомпозиции» «SFE8-FD_GEO.RM_PLATE-1» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661508 от 12 июля 2021 г.
9. Маневич А. И., Шевчук Р. В., Лосев И. В. Программа для расчета компонент деформаций по данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665069 от 17 сентября 2021 г.
10. Пресняков С. В., Бояршинов Г. С., Дьяков В. В., Боровская Т. Е. ORBUS Sensor 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668672 от 18 ноября 2021 г.



11. Сидоров Р. В., Соловьев А. А., Богоутдинов Ш. Р. Программа расчета аномальной составляющей магнитного поля по данным пешеходной магнитоградиентометрии для магнитометров типа GSM-19 / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668670 от 18 ноября 2021 г.
12. Соловьев А. А. JSP-сервис доступа к базе метаданных интеллектуальной ГИС «Данные наук о Земле по территории России» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661728 от 14 июля 2021 г.
13. Соловьев А. А., Белов И. О. Веб-сервис визуализации модельных электромагнитных параметров приполярной ионосферы / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661565 от 13 июля 2021 г.
14. Соловьев А. А., Белов И. О. Веб-сервис динамической визуализации параметров геомагнитного поля вдоль пролета спутников SWARM / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661564 от 13 июля 2021 г.
15. Соловьев А. А., Кудин Д. В. Программа для динамического расчета регулярных базисных значений компонент геомагнитного поля по данным обсерваторских наблюдений / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668671 от 18 ноября 2021 г.
16. Соловьев А. А., Ощенко А. А., Сидоров Р. В. Программа для расчета траекторных параметров модельной скважины при навигации по непрерывным измерениям геомагнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666751 от 19 октября 2021 г.
17. Шакиров А. И., Урманов Д. И., Маневич А. И. Программа для визуализации параметров деформаций в среде Python / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666637 от 18 октября 2021 г.

Базы данных

1. Боровская Т. Е., Бояршинов Г. С., Пресняков С. В., Рыбкина А. И. База данных 3D визуализаций ORBUS AR 1.0 / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622563 от 19 ноября 2021 г.
2. Красноперов Р. И., Дзебоев Б. А., Соловьев А. А., Сергеева Н. А., Нисилевич М. В. База данных спутниковых геомагнитных наблюдений ранними советскими ИСЗ «Космос-49» и «Космос-321» / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622251 от 25 октября 2021 г.
3. Рыбкина А. И., Ростовцева Ю. В., Пилипенко О. В., Одинцова А. А. База данных по оценке влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления миоценовых толщ Центрального и Восточного Паратетиса / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621949 от 13 сентября 2021 г.
4. Рыбкина А. И., Самохина О. О., Лосев И. В., Николова Ю. И. Интерактивный ГИС-Атлас по оценке изменчивости условий осадконакопления в миоцене на примере разрезов Паратетиса / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621924 от 10 сентября 2021 г.



5. Сергеева Н., Гвишиани А., Соловьев А., Красноперов Р., Забаринская Л., Крылова Т., Нисилевич М. База исторических данных о геомагнитном индексе К магнитных обсерваторий бывшего СССР, 1957–1992 гг. / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622162 от 18 октября 2021 г.
6. Соловьев А. А., Красноперов Р. И., Самохина О. О. XML база метаданных интеллектуальной ГИС «Данные наук о Земле по территории России» / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621508 от 12 июля 2021 г.