

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

—

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

—

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук

О Т Ч Е Т

о деятельности института за 2019 год

Москва

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

—

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

—

GEOPHYSICAL CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS
FOR 2019

Results of Scientific Research
and International Projects

Moscow



This volume presents information on the research activities of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences in 2019. The main results of the scientific research obtained within the budgetary funding are presented. The report also includes the results of scientific research within the grants of the Russian Science Foundation (RSPF) and the Russian Foundation for Basic Research (RFBR). This report gives information on the international activity of the Geophysical Center including the work of the National Geophysical Committee of the Russian Academy of Sciences (NGC RAS). The report also includes a list of works published and intellectual properties in the Geophysical Center in 2019.

Editors in chief:

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

R. I. Krasnoperov, Scientific Secretary of GC RAS

Editorial board:

A. D. Gvishiani, Academician RAS, Chief Scientist

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

Approved for publishing on 24.09.2020

Layout Production:

E. O. Kedrov

<https://doi.org/10.2205/2020BS054>

<http://ebooks.wdcb.ru/2020/2020BS054/2020BS054.pdf>

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2020), Report of Geophysical Center of RAS. Results of Science Researches and International Projects for 2019, Geoinf. Res. Papers, Vol. 8, No. 1, BS8001, <https://doi.org/10.2205/2020BS054>

M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 2020, 203 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2020 Geophysical Center RAS



В настоящем издании содержатся сведения о научной деятельности Геофизического центра Российской академии наук в 2019 г. Представлены сведения об основных результатах, полученных в рамках государственного задания по темам научно-исследовательских работ. В отчет также включены результаты научных исследований по грантам Российского научного фонда (РНФ) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). Приведена информация о международной деятельности Геофизического центра, включая деятельность в качестве Национального геофизического комитета Российской академии наук (НГК РАН). В отчет также включен перечень работ, опубликованных сотрудниками Геофизического центра, а также результатов интеллектуальной деятельности в 2019 г.

Ответственные редакторы:

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

Р. И. Краснощёв, учёный секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

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

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Утверждено к печати 24.09.2020 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

<https://doi.org/10.2205/2020BS054>

<http://ebooks.wdcb.ru/2020/2020BS054/2020BS054.pdf>

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснощёв (ред.) (2020) Отчет о деятельности института за 2019 год. М.: Исследования по геоинформатике, т. 8, №1 (BS8001), <https://doi.org/10.2205/2020BS054>

М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 2020, 203 с., 79 ил., 9 таб.

ISSN 2308-5983

© ГЦ РАН, 2020

Содержание

Содержание	5
1. Научная деятельность ГЦ РАН	7
2. Разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения геоэкологических угроз от объектов использования атомной энергии	19
3. Развитие математических методов интеллектуального анализа данных геофизического мониторинга и расширение сети высокоточных наблюдений магнитного поля для изучения электромагнитных параметров Земли и околоземного пространства.....	30
4. Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных ...	41
5. Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений	58
6. Методы дискретной математики в задачах цифрового анализа геофизических данных на суперкомпьютере. Повышение точности прогноза состояния полярной ионосферы на основе численных моделей с применением методов ассимиляции данных.....	70
7. Разработка аналитической геоинформационной системы для формирования базы данных и цифровых карт для исследования месторождений стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации	76
8. Разноранговый системный анализ месторождений углеводородов в рамках ГИС-проекта “ROSA”	84
9. Разработка методов системного анализа и геоинформатики для интеллектуального анализа геофизических данных на основе современных ГИС-технологий.....	91
10. Изучение современных геодинамических процессов в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на основе системного анализа данных наблюдений спутниковыми системами GSP/ГЛОНАСС	99
11. Разработка методов геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктике	107
12. Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы.....	115

13. Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа.....	126
14. Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации.....	138
15. Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»	147
16. Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса	155
17. Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса	163
18. Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий.....	170
19. Международная деятельность ГЦ РАН.....	178
20. Деятельность Национального геофизического комитета РАН	183
Список научных публикаций за 2019 г.	192
Данные о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД) Геофизического центра РАН.....	201

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 2019 г. была сосредоточена на выполнении государственного задания № 075-00748-19-01, утвержденного 27 декабря 2018 г. с дополнениями от 01 октября 2019 г.

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

Раздел IX. «Науки о Земле»:

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

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

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

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

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

Системный №	0145-2019-0003
-------------	----------------

РН НИОКТР № АААА-А19-119032090070-4
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований
Руководитель: чл.-корр. РАН Соловьев А. А.

3. Тема НИР: «Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных»

Системный № 0145-2019-0004
РН НИОКТР № АААА-А19-119032090068-1
Структурное подразделение: Лаборатория геофизических данных; Лаборатория электронных публикаций; Лаборатория инновационных проектов
Руководитель: к.ф.-м.н. Дзедзоев Б. А.

4. Тема НИР: «Создание теоретических и экспериментальных основ системного анализа для интеграции и изучения данных комплексных геофизических и геодезических наблюдений»

Системный № 0124-2019-0006
РН НИОКТР № АААА-А19-119101590122-8
Структурное подразделение: Лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований; Лаборатория геодинамики
Руководитель: к.ф.-м.н. Сидоров Р. В.

Государственное задание в 2019 г. также включало в себя исследования по 6 проектам Программ фундаментальных исследований Президиума РАН:

ППРАН № 2: «Механизмы обеспечения отказоустойчивости современных высокопроизводительных и высоконадежных вычислений». Координатор: академик Стемпковский А. Л.

1. Проект: «Методы дискретной математики в задачах цифрового анализа геофизических данных на суперкомпьютере. Повышение точности прогноза состояния полярной ионосферы на основе численных моделей с применением методов ассимиляции данных»

РН НИОКТР № АААА-А19-119093090075-0
Руководитель: академик Гвишиани А. Д.

ППРАН № 8: «Минеральные ресурсы для высокотехнологичной промышленности и энергетики». Координатор: академик Бортников Н. С.

2. Проект: «Разработка аналитической геоинформационной системы для формирования базы данных и цифровых карт для исследования месторождений стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации»

РК НИОКТР № АААА-А19-119093090072-9

Руководитель: академик Гвишиани А. Д.

3. Проект: «Разноранговый системный анализ месторождений углеводородов в рамках ГИС-проекта “ROSA”»

РК НИОКТР № АААА-А19-119100190165-2

Руководитель: академик Гвишиани А. Д.

4. Проект: «Разработка методов системного анализа и геоинформатики для интеллектуального анализа геофизических данных на основе современных ГИС-технологий»

РК НИОКТР № АААА-А19-119093090073-6

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

5. Проект: «Изучение современных геодинамических процессов в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на основе системного анализа данных наблюдений спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС»

РК НИОКТР № АААА-А19-119093090070-5

Руководитель: д.т.н. Татаринов В. Н.

ППРАН № 22: «Перспективные физико-химические технологии специального назначения». Координатор: академик Михайлов Ю. М.

6. Проект: «Разработка методов геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктике»

РК НИОКТР № АААА-А19-119093090076-7

Руководитель: академик Гвишиани А. Д.

1.2. Проекты научных фондов

В 2019 г. в ГЦ РАН выполнялись работы по **2** грантам РФФИ и **4** грантам РНФ:

1. Грант РФФИ № 17-05-01085: «Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса»
РН НИОКТР № АААА-А17-117040510185-1
Руководитель: к.г.-м.н. Рыбкина А. И.
2. Грант РФФИ № 18-55-05006: «Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий»
РН НИОКТР № АААА-А18-118030290123-2
Руководитель: чл.-корр. РАН Соловьев А. А.
3. Грант РНФ № 16-17-00121-П: «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»
РН НИОКТР № АААА-А16-116030110009-6
Руководитель: д.ф.-м.н. Пилипенко В. А.
4. Грант РНФ № 17-17-01215: «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа»
РН НИОКТР № АААА-А18-118021990128-8
Руководитель: чл.-корр. РАН Соловьев А. А.
5. Грант РНФ № 17-77-20034: «Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации»
РН НИОКТР № АААА-А18-118021990123-3
Руководитель: к.ф.-м.н. Красноперов Р. И.
6. Грант РНФ № 18-17-00241: «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»
РН НИОКТР № АААА-А18-118091090066-5
Руководитель: академик Гвишиани А. Д.

7. 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. Рыбкина А. И.

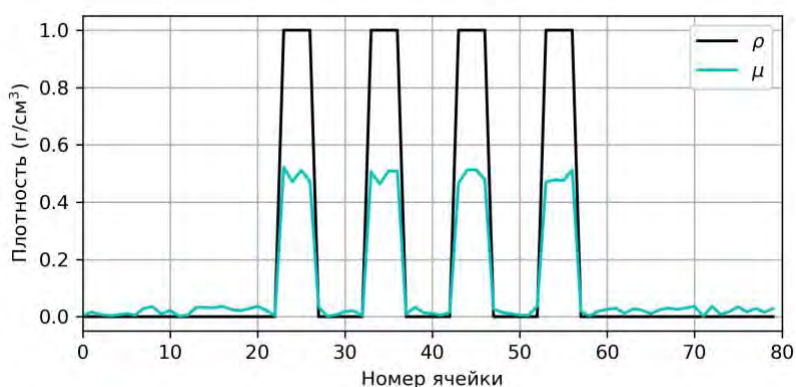
1.3. Важнейшие результаты фундаментальных научных исследований

Проекционный метод решения систем линейных уравнений и его применение в гравиметрии

Чл.-корр. РАН Соловьев А. А., д.ф.-м.н. Агаян С. М.; к.ф.-м.н. Богоутдинов Ш. Р.; д.ф.-м.н. Булычев А. А. (МГУ им. М. В. Ломоносова); Фирсов И. А.

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

Получено конструктивное описание многообразия решений $\Phi(A; b)$ линейной системы $Ax = b$ в n -мерном евклидовом пространстве E , которое позволяет учесть априорную информацию о свойствах истинного решения x^H путем его поиска на многообразии $\Phi(A; b)$. Это обстоятельство имеет фундаментальное значение в проблеме комплексирования геоданных при решении обратных задач. На сегодняшний день результаты такого комплексирования являются, как правило, квазирешениями. Считая их априорной информацией, проекционный метод позволит перейти от квазирешений к точным решениям. На рис. 1.1, 1.2 приведено сравнение результатов восстановления распределения масс методом регуляризации Тихонова и проекционным методом.



**Рисунок 1.1 — ρ — исходное распределение масс;
 μ — априорная информация о распределении масс.**

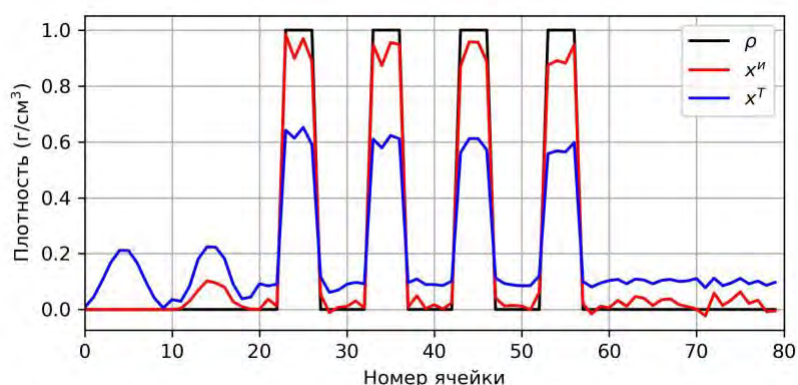


Рисунок 1.2 — ρ — исходное распределение масс; x^T — результат восстановления распределения масс по μ методом Тихонова; x^H — результат восстановления распределения масс по μ проекционным методом.

Агаян С. М.; Богоутдинов Ш. Р.; Булычев А. А.; Соловьев А. А.; Фирсов И. А. (2020)
Проекционный метод решения систем линейных уравнений и его применение в гравиметрии. *ДАН* (в печати)

Создание стохастической модели сейсмичности с экспоненциальным распределением продуктивности землетрясений

Академик Гвишиани А. Д., чл.-корр. РАН Шебалин П. Н.

(Проект ППРАН № 2: «Методы дискретной математики в задачах цифрового анализа геофизических данных на суперкомпьютере. Повышение точности прогноза состояния полярной ионосферы на основе численных моделей с применением методов ассимиляции данных»)

Наиболее популярная в настоящий момент стохастическая модель сейсмичности ETAS существенно завышает количество событий в афтершоковых последовательностях, поэтому требуется построение альтернативной стохастической модели сейсмичности.

На основе изучения иерархической структуры афтершоковых последовательностей трех крупнейших землетрясений последнего десятилетия показано, что количество событий потомков на одно родительское событие, подсчитанное в фиксированной полосе магнитуд относительно родительского события, подчиняется экспоненциальному распределению с модой в нуле.

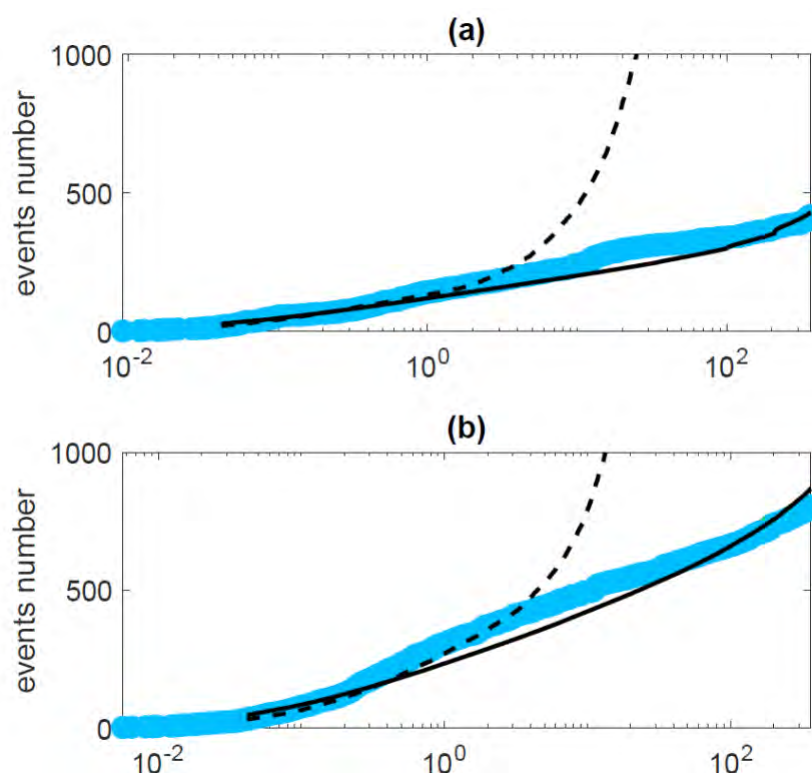


Рисунок 1.3 — Кумулятивное количество сейсмических событий для двух афтершоковых последовательностей, реальное (синие круги) и предсказанное по моделям ETAS (пунктир) и EP (сплошная).

Baranov S. V., Gvishiani A. D., Narteau C., Shebalin P. N. (2019) Epidemic type stochastic model of seismicity with exponential distribution of the earthquake productivity. *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 19, ES6003, doi: 10.2205/2019ES000695

Тонкая структура геомагнитных возмущений и геоиндуцированные токи в энергетических сетях

Д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев, д.ф.-м.н. О. В. Козырева

(Грант РФФИ № 16-17-00121: «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»)

Геоиндуцированные токи (ГИТ) представляют собой серьезную проблему для стабильной работы энергетических систем. Космическая погода активизирует глобальные электромагнитные и плазменные процессы в околоземной среде. Однако при более детальном анализе тонкой структуры геомагнитных возмущений обнаружено, что генерация интенсивных ГИТ в значительной степени связана не с глобальными магнитными бурями, а с локальными быстрыми вариациями геомагнитного поля

сравнительно небольшой амплитуды. Данные системы регистрации ГИТ в линиях электропередач (ЛЭП) Кольского полуострова и магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик variability геомагнитного поля. Выделены несколько типов быстрых процессов и рассмотрено их влияние на ГИТ в трансформаторных подстанциях ЛЭП: межпланетные ударные волны, конвективные ионосферные вихри (TCV), начала суббурь; изолированные магнитные импульсы (MIE), и иррегулярные пульсации Ps6. Для детального изучения широтной структуры variability геомагнитного поля dB/dt и ее связи с границами аврорального овала была разработана техника «магнитных кеограмм». Этот метод позволяет визуализировать тонкую структуру геомагнитных возмущений, а именно время и широту усиления dB/dt . Среди различных типов импульсных геомагнитных возмущений наиболее эффективными для возбуждения ГИТ оказались начала авроральных суббурь (амплитуды ГИТ порядка нескольких десятков ампер) и пульсации Ps6 (ГИТ порядка 20 А). Таким образом, интенсивные локализованные геомагнитные возмущения на временных масштабах ~5-10 мин являются фактическими источниками всплесков ГИТ, и их можно качественно представить себе как геомагнитные «молнии» во время магнитосферных «грозы». Физические механизмы быстрых локальных возмущений изучены явно недостаточно и требуют дальнейших исследований.

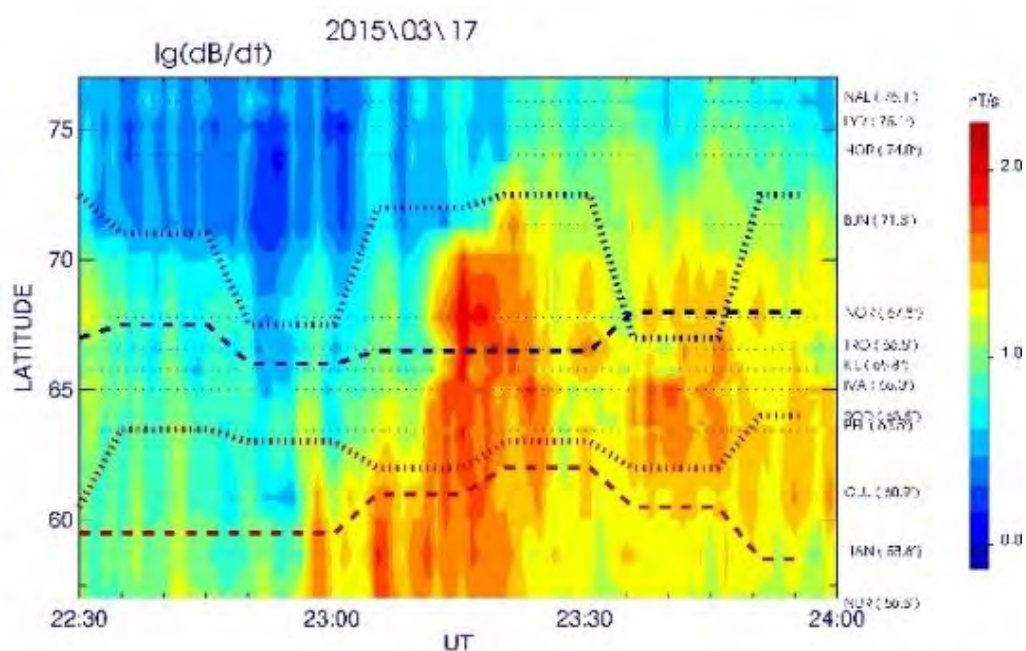


Рисунок 1.4 — Пример «магнитной кеограммы», построенной по данным профиля магнитных станций вдоль геомагнитной долготы 110 град. Границы высыпаний авроральных частиц построена с помощью модели OVATION-prime.

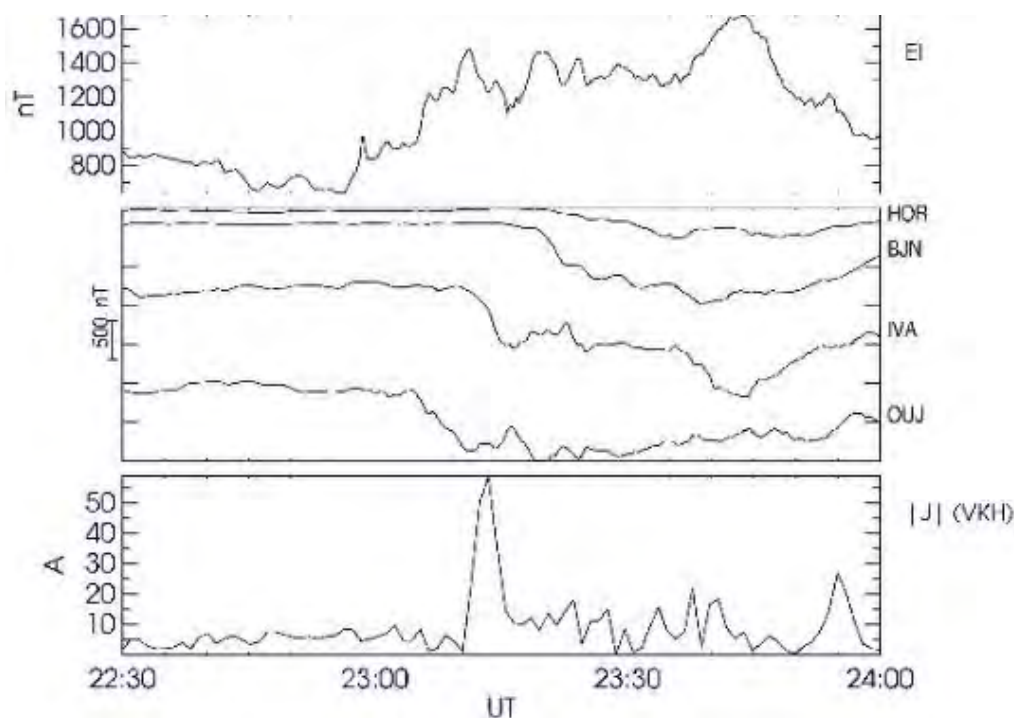


Рисунок 1.5 — Всплеск амплитуды ГИТ ~60 А зарегистрирован на подстанции ЛЭП в тот момент, когда «эпицентр» вариабельности dB/dt при своем движении к высоким широтам проходил над подстанцией.

Belakhovsky V. B., Pilipenko V.A., Engebretson M. J., Sakharov Ya.A., Selivanov V. N. (2019) Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines, *Journal of Space Weather and Space Climate*, Vol. 9, A18, doi: 10.1051/swsc/2019015

Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., Baddeley L., Sakharov Ya., Dobrovolsky M. (2019) Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents, *Annals of Geophysics*, Vol. 62, doi: 10.4401/ag-8198

1.4. Программа развития ГЦ РАН на 2019—2023 гг.

В 2019 г. была сформирована и утверждена Министерством науки и высшего образования РФ Программа развития ГЦ РАН на 2019—2023 гг. Программа охватывает все основные аспекты деятельности ГЦ РАН:

- Научно-исследовательская программа
 - планы исследований в рамках государственного задания и грантов (РФФИ, РФ)
 - планы в рамках ФЦП (ФЦП Роскосмоса «ГЛОНАСС»; ФЦП Росатома «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности»)
- Развитие нового научного направления: теоретический и прикладной системный анализ для оценки и снижения рисков природного и техногенного характера

- Развитие научно-исследовательской инфраструктуры
 - расширение сети магнитных обсерваторий в Арктической зоне РФ
 - развитие геомагнитных обсерваторий на территории РФ и в ближнем зарубежье
 - комплексирование пунктов геофизических наблюдений
 - создание полного магнитометрического комплекта стандарта ИНТЕРМАГНЕТ отечественного производства
- Создание нового структурного подразделения: Лаборатория системного анализа Арктики
- Обновление материально-технической базы организации
- Популяризация научной деятельности
- Развитие кадрового потенциала
- Развитие научного сотрудничества
- Система управления организацией
- Финансовое обеспечение программы
- Вклад в реализацию приоритетных направлений научно-технологического развития РФ и нацпроекта «Наука»

1.5. Защита диссертаций

24 апреля в Институте прикладной математики и компьютерных наук Томского государственного университета состоялась защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН Д. В. Кудина на тему *«Повышение быстродействия логических схем за счет выявления ложных путей и синтеза схем, в которых задержки каждого пути обнаружимы»*.

Работа была выполнена совместно в ГЦ РАН и Горно-Алтайском государственном университете под руководством профессора д.т.н. А. Ю. Матросовой. Диссертационный совет принял единогласное решение о присуждении Д. В. Кудину степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации (в отраслях информатики, вычислительной техники и автоматизации).

18 декабря на научном семинаре ГЦ РАН состоялся доклад (по материалам докторской диссертации) в.н.с., заведующего лабораторией геофизических данных, к.ф.-м.н. Б. А. Дзедоева. Тема доклада: «Системный анализ и дискретный математический анализ в проблеме распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений».

25 декабря на научном семинаре ГЦ РАН состоялся доклад (по материалам кандидатской диссертации) н.с. Ю. И. Николовой. Тема доклада: «ГИС-технологии в задаче многофакторной оценки сейсмической опасности»

26 сентября в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) состоялась защита диссертации на соискание степени кандидата технических наук, выполненной под руководством г.н.с., д.т.н. В. И. Кафтана. Диссертант: А. Ю. Мельников, тема: «Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений».

1.6. Договорная деятельность

- Договор на выполнение НИР

Предмет: Изучение геодинамического режима района расположения подземной исследовательской лаборатории для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО.

Заказчик: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН

- Договор на выполнение ОКР

Предмет: Разработка АПК со сферическим демонстрационным экраном для визуализации геопространственных данных.

Заказчик: Благотворительный фонд «Суворов»

- Договор на выполнение НИР

Предмет: Определение координат пункта наблюдений, азимута ориентира и магнитного склонения на пункте наблюдений.

Заказчик: Вологодский оптико-механический завод холдинга «Швабе» ГК «Ростех»

1.7. Экспедиции и полевые работы

В 2019 г. сотрудники ГЦ РАН приняли участие в целом ряде экспедиций и выезжали на научные полевые работы. Среди прочих следует выделить:

- Магнитная обсерватория «Михнево», Московская область (апрель, июль, август, ноябрь) (А. А. Груднев, Д. В. Кудин, М. В. Нисилевич, А. А. Ощенко, Р. В. Сидоров)
Проведение полевых исследований для определения мест строительства павильонов перспективной магнитной обсерватории. Установка и наладка магнитометрического оборудования.

- Магнитная обсерватория «Плещеницы», Белоруссия (май) (А. А. Соловьёв, Б. А. Дзебоев) Ознакомление с работой обсерватории, рекогносцировка её территории и обсуждение направлений её развития.
- Магнитная обсерватория «Гюлагарак», Армения (июнь, ноябрь) (А. А. Соловьёв, Р. И. Красноперов) Установка и наладка магнитометрического оборудования и передачи данных в ГЦ РАН. Обучение персонала проведению магнитных наблюдений.
- Полигон ВОМЗ, Вологда (июнь) (Р. И. Красноперов, М. В. Нисилевич, А. Н. Образцов, Р. В. Сидоров) Определение координат пункта наблюдений, азимута ориентира и магнитного склонения на пункте наблюдений.
- Железнодорожск, Красноярский край (июнь–июль) (Б. А. Дзебоев, И. В. Лосев, А. И. Маневич) Экспедиция на железнодорожский геодинимический полигон для проведения геодезических и геодинимических изысканий.
- Магнитная обсерватория «Климовская», Архангельская обл. (июль, октябрь) (Е. В. Вавилин, А. А. Груднев, Р. И. Красноперов, Д. В. Кудин, А. И. Маневич, А. А. Соловьёв) Проведение полевых и технических работ. Установка ГНСС-пункта.
- Керченский п-ов, Крым (август) (С. М. Меркулов, А. А. Одинцова, О. В. Пилипенко, Ю. В. Ростовцева, Е. В. Филина) Геологическая экспедиция по исследованию процессов осадконакопления Восточного и Центрального Паратетиса.

1.8. Популяризация науки

В 2019 г. ГЦ РАН вел активную работу в сфере популяризации и широкого распространения научного знания.

11 октября Геофизический центр РАН стал одной из площадок мероприятия «Дни без турникетов», организованного Российским научным фондом в рамках Всероссийского Фестиваля науки 2019 НАУКА 0+. Сотрудники ГЦ РАН выступили с научно-популярными докладами: «Глубинное строение и литосфера Земли» (А. А. Одинцова), «Солнечная система» (О. О. Самохина) и «Магнитное поле Земли» (Р. И. Красноперов)

19 октября в рамках Всероссийского Фестиваля науки 2019 НАУКА 0+ ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН д.ф.-м.н. С. А. Лебедев выступил в Майкопском государственном технологическом университете с научно-популярной лекцией «Дистанционное зондирование Земли — взгляд из космоса».

Научный руководитель ГЦ РАН академик А. Д. Гвишиани выступил с приглашенными пленарными докладами на нескольких российских и международных мероприятиях. В частности, на Международном Косыгинском форуме.

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

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2019-0001

Номер госрегистрации: АААА-А19-119032090069-8

Руководитель: д.т.н. В. Н. Татарinov

Ответственные исполнители: д.т.н. В. Н. Морозов, д.т.н. В. И. Кафтан, д.ф.-и.н.

И. Ю. Колесников, н.с. А. И. Маневич

В связи с развитием наземной инфраструктуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) начал интенсивно применяться новый метод определения координат с опорой только на созвездие спутников. Метод именуется *Point Precise Positioning* и не имеет официальных русскоязычных названия и аббревиатуры, поэтому он в общем отечественном обиходе именуется как метод *PPP*. Метод разработан компанией NovAtel (Канада) в 2005 г. как альтернативный метод корректировки координат в системе WGS-84. Метод не требует от исполнителя наличия базовой станции (опорного приемника) и/или сигнала со спутников систем дифференциальной коррекции. Он основан на вычислении пространственных координат с применением спутниковой корректирующей информации, содержащей поправки к эфемеридам и времени бортовых часов навигационных спутников. Метод PPP отличается от относительного метода спутниковых определений тем, что поправки вносятся в параметры орбит и часов, а не в измерения фаз несущих радиосигналов спутников ГНСС.

Преимущества метода заключаются в следующем:

- доступен при работе одним ГНСС-приемником, без базовых станций в непосредственной близости от пользователя;
- обеспечивает большую согласованность позиционирования, чем относительные методы коррекции с использованием базовой станции;
- уменьшает стоимость и упрощает оперативную логистику полевых работ.

Известно, что наиболее высокой точностью определения взаимных положений средствами ГНСС отличаются разностные методы. Они обладают свойствами компенсации односторонне действующих ошибок, таких, как ошибки часов, ионосферные и тропосферные влияния. Метод PPP имеет наиболее высокую точность при определенных условиях. Для получения средних квадратических ошибок порядка сантиметров необходимо в обработке использовать точные эфемериды спутников ГНСС, точные поправки часов, точные модели ионосферы и тропосферы, параметры антенн спутника и

приемника. При вычислении корректирующих поправок не происходит их взаимной компенсации и их ошибочность суммируется в итоговых значениях координат точки. Процесс обработки является итерационным, рекурсивным, что дает возможность повышать уровень точности *за счет увеличения последовательных эпох регистрации спутникового радиосигнала*. Сегодня реализуются возможности определения координат методом PPP в реальном времени, например, для точной навигации. В этом случае перед началом движения необходимо провести накопление измерений на начальном пункте в течение нескольких часов. При этом используются распространяемые по Интернет сверхбыстрые эфемериды спутников и другие продукты Международной службы ГНСС (International GNSS Service).

Для получения надежных значений координат требуется получение сходимости итерационного процесса. Задача решается путем сравнения координат PPP с пространственными векторами базовых линий, полученными по методу фазовых разностей на двух соседних пунктах наблюдений. Для этой цели была сформирована специальная локальная сеть, расположенная в сейсмоактивном районе (рис. 2.1).

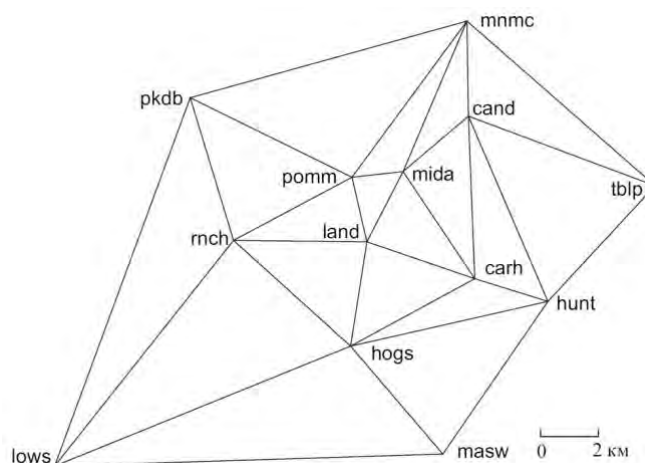


Рисунок 2.1 – Схема ГНСС-сети в районе Паркфилд (США)

Определения координат пунктов на указанные даты методом PPP были осуществлены исследовательской группой Геодетической лабораторией Невады (Nevada Geodetic Laboratory) [<http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/RapidStationList>] с использованием программного обеспечения (ПО) GIPSY/OASIS-II Ver. 6.1.1. Значения геоцентрических координат пунктов (X^P , Y^P , Z^P) и их средние квадратические ошибки (СКО) по результатам повторяемости в системе IGS08 на каждую эпоху наблюдений были получены из архива временных рядов координат пунктов данной сети на заданный период времени с 01 января 2002 г (DOY 001 2002) по 27 декабря 2006 г (DOY 361 2006), с интервалом 5 суток.

При анализе точности для каждой базовой линии сети были использованы по 364 приращения координат, полученных по вторым разностям фаз двухчастотных измерений и их аналоги – 364 вычисленных разности координат PPP определений Геодезической лаборатории Невады. Полный объем выборки составил 10920 разностей дважды определенных приращений координат. Разности были преобразованы в единую для всей сети локальную топоцентрическую систему координат с началом в центре сети.

Оценка точности осуществлялась с учетом весов, полученных по априорным СКО трех измерений (две координаты, полученные методом PPP, и приращение, полученное относительным методом). Вычислялись веса измерений, входящих в состав разности $P_i = 1/m_i^2$. Ошибки единицы веса $\mu = ([P_{\Delta\Delta^2}]/3n)^{1/2}$. Апостериорные СКО каждого i -го измерения $m_i = \mu/P_i^{1/2}$. Такие оценки делались для каждой базовой линии, и в итоге получали их обобщенные оценки для всей выборки (табл. 2.1).

Таблица 2.1. – Сопоставление оценок точности PPP и относительных определений

СКО	Координаты PPP, мм		Разности координат PPP, мм		Приращения координат относит. метод, мм	
	North, East	Up	North, East	Up	North, East	Up
Апостериорные СКО	1.5	1.9	2.3	2.8	4.7	6.0
При ничтожном вкладе относительного метода	1.8	2.3	2.8	3.4	–	–

Результаты оценки точности показывают, что метод PPP позволяет получать высокие точности, близкие к разностному методу. Можно рекомендовать его для использования в геодинамических исследованиях, в том числе на геодинамическом полигоне в пределах Нижнеканского массива, как достаточно высокоточный.

При выборе мест для размещения ОИАЭ необходима оценка геодинамической и сейсмической опасности. Разломная тектоника, тектонические напряжения и сейсмичность района являются определяющими факторами, которые обуславливают устойчивость геологической среды на разных масштабных уровнях. Ранее в 2016–2018 гг. была разработана методология математического моделирования НДС в районах эпицентральных зон неглубоких ($H \sim 10\text{--}20$ км) коровых землетрясений с $M > 6$.

В 2019 г. этапе было продолжено моделирование и анализ полей НДС эпицентральных зон коровых землетрясений, в частности было смоделированы поля напряжений в зоне сильного землетрясения в Иране и проведено сопоставление с результатами моделирования НДС эпицентральной зоны землетрясения в Индии.

22 июня 2002 года на северо-западе Ирана в области *Qazvin* произошло сильное землетрясение с M_w 6.4, которое в литературе получило название «Чангурское землетрясение» или землетрясение Аваж («*Changureh earthquake*» или «*Avaj earthquake*» соответственно). Эпицентр землетрясения расположен в малонаселенном районе между городами Бижар и Аваж («*Bijar*» и «*Avaj*») с координатами 35.572°N, 49.085°E. В результате землетрясения погибло 261 человек, 1500 получили ранения, более 50000 лишились жилья. Интенсивность толчка в эпицентре превышала 8 баллов по шкале Рихтера (рис. 2.2).

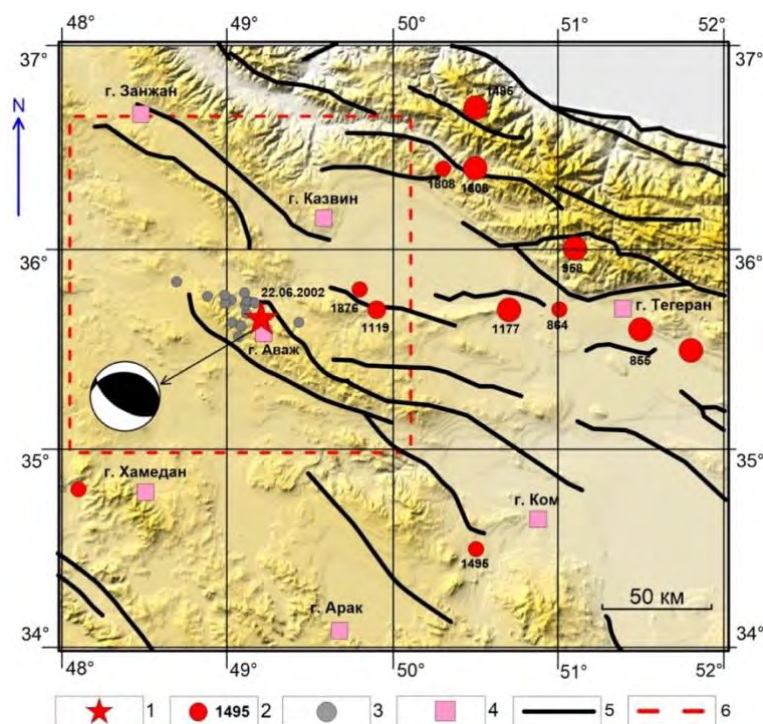


Рисунок 2.2 – Структурно-тектоническая схема исследуемого района, составленная по материалам [18, 21]: 1 – эпицентр землетрясения Аваж 22.06.2002 M 6.4; 2 – эпицентры сильных исторических землетрясений; 3 – эпицентры афтершоков на период 22.06.2002–07.11.2002; 4 – крупные города Ирана; 5 – тектонические разломы; 6 – область моделирования НДС

В результате моделирования были получены карты распределения напряжений σ_i , σ_{yy} , τ_{xy} , σ_{yy}/σ_{xx} и $\Delta\sigma_i$ в эпицентральной зоне площадью $\sim 10^4$ км² (рис. 2.3–2.5), которые являются предметом дальнейшего анализа.

На рис. 2.3 представлена карта интенсивности напряжений до землетрясения. Можно видеть, что в центральной части района, в окончаниях тектонических разломов выделяются три аномальные зоны относительно высоких значений интенсивности напряжений. Этим же зонам соответствуют и максимальные напряжения сжатия σ_{yy} (рис. 2.4), т.е. доминирующие напряжения сжатия, вносят основной вклад в концентрацию упругой энергии в локальных зонах, вызванной внешнем полем тектонических напряжений.

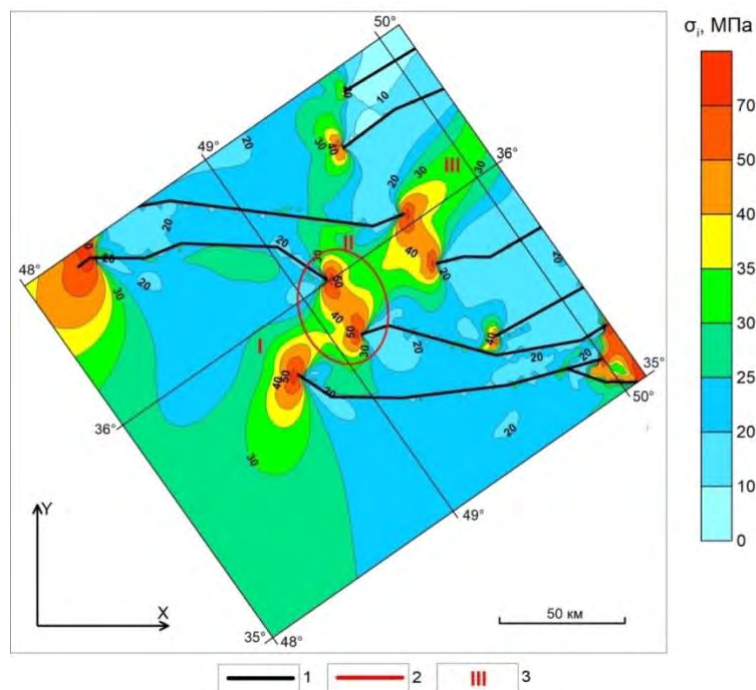


Рисунок 2.3 – Карта интенсивности напряжений σ_i до землетрясения:
1 – тектонические разломы; 2 – обозначение зон повышенной
интенсивности напряжений

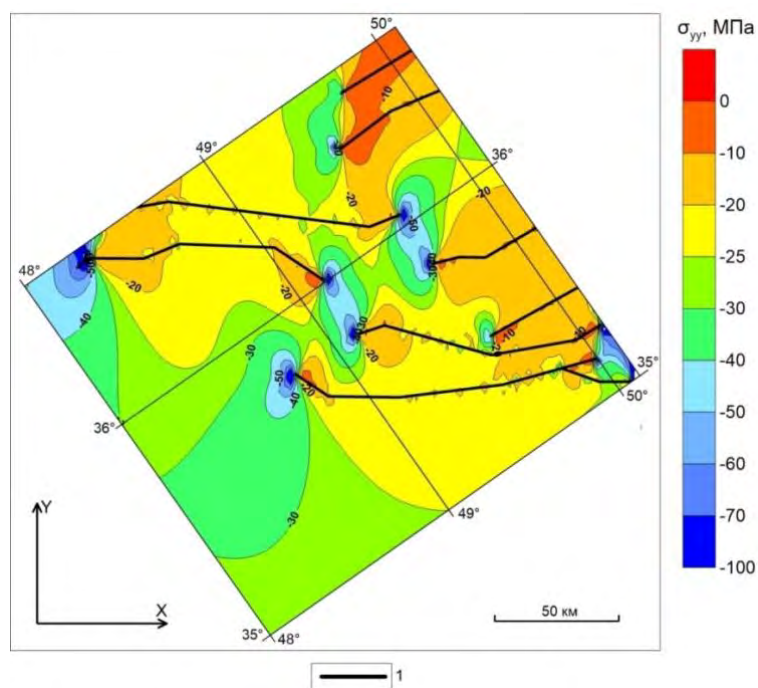


Рисунок 2.4 – Карта напряжений σ_{yy} до землетрясения: 1 – тектонические разломы

На рис. 2.5 представлена роза-диаграмма ориентации условно прямолинейных участков разломов в пределах исследуемой площади.

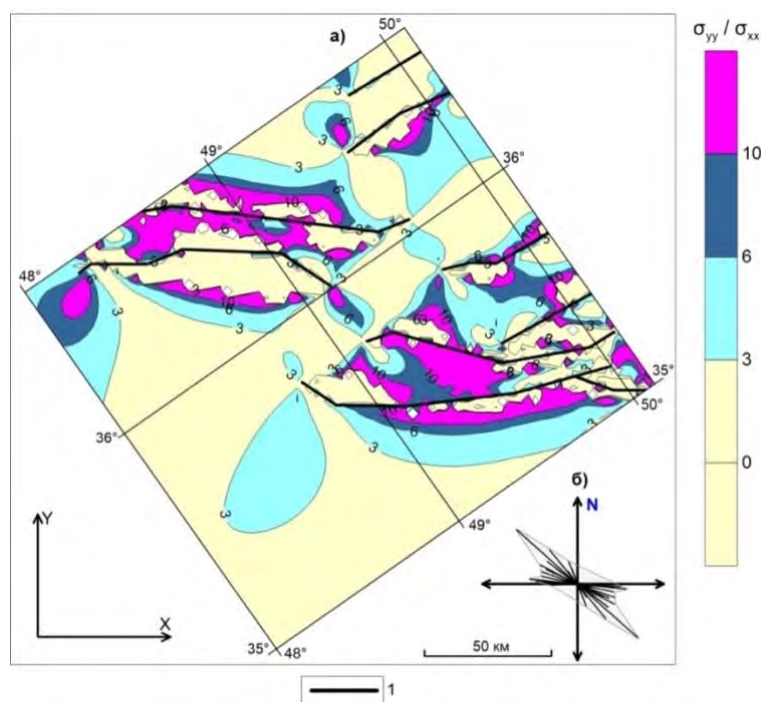


Рисунок 2.5 – Карта отношения главных действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} (а) и роза-диаграмма направлений тектонических разломов (б): 1 – тектонические разломы

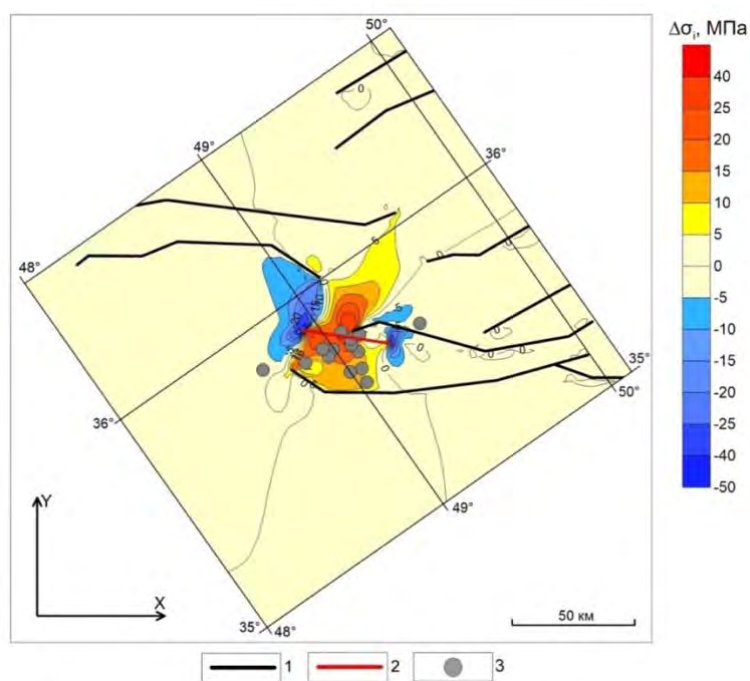


Рисунок 2.6 – Карта разности интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i$ до и после землетрясения: 1 – тектонические разломы; 2 – новый образовавшийся разрыв; 3 – эпицентры сильных афтершоков

На рис. 2.6 приведена карта разности интенсивности напряжений до и после образования предполагаемого разрыва, показанного на рис. 6 сплошной красной линией. Использование метода аналогий, т.е. сопоставления полученных результатов с подобными

ситуациями в других эпицентральных зонах подобных землетрясений в Турции, США, Иране в какой-то мере приводит к решению поставленной задаче, вместе с тем реальные критерии возможного сопоставления примеров отсутствуют.

Полученные результаты представляются, полезным как с позиции понимания развития сейсмотектонического процесса, так и возможного прогноза места и энергии сильных коровых землетрясений. Ограничиваясь этими выводами, практической проверкой полученных результатов моделирования могла бы стать постановка детальных геофизических исследований в аномальных зонах концентрации тектонических напряжений в сейсмических районах.

В 2019 г. были продолжены работы по разработке методики и алгоритмов распознавания образов на основе искусственных нейронных сетей для задач деформационного мониторинга мест размещения ОИАЭ с использованием спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Невозможно выработать деформационные критерии состояния исследуемого района, основываясь только на измерениях в рамках одного полигона. В этой связи, был создан каталог данных деформаций на различных по масштабу геодинамических полигонах мира (рис. 2.7 и табл. 2.2).

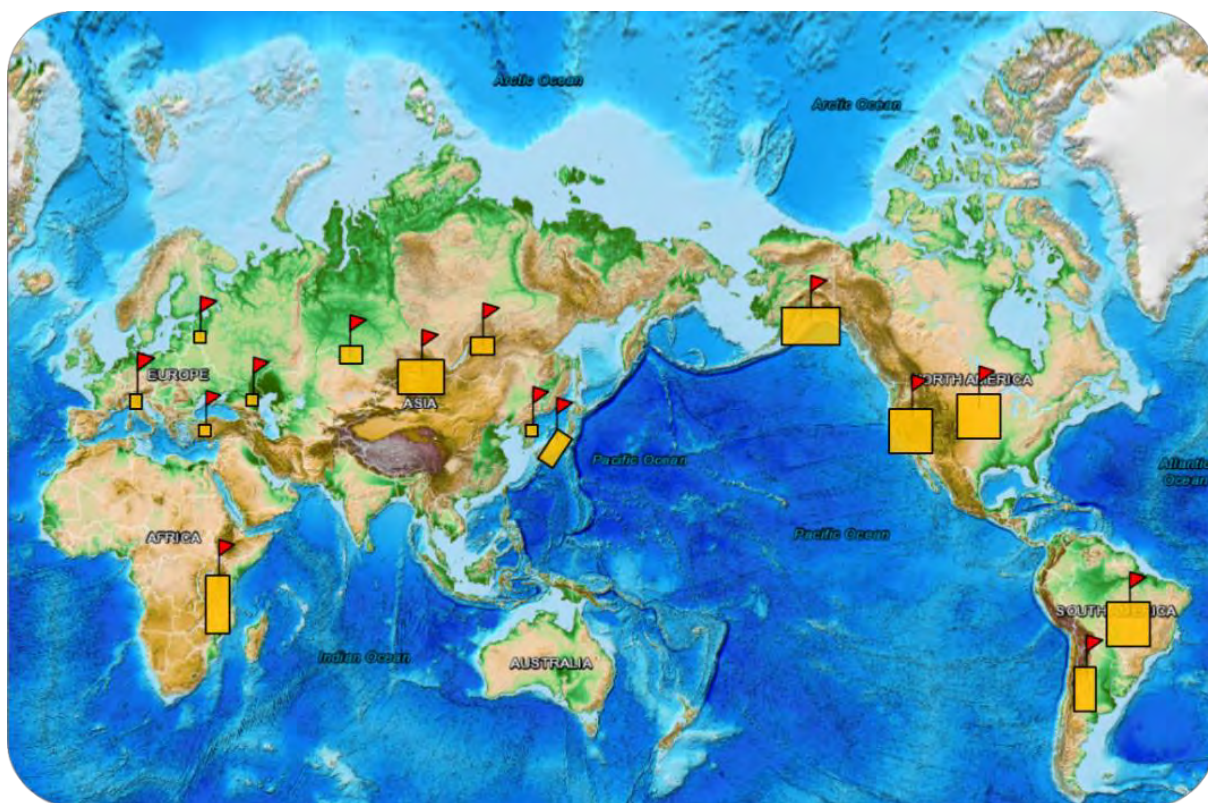


Рисунок 2.7 – Используемые данные геодинамических полигонов

Таблица 2.2 – Список полигонов и ссылок на данные, которые были использованы в анализе

№	Полигон	Ссылка	Степень тектонической активности ¹
1	Тянь-Шань и Памир	[Zubovich <i>at al.</i> , 2010]	Умеренно-активный
2	Southern California Network	[Murray and Svarc, 2017]	Активный
3	Нижнеканский массив	[Тамаринов <i>и др.</i> , 2018]	Слабоактивный
4	CentralUS Network	[Murray and Svarc, 2017]	Слабоактивный
5	Байкало-Монгольская зона	[Лухнев <i>и др.</i> , 2010]	Умеренно-активный
6	Приладожье, юго-восток Балтийского щита (Карелия)	[Агибалов <i>и др.</i> , 2017]	Слабоактивный
7	East African Rift System (Nubia)	[Déprez <i>at al.</i> , 2013]	Умеренно-активный
8	Southern part of the Korean Peninsula (Южная Корея)	[Shuanggen <i>at al.</i> , 2006]	Умеренно-активный
9	Осетинская часть Большого Кавказа	[Милюков <i>и др.</i> , 2015]	Умеренно-активный
10	Турция (анатолийский разлом)	[Tiryakioğlu <i>at al.</i> , 2018]	Умеренно-активный
11	Alaska Network	[Murray and Svarc, 2017]	Активный
12	Бразилия, Анды	[Drewes and Sánchez, 2017]	Активный
13	Бразилия, Платформа	[Drewes and Sánchez, 2017]	Слабоактивный

Кратко, суть методики обработки сводится к следующему:

- Расчет скорости относительного изменения дистанции между пунктами измерения;
- Распределение данных на выборки по степени тектонической активности (Активные, умеренно-активные, слабоактивные);
- Расчет разделяющей границы скоростей деформации (как среднее значение скорости деформации ϵ' по окну в $k = 20$ значений), рис. 2.8;
- Разделение деформаций внутри своей группы на значения выше и ниже разделяющей границы (повышенные и пониженные), рис. 2.9;
- Вычисление обобщенных регрессионных уравнений для повышенных, пониженных и средних значений скоростей деформации.

В результате был получен набор уравнений регрессии, отражающих повышенные, пониженные и осредненные скорости деформаций в тектонически активных, умеренно-активных и слабоактивных районах. На рис. 2.10 приведен график усредненных скоростей деформации между парами пунктов наблюдений (одномерная скорость деформации)

¹ 1 – активные (зоны границ литосферных плит); 2 – умеренно-активные (активные внутриплитные процессы); 3 – слабоактивные (платформенные геоструктуры)

рассчитанный по данным с разнообразных геодинамических полигонов мира (табл. 2.3). На графике отображены отдельно скорости деформаций сжатия и растяжения в зависимости от расстояния между пунктами наблюдений, уравнения регрессионных кривых приведены в табл. 2.3.

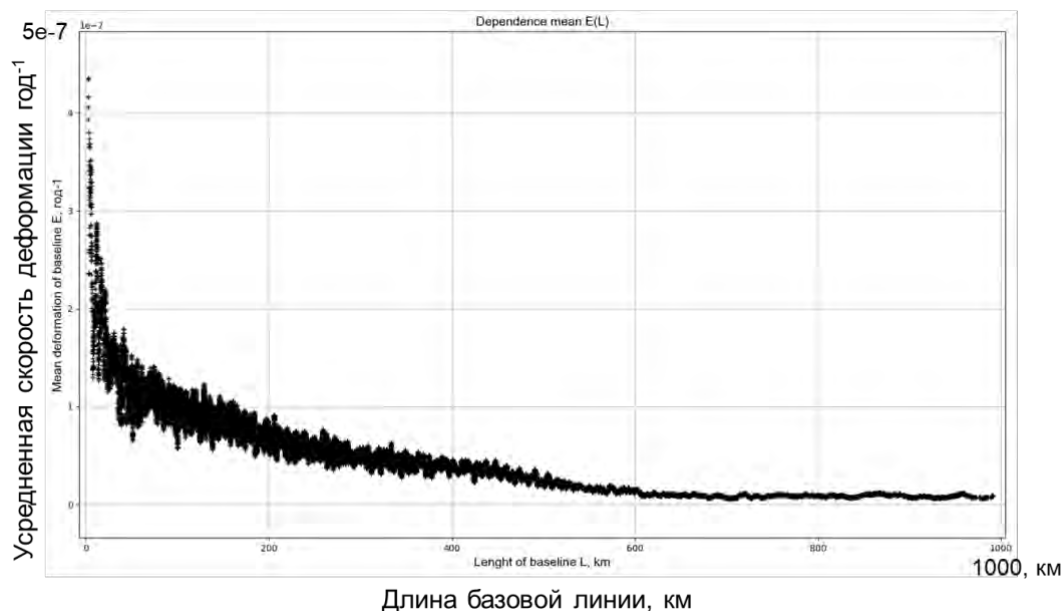


Рисунок 2.8 – Пример расчета разделяющей границы скоростей деформации (как среднее значение скорости деформации ε')

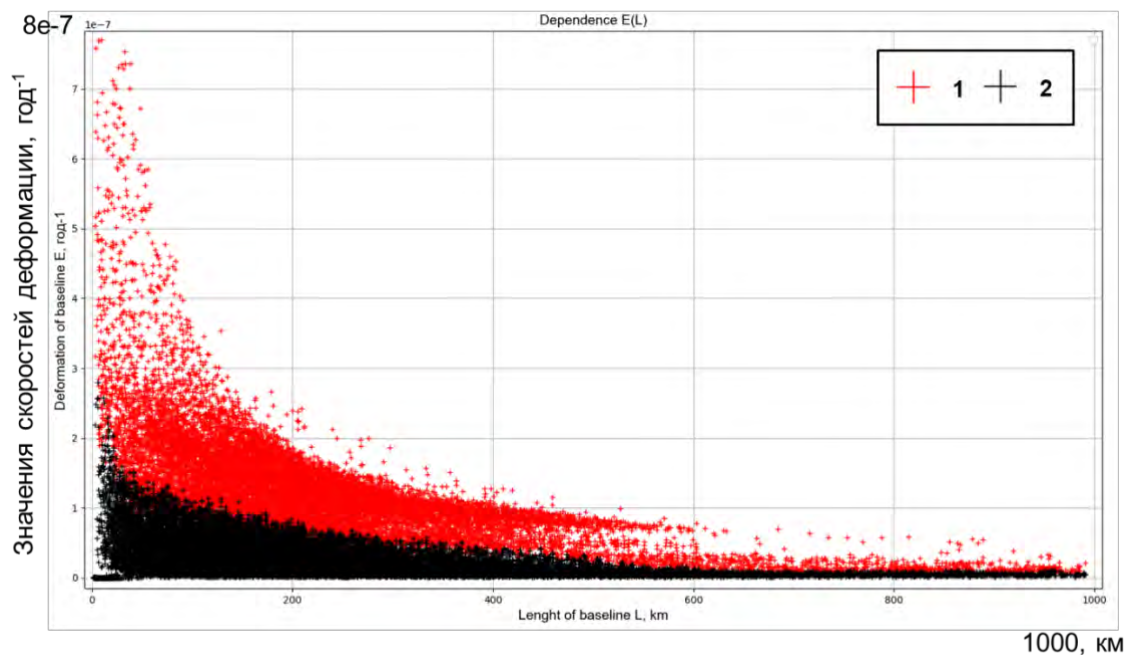


Рисунок 2.9 – Пример разделения скоростей деформации на группы: 1 – выше средней линии; 2 – ниже средней линии

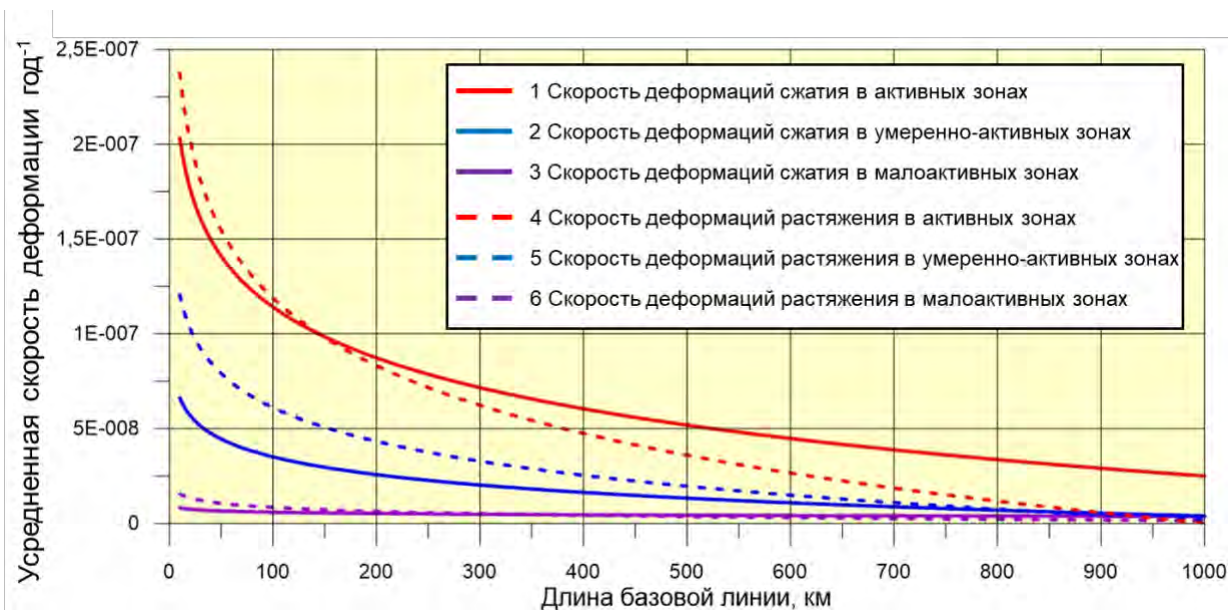


Рисунок 2.10 – График осредненных скоростей деформации: 1 – сжатие в активных районах; 2 – сжатие в умеренно-активных районах; 3 – сжатие в малоактивных районах; 4 – растяжение в активных районах; 5 – растяжение в умеренно-активных районах; 6 – растяжение в малоактивных районах

Таблица 2.3 – Уравнения регрессий осредненных скоростей деформаций

№	Характер геодинамической обстановки района	Уравнение регрессии
1	Сжатие в активных районах	$\varepsilon = -3.872^{-8} \ln(L) + 2.925^{-7}$
2	Сжатие в умеренно-активных районах	$\varepsilon = -1.354^{-8} \ln(L) + 0.975^{-7}$
3	Сжатие в малоактивных районах	$\varepsilon = -9.756^{-10} \ln(L) + 1.043^{-8}$
4	Растяжение в активных районах	$\varepsilon = -5.154^{-8} \ln(L) + 3.563^{-7}$
5	Растяжение в умеренно-активных районах	$\varepsilon = -2.58^{-8} \ln(L) + 1.8^{-7}$
6	Растяжение в малоактивных районах	$\varepsilon = -3.04^{-9} \ln(L) + 2.25^{-8}$

Полученные уравнения могут быть полезны в априорной оценке геодинамического режима тех районов Нижнеканского массива, которые не были охвачены ГНСС-наблюдениями. Определив по обобщенным геологическим условиям района группу тектонической активности района, можно выбрать соответствующее регрессионное уравнение и сопоставить скорости деформаций расчетные и измеренные инструментально на различных длинах базисных линий. Сопоставление покажет – к какому уровню деформаций, характерных для выбранного по степени тектонически активного района относятся измеренные деформации (к повышенным, средним, пониженным значениям).

Список использованных источников

Агибалов А. О., Зайцев В. А., Сенцов А. А., Девяткина А. С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья (юго-восток Балтийского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. с. 791 – 807. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0317.

Лухнев А. В., Саньков В. А., Мирошниченко А. И., Ашурков С. В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 7. с. 1006–1017.

Милюков В. К., Миронов А. П., Стеблов Г. М., Шевченко В. И., Кусраев А. Г., Дробышев В. Н., Хубаев Х. М. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры осетинской части Большого Кавказа по GPS измерениям // Физика Земли. 2015. №4. с. 68-80.

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

Déprez A., Doubre C., Masson F., Ulrich P. Seismic and aseismic deformation along the East African Rift System from a reanalysis of the GPS velocity field of Africa // Geophysical Journal International. 2013. Iss. 193. Vol. 3. p.1353-1369.

Drewes H. and Sánchez L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017 Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut DGFI-TUM, IGS RNAAC SIRGAS

Murray J. R., Svarc J. Global Positioning System data collection, processing, and analysis conducted by the U. S. Geological Survey Earthquake Hazards Program // Seismological Research Letters. 2017. Vol. 88. Iss. 3. DOI:10.1785/0220160204.

Shuanggen J., Li Z., Park P. H. Seismicity and GPS constraints on crustal deformation in the southern part of the Korean Peninsula // Geosciences Journal. 2006. Vol. 10. No. 4. p. 491 – 497.

Tiryakioğlu I., Özkaymak C., Baybura T., Sözbilir H., Uysal M. Comparison of palaeostress analysis, geodetic strain rates and seismic data in the western part of the Sultandağı fault in Turkey // Annals of geophysics. 2018. Vol. 61. No. 3. DOI: 10.4401/ag-7591

Zubovich A. V., Wang X., Scherba Y. G., Schelochkov G. G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O. I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V. I., Li J., Kuzikov S. I., Herring T. A., Hamburger M. W., Hager B. H., Dang Y., Bragin V. D., Beisenbaev R. T., GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. Vol. 29. TC6014. DOI:10.1029/2010TC002772.

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 регистрации: 0145-2019-0003

Номер госрегистрации: АААА-А19-119032090070-4

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

Ответственные исполнители: директор ГЦ РАН чл.-корр. А. А. Соловьев, г.н.с.

д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова, г.н.с. д.ф.-м.н. С. М. Агаян, г.н.с. д.т.н. В. Г. Гетманов, с.н.с.

к.ф.-м.н. Р. В. Сидоров, с.н.с. к.т.н. Д. В. Кудин

3.1. Исследование плотности электронов в полярной ионосфере по модельным данным, измерениям радиолокатора и ионозонда

F-область высокоширотной ионосферы является наиболее сложной и непостоянной, поскольку она связана с внешней магнитосферой, которая взаимодействует с переменным солнечным ветром. Помимо образования ионов при фотоионизации и химических потерях из-за рекомбинации, к дополнительным факторам, определяющим полярную ионосферу, относятся динамика плазмы и спорадические высыпания энергетических частиц из магнитосферы, происходящие в основном в пределах аврорального овала. Процессы переноса играют важную роль в высоких широтах. На распределение плазмы в полярной F-области влияет электрическое поле конвекции, которое налагается на ионосферную оболочку из магнитосферы и вместе с электрическим полем коротации приводит к дрейфу плазменных трубок вдоль линий одинакового электростатического потенциала. Сгусток плазмы может сильно искажаться после смещения вдоль конвективных линий тока в течение нескольких часов через освещенную и ночную ионосферу, а также через области повышенной скорости ионизации, вызванной высыпанием. Высокоширотная конвекционная картина контролируется взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой и, таким образом, в первую очередь зависит от ориентации и силы межпланетного магнитного поля (ММП) (напр., [Lukianova, Christiansen, 2006]). Состав и температура термосферного нейтрального газа также влияют на параметры ионосферы. Под общим действием этих процессов формируются крупномасштабные неоднородности электронной плотности (Ne), такие как язык ионизации (ЯИ), основная ионосферная

впадина (ОИВ), полярная дыра, полярные и авроральные пики. Несмотря на ряд существующих и недавно развернутых более чувствительных и сложных приборов, полярная ионосфера все еще остается довольно плохо изученной и не полностью смоделированной. Из-за отсутствия достаточного пространственного/временного разрешения космических и наземных измерений глобальные эмпирические ионосферные модели, основанные на всех доступных данных ионозондирования и радиозатменных измерений электронной плотности, такие как Международная эталонная ионосфера IRI [Bilitza *et al.*, 2014], точно не отражают высокоширотную изменчивость и в наименьшей степени воспроизводят особенности полярной шапки [Themens *et al.*, 2014, 2017]. С другой стороны, в численных моделях полярной F-области, которые основаны на теории, ионосферные сигнатуры, связанные с высокоширотной конвекцией плазмы и высыпанием частиц, могут быть идентифицированы более подробно (напр., [Ridley *et al.*, 2006]).

В 2019 г. получены результаты численного моделирования F-области полярной ионосферы во время солнечного минимума и длительного геомагнитного покоя ($K_p < 1$), связанных с низкими значениями межпланетного магнитного поля ($B_T < 5$ нТл). Можно считать, что эти условия создают ионосферное «основное состояние», когда роль магнитосферы в формировании полярной ионосферы минимальна. Нами определены сезонные закономерности распределения ионосферной плазмы для марта, июля 2007 г. и января 2008 года. Эти периоды соответствуют обширным наблюдательным кампаниям, проведенным в течение Международного полярного года (МПГ). Используя доступность большого набора фактических данных, модель валидировалась с привлечением наблюдений радиолокатора EISCAT на Шпицбергене (ESR), который расположен вблизи границы полярной шапки и почти непрерывно работал в течение МПГ (рис. 3.1а). Также результаты моделирования сравниваются с ионозондом Соданкюля SGO, расположенным вблизи экваториальной границы аврорального овала (рис. 3.1б). На основе наблюдаемых и смоделированных ключевых параметров ионосферы, включающих максимум электронной плотности (N_mF2) и высоту этого максимума (H_mF2), нами обнаружена возможная ионосферная сигнатура атмосферного охлаждения, связанного с увеличением парниковых газов.

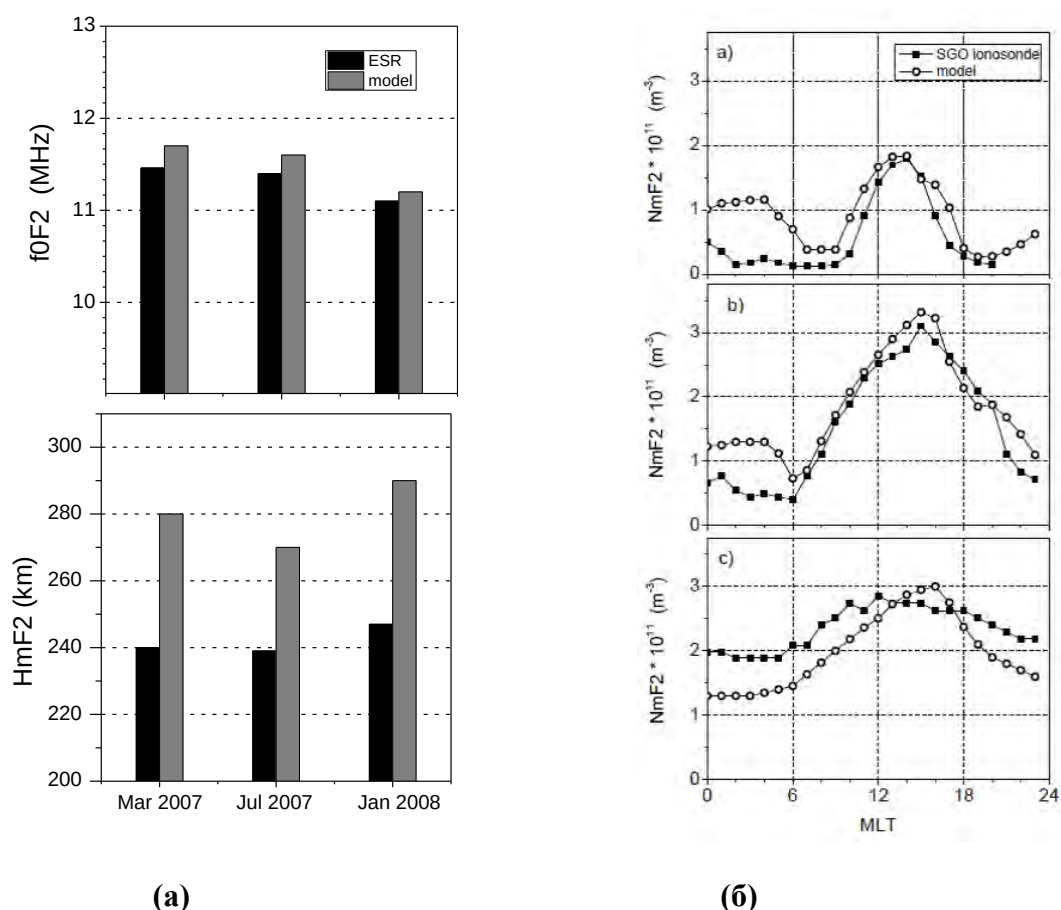


Рисунок 3.1 – Сравнение наблюдаемого радиолокатором ESR и смоделированного $\log(\text{NmF2})$ и HmF2 за март, июль 2007 г. и январь 2008 г. (а); суточное изменение медиан NmF2 , смоделированных и измеренных ионозондом SGO в январе 2008 г., марте и июле 2007 г. (б)

3.2. Расширение базы наблюдений магнитного поля Земли

В 2019 г. велись работы по расширению базы высокоточных наблюдений магнитного поля Земли (МПЗ), проводимых на наземных пунктах геомагнитных наблюдений, обеспечение штатного функционирования и усовершенствование магнитных обсерваторий, поддерживаемых ГЦ РАН, а также расширение базы наблюдений абсолютных значений элементов магнитного поля Земли (МПЗ). В объединенную сеть магнитных обсерваторий РФ и ближнего зарубежья [Гвишиани и др., 2018] была включена магнитная обсерватория «Минск» (Беларусь). Также были проведены мероприятия по улучшению функционирования геомагнитных обсерваторий ГЦ РАН «Санкт-Петербург» и «Климовская» и дальнейшему развитию магнитной обсерватории «Белое море». По состоянию на 9 декабря 2019 г. общий объём поступивших в течение года в ГЦ РАН геомагнитных данных составляет 3,5 Гб. Подробная информация приведена в таблице 3.1. Жёлтым в таблице выделены обсерватории, поступление данных из которых началось в 2019 г.

Таблица 3.1. — Объёмы данных, поступивших в ГЦ РАН за 2019 г.

Код обсерватории	Местоположение	Объём полученных данных, Мб	Примечание
AAA	г. Алма-Ата, Казахстан	275	Переданы данные 2003–2019 г.
AIA	Антарктида	34	
ARS	пос. Арти, Свердловская обл.	30	
BOX	пос. Борок, Ярославская обл.	35	
CPS	пос. Мыс Шмидта, Чукотская АО	30	
GLK	пос. Гюлагарак, Армения	86	
IRT	г. Иркутск	16	
KHB	г. Хабаровск	16	
KIV	г. Киев, Украина	16	
KLI	пос. Коноша, Архангельская обл.	1384	
LVV	г. Львов, Украина	18	
MGD	г. Магадан	26	
MHV	пос. Михнево, Московская обл.	452	
MNK	г. Минск, Беларусь	241.8	Переданы данные 2010–2019 гг., включая 259 ведомостей абс. измерений 2013–2019 гг.
MOS	г. Троицк	0	
NVS	г. Новосибирск	18	
ODE	г. Одесса, Украина	6	
PET	пос. Паратунка, Камчатский край	35	
POD	пос. Бор, Красноярский край	0	
SPG	г. Санкт-Петербург	1252	
WSE	пос. Приморский, Респ. Карелия	26	
YAK	г. Якутск	28	
ИТОГО		3534.8	

Модернизация геомагнитной обсерватории «Климовская» включала установку новой системы терморегуляции в вариационном павильоне, установку метеостанции на стену технического здания, настройку системы сбора данных (Magres-4) для регистрации показаний от метеостанции и системы температурных датчиков и последующую передачу данных в ГЦ РАН, запуск дублирующего векторного магнитометра FGE и установку второй миры. На обсерватории «Санкт-Петербург» были повышены оперативность и аккуратность

процедуры измерения величины разности модуля магнитного поля Земли (F_0) между приборными постаментами в абсолютном павильоне.

В 2019 г. существенно пополнилась база наблюдений абсолютных значений элементов геомагнитного поля за счет прироста обсерваторских абсолютных измерений («Климовская», «Санкт-Петербург», «Минск») и полевых исследований (полигон АО «ВОМЗ», Вологодский оптико-механический завод, г. Вологда).

3.3. Изучение геометрии временных рядов методами ДМА

В настоящее время существует ряд способов определения трендов и экстремумов на стохастических временных рядах [Гумбель, 1965; Лидбеттер и др., 1989; Любушин, 2005; Малла, 2005], что неудивительно, поскольку тренды временного ряда являются фундаментальной характеристикой динамики процесса, стоящего за ним. Стохастические тренды в реальных геофизических данных совсем не похожи на идеальные математические, поскольку в них случаются сбои. Это не смущает эксперта, изначально обладающего адаптивным восприятием фундаментальных свойств предельности, непрерывности, связности, тренда и т.д. Исследователь понимает, когда нарушение несущественно и тренд продолжается, а когда нарушение прерывает тренд. Таким образом, если идеальные математические тренды однозначны и строги, то стохастические зависят от точки зрения эксперта, а для разных исследователей они, вообще говоря, могут различаться. Поэтому формализация стохастических рядов должна быть разномасштабной, подобно вэйвлет-спектру, а потому необходимо многопараметрической. Меняя параметры, исследователь получит полное представление о трендах и выберет нужный. Перечислим параметры такой формализации: локальная конструкция тренда, уровень значимости тренда, уровень нарушения тренда, способ поиска четкого экстремума между противоположными трендами. Их мы трактуем как нечеткие множества, и потому стохастические тренды получаются как результат нечеткого моделирования на базе дискретного математического анализа ДМА [Агаян и др., 2018]. За 2019 г. был исследован один подход к такой формализации стохастических трендов. Он основывается на новой математической конструкции регрессионных производных для конечного временного ряда. Тренды ищутся с помощью производной по сценарию классического математического анализа. Апробация указанных подходов проводилась как на синтетических данных (рис. 3.2), так и на фактических геомагнитных наблюдениях сети ИНТЕРМАГНЕТ. Во втором случае предложенный метод использовался для обнаружения геомагнитных джерков [Brown et al., 2013]. В ходе работы [Агаян и др., 2019] впервые с помощью аппарата регрессионных

производных были определены тренды векового хода за период 1991.0–2015.3 гг. по трем компонентам для пяти выбранных геомагнитных обсерваторий. Анализ полученных результатов показал, что в большинстве случаев смена трендов от возрастающего к убывающему или от убывающего к возрастающему происходят в те же периоды времени, когда были определены джерки классическими методами за указанный период.

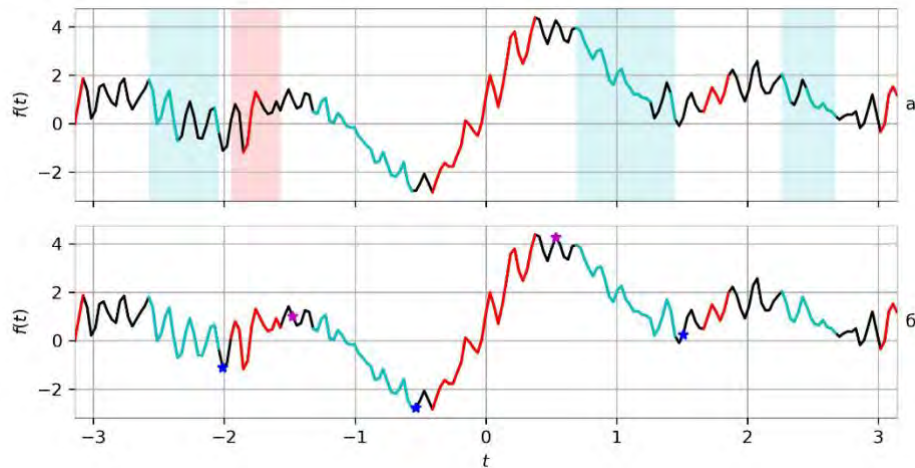


Рисунок 3.2 – Тренды (зеленый и красный цвета) и экстремумы (звездочки) при $\alpha = 2.0$

3.4. Обобщение методов цифровой фильтрации на базе локальных аппроксимационных моделей

За отчетный период было предложено обобщение методов стандартной цифровой фильтрации, которое основано на использовании систем локальных аппроксимационных моделей и обеспечении необходимой гладкости результирующей функции фильтрации путём выполнения в точках стыковки локальных интервалов условий - равенств нулевых, первых и т.д. производных для локальных моделей. Предлагаемый метод фильтрации ориентирован на использование в задачах повышения точности наблюдений векторов геомагнитного поля. Были разработаны методы вычисления аппроксимационных сплайновых функций (АСФ) для задач цифровой фильтрации. Рассмотрены АСФ с базисными полиномами общего вида и базисными дискретными ортогональными полиномами. Вычисления АСФ реализованы на основе решений задач условной оптимизации. Получены рекуррентные формулы для системы нормированных дискретных ортогональных полиномов и их производных. Предложенные АСФ на дискретных ортогональных полиномах позволяют снизить вычислительные затраты и погрешности аппроксимации по сравнению с АСФ на полиномах общего вида. Приведены результаты

статистического моделирования применения АСФ на дискретных ортогональных полиномах для задач цифровой фильтрации. Цифровая фильтрация на основе АСФ может быть альтернативной по отношению к стандартной цифровой фильтрации [Taylor, 2011], основанной на рекуррентных уравнениях. Использование АСФ позволяет обеспечить ряд преимуществ, например, существенно снизить динамические погрешности цифровой фильтрации. При решении задач цифровой фильтрации в системах обработки информации на основе АСФ достаточно часто могут возникать случаи, когда число наблюдений превышает число назначенных сплайновых узлов и в качестве базисных функций необходимо применить полиномы с большими степенями при одновременном требовании снижения вычислительных затрат и возникающих погрешностей. Обычно при нахождении АСФ на базисных полиномах с большими степенями для больших интервалов наблюдений возникают проблемы решений систем линейных уравнений высокой размерности, связанные со значительными вычислительными затратами. При повышении степеней базисных полиномов общего вида для соответствующих линейных систем могут возникать проблемы плохой обусловленности, приводящие к точностным ограничениям аппроксимаций. Применение сплайнов для аппроксимации функций актуально для многих областей вычислительной математики [Макаров, Хлобыстов, 1983]. В 2019 г. на основе [Гетманов, 2013] были предложены методы вычисления АСФ с базисными полиномами общего вида и базисными дискретными ортогональными полиномами, которые предназначены для преодоления указанных проблем. Реализованная здесь задача вычисления АСФ с базисными полиномами общего вида и с числом наблюдений, превышающем число сплайновых узлов, базируется на обобщении известной задачи со сплайновыми функциями на основе кубических полиномов и с узлами, которые совпадают с координатами зашумлённых наблюдений. Упомянутая задача впервые была рассмотрена в [Schoenberg, 1964], достаточно детальное её описание приведено в [Стечкин, Субботин, 1976]. Эта задача, обсуждённая с достаточно общих позиций в [Волков, 2011], имеет многочисленные приложения, например, [Peltier, Chuliat, 2010]; её алгоритм из [Стечкин, Субботин, 1976] в виде программного модуля *csaps* реализован в комплексе Matlab. Для АСФ из [Schoenberg, 1964; Стечкин, Субботин, 1976] оптимизируемый функционал представляет собой взвешенную сумму двух составляющих: суммы квадратов разностей наблюдений и значений сплайновой функции, при этом число наблюдений равняется числу узлов, и интеграла от квадрата второй производной для сплайновой функции. Для предложенных АСФ оптимизируемый функционал совпадает по форме с функционалом из [Schoenberg, 1964; Стечкин, Субботин, 1976]. Отличия состоят в том, что: 1. число

наблюдений превышает число сплайновых узлов; 2. в качестве сплайновых функций могут выступать полиномы общего вида, в том числе и ортогональные полиномы. Следует заметить, что в общем случае в качестве базисных функций могут выступать любые дважды дифференцируемые функции, линейные по параметрам. Первое отличие позволяет существенно повысить помехоустойчивость АСФ по сравнению с [Schoenberg, 1964; Стечкин, Субботин, 1976]. Второе отличие, при условии использования АСФ на дискретных ортогональных полиномах, позволяет существенно снизить вычислительные затраты и погрешности аппроксимации (рис. 3.3). Перечисленные отличия позволяют повысить эффективность применения предлагаемых АСФ в задачах фильтрации. Необходимо отметить, что различные методические подходы и постановки для задач вычисления АСФ рассматриваются в немногочисленных отечественных (напр., [Эшаров, 2008]) и зарубежных (напр., [Barrera et al., 2013]) публикациях. Погрешности фильтрации с использованием разработанных АСФ оказываются меньше (в ряде случаев, существенно меньше), чем погрешности фильтрации, реализуемые на основе традиционных технологий.

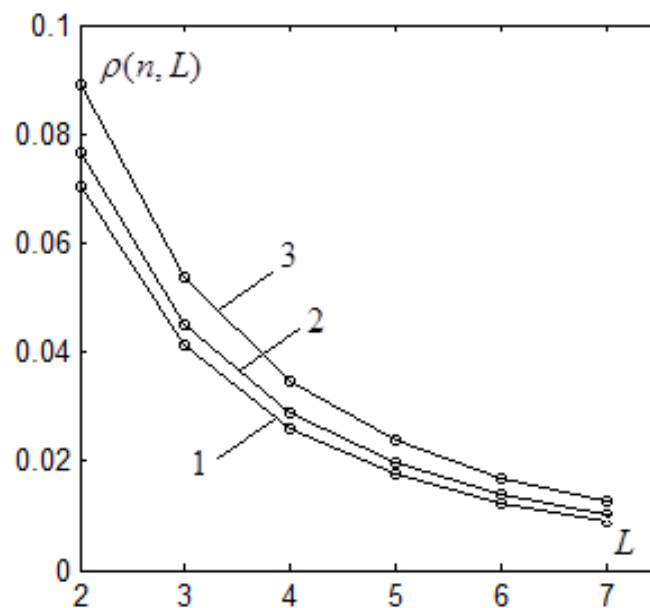


Рисунок 3.3 – Оценки относительных временных затрат алгоритмов построения АСФ на ортогональных и общего вида полиномах

1.5. Расширение функционала АПК МАГНУС

За 2019 г. было выполнено значительное развитие алгоритмов обработки АПК МАГНУС, в частности, системы ввода, верификации и расчета абсолютных значений компонент МПЗ. Была добавлена поддержка расчета базисных по измерениям, полученным нуль-методом. Было установлено, что преобладающее количество выбросов в базисных

значениях компонент МПЗ, измеренных офсетным методом [Красноперов, Сидоров, 2016], объясняется алгоритмом проведения наблюдений, чувствительным к возмущениям магнитного поля в процессе измерений. Таким образом, выполнение абсолютных наблюдений двумя методами позволяет повысить достоверность базисных значений компонент МПЗ. На постоянной основе были введены вычисления разностей независимых направлений на две визирные цели, что напрямую влияет на качество поставляемых данных.

Впервые был добавлен автоматический алгоритм расчета разности модуля полного вектора МПЗ, что обусловлено ужесточением требований к обсерваториям стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Указанная разность (F_0) используется при расчете квазиокончатальных и окончательных данных [Love, Chulliat, 2013] и, по сути, является ещё одним базисным значением. Регулярный ряд значений F_0 , полученный на обсерватории «Климовская», показан на рис. 3.4. Преимущества данного метода обеспечивают две составляющие:

1. метод не требует наличия двух скалярных магнитометров, для него достаточно одного штатного прибора;
2. метод полностью автоматизирован и лишен субъективного подхода оператора к выбору исследуемых интервалов.

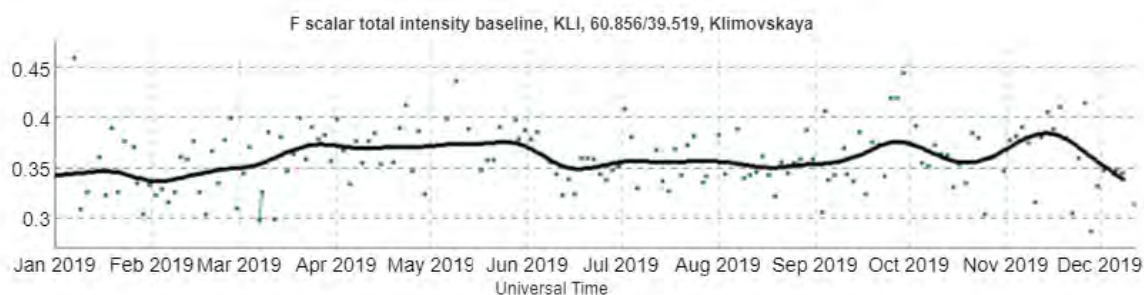


Рисунок 3.4 – Значения F_0 , рассчитанные по измерениям на обсерватории «Климовская» (зеленый), и интерполированная базисная F_0 (черный)

Существенно были расширены возможности системы ускоренной подготовки квазиокончатальных данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Разработанные алгоритмы и методы интегрированы в АПК МАГНУС и прошли успешную апробацию на данных обсерваторий «Климовская» (KLI) и «Санкт-Петербург» (SPG). Кроме того, модернизации коснулся целый ряд мелких аспектов работы системы. Так, например, был внедрен новый картографический сервис в работу вебсайта геомагнитного центра (<http://geomag.gcras.ru>), базирующийся на Yandex Map API, вместо устаревшего Google.

Список использованных источников

Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Красноперов, Р. И. Краткое введение в ДМА // Российский журнал наук о Земле, т.18, ES2001, 2018, DOI:10.2205/2018ES000618.

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

Волков Ю. С. Исследование аппроксимационных свойств интерполяционных сплайнов. /Методы сплайн-функций. Российская конференция, посвящённая 80- летию со дня рождения Ю. С.Завьялова. Тез. докл. ИМ СО РАН. Новосибирск. 2011. С.33–34.

А. Д. Гвишиани, А. А. Соловьёв, Р. В. Сидоров, Р. И. Красноперов, А. А. Груднев, Д. В. Кудин, Дж. К. Карапетян и А. О. Симонян. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН, том 10, NZ4001, 2018, doi: 10.2205/2018NZ000357.

Гетманов В. Г. Алгоритмы вычисления аппроксимационных сплайновых функций с учётом оптимизации расположения сплайновых узлов. /Автометрия. 2013. Т.49. №1. С.26–41

Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. // М.: Мир, 1965. 451с.

Красноперов, Р. И., Р. В. Сидоров; А. А. Соловьев ред. (2016), Инструкция по выполнению абсолютных измерений феррозондовым деклинометром/инклинометром // Исследования по геоинформатике, т.4, №1, doi: 10.2205/2016BS038.

Лидбеттер М., Линдгрэн Г., Ротсен Х. Экстремумы случайных последовательностей и процессов. // М.: Мир, 1989. 392с.

Любушин А. А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. // М.: Наука, 2005. 228с.

Макаров В. Л., Хлобыстов В. В. Сплайн-аппроксимация функций. М.: Высшая школа. 1983. 80с.

Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. // М.: Мир, 2005. 671с.

Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М.:Наука. 1976. 248 с.

Эшаров Э. А. Рекуррентная сплайн-аппроксимация третьей степени произвольной глубины p / Вычислительные технологии. 2008. Т.13. №4. С.131–137

Barrera D., A.Guessab, O. Nouisser. Increasing the approximation order of spline quasi-interpolants. / Journal of Computational and Applied Mathematics. V.252. 2013. P.27–39

Bilitza, D., D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, et al. (2014), The international reference ionosphere 2012 – a model of international collaboration, *Journal Space Weather Space Climate*, 4(A07), <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014004>.

Brown W. J., Mound J. E., Livermore P. W. Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. V. 223. P. 62 – 76. ISSN 0031-9201. 2013

Love J. J., Chulliat A. An international network of magnetic observatories. *Eos Trans. Am. Geophys. Union*. V. 94(42). P. 373–374. doi: 10.1002/2013EO420001. 2013

Lukianova, R., F. Christiansen (2006), Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents, *Journal Geophysical Research*, 111, A03213, doi:10.1029/2005JA011465.

Peltier A., Chulliat A. On the feasibility of promptly producing quasi- definitive magnetic observatory data. / *Earth Planets Space*, E-letter. 62, e5-e8, 2010, doi: 10.5047/eps.2010.02.002.

Ridley, A. J., Y. Deng, G. Toth (2006), The global ionosphere-thermosphere model, *Journal Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 68, 8, 839–864.

Schoenberg I. J. Spline function and the problem of graduating. /*Proceedings of N. A.S.* 1964. P.947–950

Taylor F. Digital Filters: Principles and Applications with Matlab. John Wiley & Sons Inc. 2011

Themens, D. R., P. T. Jayachandran, M. J. Nicolls, J. W. MacDougall (2014), A top to bottom evaluation of IRI 2007 within the polar cap, *Journal Geophysical Research Space Physics*, 119, 6689–6703, <http://dx.doi.org/10.1002/2014JA020052>.

Themens, D. R., P. T. Jayachandran, I. Galkin, C. Hall (2017), The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): NmF₂ and hmF₂, *Journal Geophysical Research Space Physics*, 122, 9015–9031, doi:10.1002/2017JA024398.

4. Организация, визуализация, интерпретация и публикация геофизических данных

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2019-0004

Номер госрегистрации: АААА-А19-119032090068-1

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

Целью данной работы является создание новых и актуализация имеющихся информационных ресурсов, усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных и информации. Проведение исследований, основанных на использовании и анализе больших объемов данных, находящихся на хранении в ГЦ РАН или доступных в Мировой системе данных.

4.1. Совершенствование управления массивами геофизических данных. Информационное обеспечение научных исследований

В МЦД по СЗФ в 2019 г. реорганизован веб-сайт – на главной странице <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html> размещен новый документ «Политика в отношении данных», содержащий принципы сбора, накопления, распространения данных и взаимодействия с поставщиками и пользователями данных. На отдельных страницах сайта размещена международная лицензия Creative Commons (CC BY-NC 4.0). На основе информации, полученной при анализе, регистрации и проверке качества данных, созданы метаданные в виде XML-файлов в Международном стандарте ISO 19115, представленные в каталоге метаданных <http://www.wdcb.ru/metadata/stp/>.

Дополнены представленные в свободном доступе на сайте Центра массивы среднечасовых и минутных значений элементов геомагнитного поля вновь поступившими данными от ряда обсерваторий, а также переведенными с бумажного носителя в PDF формат и затем в текстовые файлы в кодах ASCII (табл. 4.1). Дополнены новыми данными массивы значений K -индекса ряда обсерваторий. Опубликованы в свободном доступе http://www.wdcb.ru/stp/magnetogr_list.ru.html цифровые изображения магнитограмм обсерваторий «Ашхабад» (1968–1983 гг.), «Борок» (1969–1972, 1981–1983 гг.), «Иркутск» (1967–1969 гг.). Предварительно данные в количестве более 14 000 магнитограмм (160 Гб) были проверены и систематизированы.

Новые данные ионосферной станции "Москва" (ИЗМИРАН) за период XI.2018–

Х.2019 гг. после проверки, анализа и переформатирования преобразованы в годовые файлы для каждого из 18 ионосферных параметров и опубликованы на веб-сайте http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric_phenomena.ru.html. В настоящее время репозиторий содержит ионосферные данные станции "Москва" за период 2008–2019 гг.

Таблица 4.1 – Новые данные значений элементов геомагнитного поля, полученные и переведенные в машиночитаемый вид в 2019 г. и размещенные на веб-сайте МЦД по СЗФ

Код обсерваторий	Название обсерватории	Среднечасовые данные, Годы (месяцы)	Минутные данные, годы
AAA	Алма-Ата	1970(4–12), 1971(9–12), 1980(6), 1983(2), 1985(6,11,12), 1986(7), 1987(1,7), 1989(7), 1990(12), 2003	
AIA	Аргентинские о-ва	2016,	2016
ARS	Арти	2018, 1994(V & D comp), 1995(3 F comp)	2018
BOX	Борок	2017–2018	2017–2018
IRT	Иркутск	2018	2018
KIV	Киев	2016–2017	2016–2017
KZN	Казань	2012–2016	2012–2016
LVV	Львов	2016–2017, 1988–1990	2016–2017
LZV	Лазарев	1960, 1961(1–2)	
MGD	Магадан	1991–1993, 1996–1998, 1972–1979(F comp), 1981–1989(F comp)	
MNK	Минск	2018	2018
MOS	Москва	2018	2018
NKK	Новоказалинск	1986(9), 1974–1975	
NVL	Новолазаревская	1960(12)	
NVS	Новосибирск	2018	2018
PET	Петропавловск	2018, 1968(V & H comp)	2018
POD	Подкаменная Тунгуска	2015–2016	2015–2016
SRE	Средникан	1961(8 H comp)	
TIK	Тикси	1987	
YAK	Якутск	2017	2016–2017
YSS	Южно-Сахалинск	1963 (V comp), 1989	

Проведена реорганизация веб-страниц раздела «Солнечная активность и межпланетная среда» http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.ru.html. На всех страницах добавлены ссылки на источники данных. Для ряда наборов данных приведены цифровые идентификаторы объекта DOIs, присвоенные в рамках проекта «База данных по наукам о Земле», а также на ряде страниц размещена лицензия CC BY-NC 4.0 по согласованию с поставщиками данных. Для всех наборов данных составлены XML файлы метаданных стандарта ISO 19115. На всех страницах раздела размещена ссылка на «Каталог метаданных». Опубликован «Список солнечных протонных событий 24 цикла солнечной

активности, 2009–2019» [Логачёв и др., 2019]. Добавлен раздел «Публикации с данными», содержащий подборку изданий Мировых центров данных по СЗФ в США и в Москве с данными о солнечной активности и межпланетной среде. Представлен доклад на 14 ежегодную конференцию «Физика плазмы в солнечной системе», проходившую в ИКИ РАН (11–15 февраля 2019 г.) о данных, имеющихся в МЦД и применимых для исследования воздействия солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство.

В МЦД по ФТЗ в 2019 г. продолжена 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..., 2018]. Каталоги землетрясений регионов «Карпаты», «Крым», «Алтай и Саяны», «Прибайкалье и Забайкалье», «Северо-Восток», «Якутия», «Азербайджан», «Армения», «Северный Кавказ» дополнены данными за 2012 г. (14 500 событий).

Дополнены данными за период 02.2018–01.2019 гг., поступившими из Геофизической службы РАН, Сейсмологический каталог и Сейсмологический бюллетень, представленные в свободном доступе на веб-сайте центра. Переведен в электронный вид в формат PDF и опубликован на сайте «Каталог землетрясений Российской Империи» за период с 596 до н.в. по 1888 г. [Мушкетов и Орлов, 1893].

В 2019 г. продолжалось выполнение проекта «Сохранение старых данных» – преобразование данных с бумажного носителя в электронный вид с целью увеличения информационных ресурсов в электронном виде, обеспечения свободного on-line доступа к ним и более эффективного использования. Переведены в электронный вид данные семи ионосферных станций (45 000 документов). После проверки и редактирования часть данных размещена на веб-сайте http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/. О работе по сохранению исторических данных представлены доклады на 27-ой Генеральной Ассамблее IUGG (Монреаль, Канада) и на Осенней сессии 2019 г. AGU (Сан-Франциско, США).

В 2019 г. проведено усовершенствование базы данных «Геомагнетизм» и веб-формы доступа к ней. Разработаны модули для загрузки и выбора вариационных минутных данных и значений K -индекса. Проведена пробная загрузка и выборка данных K -индекса. Дополнена информация об обсерваториях и наличии данных. Ведется подготовка данных вариационных минутных значений и значений K -индекса к загрузке в базу. Проведена унификация структуры архива и представления данных – все вариационные минутные данные приведены к стандартному формату. В 2019 г. получено свидетельство о государственной регистрации базы данных «Геомагнетизм – минутные значения элементов магнитного поля Земли» (№ 2019621311 от 17.07.2019 г.).

В 2019 г. продолжалась работа по проекту «База данных по наукам о Земле» (Earth Science DataBase – ESDB), целью которого является создание современной системы регистрации и публикации геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI, зарегистрированного в системе Crossref. В центральном репозитории проекта (<http://esdb.wdcb.ru/>) опубликованы: база геомагнитных данных, включающая 3-секундные записи Y и Z компонент и полной интенсивности F магнитного поля Земли, сделанных на геомагнитной обсерватории «Белое море» (<https://doi.org/10.2205/WSE-database>); база данных ROSA, включающая статические и динамические параметры крупнейших месторождений углеводородов в России и других странах мира созданная в ГЦ РАН (<https://doi.org/10.2205/esdb-rosa-database>); список солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности за 2009–2019 гг. (<https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-007>). Созданы страницы отклика для зарегистрированных баз данных и наборов данных. О формировании ESDB был представлен доклад (устный) на 27-ой Генеральной Ассамблее IUGG (Монреаль, Канада).

4.2. Развитие БД сферических визуализаций – презентации цифровых и растровых карт главного МПЗ за период с -10010 по 2017 гг.

В ходе проведения работ текущего этапа в 2019 г. на сферическом демонстрационном экране был визуализирован ряд карт Магнитного поля Земли (МПЗ).

Одной из важнейших задач для достижения поставленной цели стало создание и наполнение базы большим объемом магнитных данных, охватывающих значительный временной промежуток. Оформление данных для последующего построения карт производилось с использованием программного продукта ESRI – ArcMap. Для каждой из компонент вектора ГМПЗ составлено более полутора тысяч карт по разным тематическим категориям. Генерация карт происходит с помощью дополнительного скрипта на языке Python. Общий объем данных, составляющих атлас магнитного поля Земли, составил порядка 6 Гб.

Тематически сферические визуализации МПЗ состоят из следующих разделов:

1. Цифровые карты изолиний и растровые карты компонент Главного магнитного поля Земли за период с –10010 по 2017 гг. Временной шаг между магнитными эпохами варьируется от 10 лет до полугода (рис. 4.1).
2. Цифровые карты векового хода ГМПЗ (временной изменчивости) за 1902–2017 гг. с временным шагом от 5 лет до 1 года, построенные с использованием данных моделей IGRF (1902–1997 гг.) и CALS10K.2 (1997–2017 гг.) для трёх ортогональных составляющих, а также полной напряженности ГМПЗ.

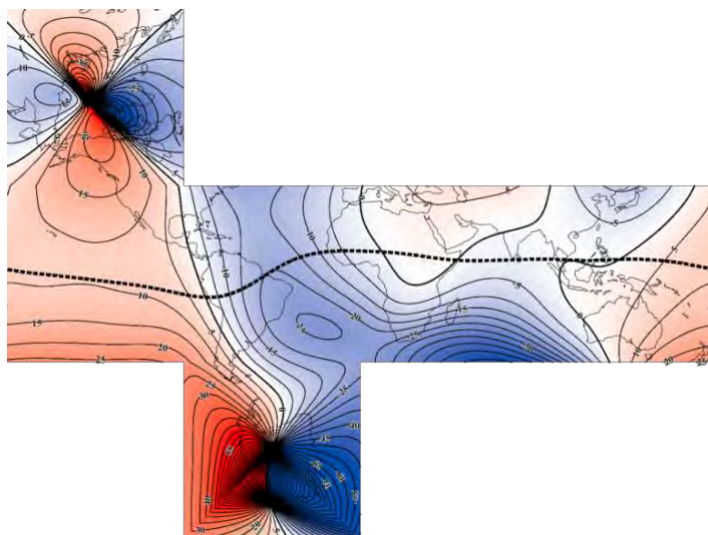


Рисунок 4.1 – Магнитное склонение за 2015 г. в кубической проекции

3. Карты недипольной составляющей ГМПЗ за 1900–2017 гг. Для построения использовались данных моделей IGRF (1900–1997 гг.) и CALS10K.2 (1997–2017 гг.).

4. Карты траекторий движения магнитных полюсов (северного СМП и южного ЮМП) построены согласно полевым измерениям (за 1831–2007 гг. для СМП и 1903–2000 гг. для ЮМП) и модельным данным (за 1500–2017 гг. для СМП и ЮМП).

5. Карты аномального магнитного поля Земли (литосферные аномалии): WDMAM version 2, EMAG2 version 2, EMAG2 version 3.

6. Карты распределений вариаций магнитного поля Земли во время мировой бури 20–25 января 2005 г. (рис. 4.2) по данным наблюдений глобальной сети обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ и магнитовариационных станций (X и Z компоненты).

7. Современная карта расположения международных сетей геомагнитных станций и обсерваторий. Карта построена на основании данных, представленных на сайте <http://www.intermagnet.org>. На данный момент сеть ИНТЕРМАГНЕТ включает в себя более 130 обсерваторий (рис. 4.3).

Аналогично всем предыдущим визуализациям, созданным за время выполнения предыдущей НИР, в данной НИР любой из тематических разделов МПЗ может быть транслирован непосредственно на цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном либо загружен на веб-сервис для общего доступа.

На весь набор сферических презентаций, созданных за отчетный период 2019 г., в РОСПАТЕНТ получено Свидетельство «База сферических визуализаций: Магнитное поле Земли» №2019620673 от 25 апреля 2019 г.

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. 4.4 эллипсов (кругов радиусом 25 км) с центрами в соответствующих 108 пересечениях линеаментов есть искомые зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ на Кавказе. Следует отметить, что помимо 16 объектов из обучающей выборки высокосейсмичными объявлены 92 пересечения из 221, составлявших материал экзамена алгоритма «Барьер-3».

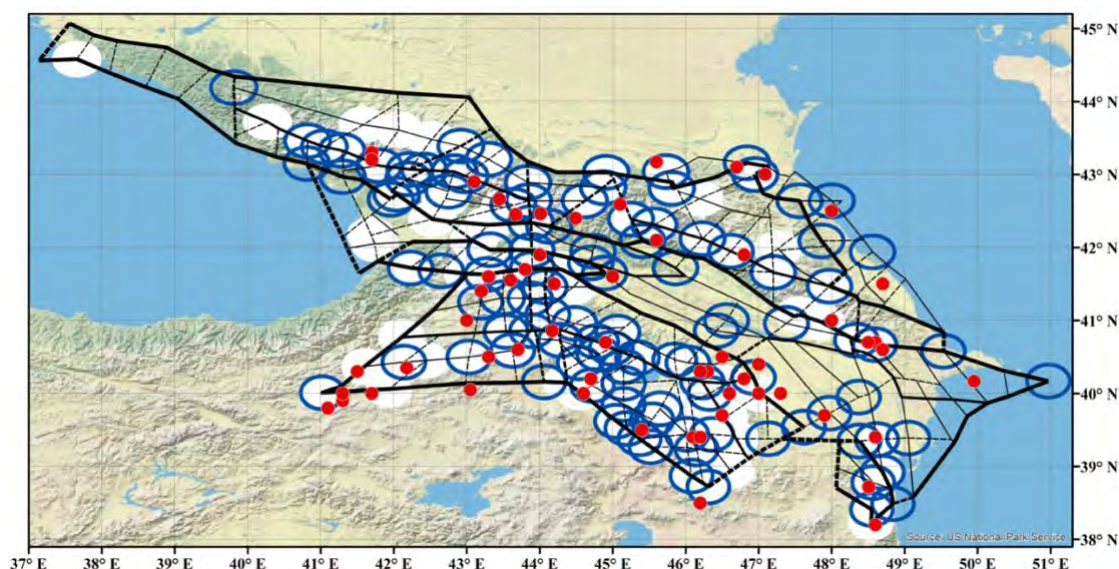


Рисунок 4.4 – Схема морфоструктурного районирования (толстые линии – линеаменты I-ого ранга, средние – II-ого ранга, тонкие – III-ого ранга, сплошные линии – продольные линеаменты, пунктирные – поперечные линеаменты [Соловьев и др., 2013]), зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ (пустые эллипсы с синими границами – зоны распознанные алгоритмом «Барьер-3», белые эллипсы – «Кора-3», белые эллипсы с синими границами – обоими алгоритмами) и эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ (красные точки) на Кавказе

На рис. 4.5 представлены гистограммы, характеризующие вклад используемых 11-ти геолого-геофизических и геоморфологических характеристик в распознавание алгоритмом «Барьер-3» подмножества пересечений линеаментов, в окрестности которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.0$. По оси ординат на рис. 4.5 показаны используемые при распознавании характеристики объектов. По оси абсцисс на рис. 4.5а показан средний вклад характеристик при распознавании. На рис. 4.5б показано количество попаданий характеристик в тройки «сильнейших». Подробное математическое описание вычисления среднего вклада характеристик и вклада через попадание в тройки «сильнейших» дано в [Дзедзоев и др., 2019].

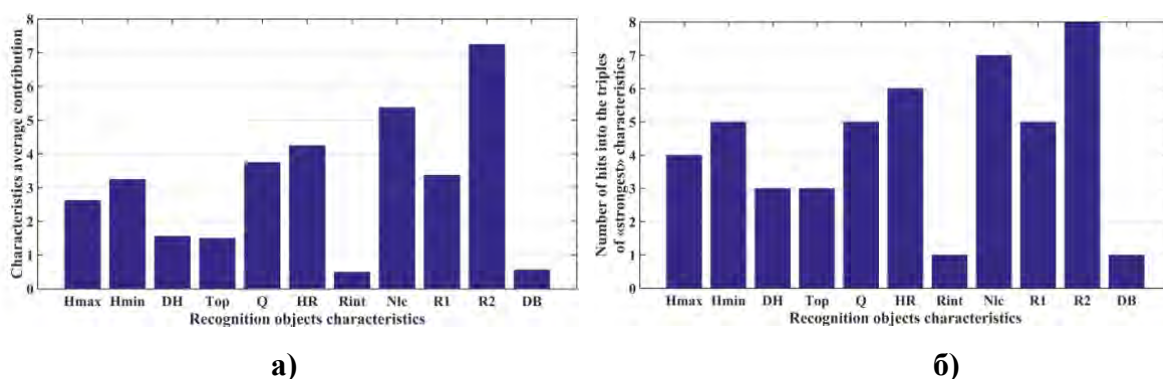


Рисунок 4.5 – Распознавание высокосейсмичных зон ($M \geq 6.0$) на Кавказе алгоритмом «Барьер-3»: а) средний вклад 11 используемых при распознавании геолого-геофизических характеристик; б) вклад характеристик, выраженный через их попадание в тройки «сильнейших» характеристик.

Из рис. 4.5 видно, что при распознавании на Кавказе алгоритмом «Барьер-3» наибольший вклад в формирование искомого высокосейсмичного множества объектов вносят характеристики, отвечающие за высоты рельефа (Hmax и Hmin), площадь четвертичных пород (Q), высший ранг линеамента (HR), число линеаментов в окрестности (NLC), а также расстояния до ближайших линеаментов I-ого (R1) и II-ого (R2) рангов. Пересечения линеаментов на Кавказе, распознанные «Барьером-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-ого или III-ого рангов ($NLC \geq 3$, $HR = 2$ или $HR = 3$, $R2 \leq 30$ км) и находятся на сравнительно небольших расстояниях от линеаментов I-ого ранга ($0 < R1 \leq 50$ км). Эти признаки естественно трактовать как критерии высокой сейсмичности на Кавказе.

Проведен сравнительный анализ результатов распознавания на Кавказе алгоритмом «Барьер-3» и классическим алгоритмом дихотомии «Кора-3». Алгоритмом «Барьер-3» распознаны как высокосейсмичные 108 пересечений линеаментов, а «Корой-3» – 107. При этом 73 пересечения классифицированы как опасные для $M \geq 6.0$ обоими алгоритмами. Из рис. 4.4 видно, что различия в результатах распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» наблюдаются в западной части Центрального Кавказа, на побережье Каспийского моря, а также в юго-западном и юго-восточном секторах рассматриваемой схемы морфоструктурного районирования.

4.4. Интерактивная ГИС многокритериальной оценки сейсмической опасности

Благодаря современным ГИС-технологиям с использованием ПО ESRI ArcGIS впервые создана единая веб-среда, в которой собраны наиболее полные результаты

распознавания высокосейсмичных зон независимыми методами, а также исходные данные, лежащие в основе распознавания [Соловьев и др., 2018; Николова и Соловьев, 2019].

В качестве программного решения, позволяющего хранить, просматривать и редактировать данные с использованием сети Интернет, используется технология геопортала. В качестве геопортала для веб-ГИС выступает один из компонентов ПО ArcGIS Enterprise - Portal for ArcGIS. Интерфейс веб-приложения (рис. 4.6) создан при помощи Web AppBuilder for ArcGIS – конструктора, позволяющего создавать различные приложения без написания кода.

Веб-ГИС состоит из двух частей: базы данных и инструментов ее анализа. Основными элементами базы данных являются: калиброванные каталоги землетрясений; результаты проведения морфоструктурного районирования; результаты определения зон возможного возникновения сильных землетрясений, полученные методом ЕРА и алгоритмом «Барьер»; результаты распознавания высокосейсмичных зон с помощью системы FCAZ; значения коэффициентов Общего закона подобия землетрясений, рассчитанные в пересечении морфоструктурных линеаментов и в узлах регулярной сетки; схема блоковой структуры и каталог искусственных землетрясений для региона Кавказ [Соловьев и др., 2018]. Также в базу дополнительно включены геолого-геофизические данные, такие как гравитационные аномалии Буге (модель EIGEN), цифровая модель рельефа (GEBCO), литосферные аномалии магнитного поля (WDMAM v2).

При помощи интегрированных в веб-ГИС инструментов анализа и запросов исследователь может самостоятельно оценить сейсмический риск интересующей территории. В веб-ГИС используются следующие стандартные инструменты-виджеты: «Галерея базовых карт», «Измерение»; «Добавить данные»; «Список слоев»; «Легенда».

Помимо стандартных виджетов в веб-приложение добавлены инструменты геообработки для создания пользовательских запросов к базе, реализованные на языке Python с использованием библиотеки ArcPy и загруженные на сервер в качестве сервисов геообработки. Доступ к сервисам осуществляется через виджет «Геообработка». В приложении реализованы следующие запросы: эпицентры землетрясений с магнитудами из заданного диапазона; линеаменты, попадающие в область, с указанием их рангов; распознанные места сильных землетрясений из множества морфоструктурных узлов согласно методам ЕРА и «Барьер»; высокосейсмичные 2D-зоны, определенные с помощью системы FCAZ; эпицентры искусственных землетрясений с магнитудами из заданного диапазона; максимальная магнитуда землетрясений, ожидаемых в области с вероятностью p в течение N лет.

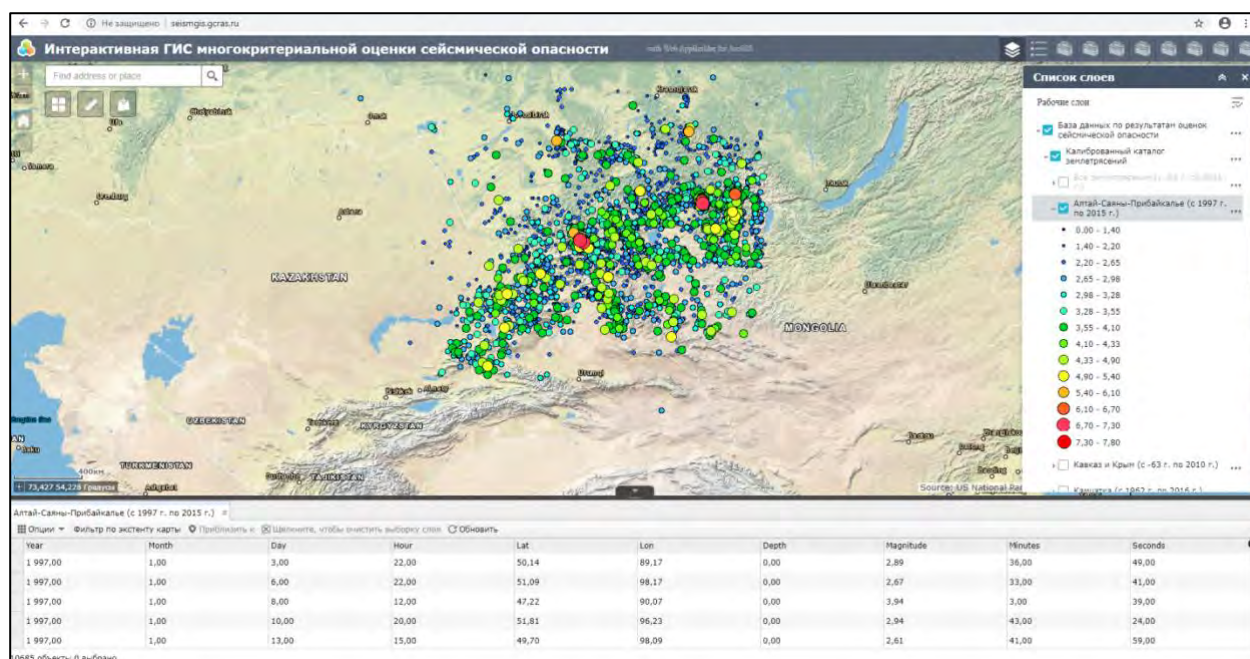


Рисунок 4.6 – Запущенное веб-приложение, созданное с применением Web AppBuilder for ArcGIS

Созданная веб-ГИС на основе комплексного подхода к оценке сейсмической опасности обладает широким спектром возможностей для работы с данными. Доступ к веб-ГИС осуществляется по ссылке (<http://seismgis.gcras.ru/>). Подобная система позволяет дать наиболее объективную оценку сейсмической опасности независимыми методами, поскольку объединяет разные подходы к такой оценке в единой, унифицированной среде.

4.5. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости водообмена между различными частями Каспийского моря

Для анализа изменений водообмена между частями Каспийского моря использовались альтиметрические измерения со спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3, что объясняется точностью измерений высоты морской поверхности (ВМП), хорошим пространственным разрешением измерений уровня моря и возможностью объединения временных рядов измерений аномалий уровня моря этих трех спутников по одним и тем же трекам.

Положение 133 и 209 треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 (рис. 4.7) оптимальны для анализа водообмена между частями Каспийского моря, хотя они не совпадают с географическими границами Северного, Среднего и Южного Каспия.

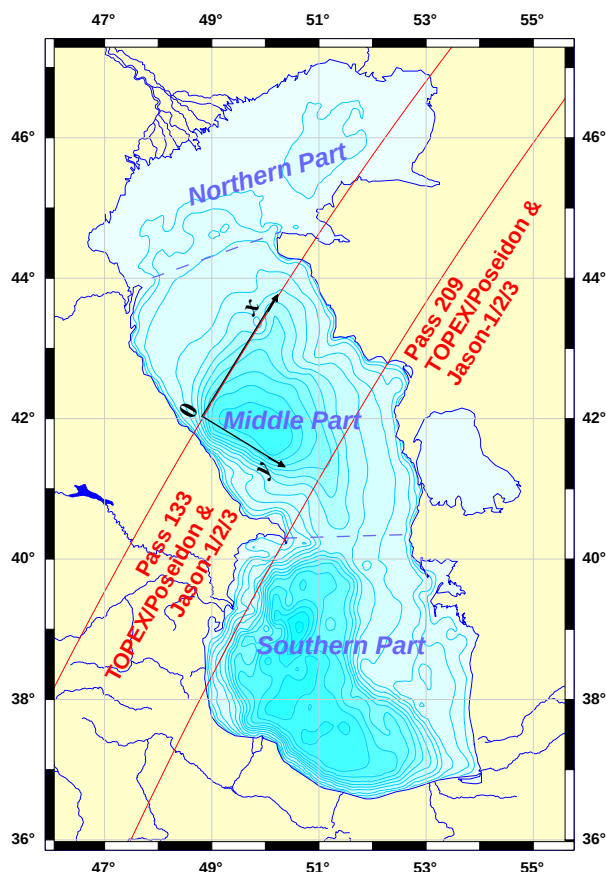


Рисунок 4.7 – Положение 133 и 209 треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 на акватории Каспийского моря и оси координат для расчета водообмена через эти треки

Однако, для этой части Каспийского моря, ограниченной 133 и 209 треками, отсутствует речной сток, а сток в залив Кара-Богаз-Гол расположен южнее.

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

Аномалии уровня моря рассчитываются по данным о ВМП относительно средней высоты поверхности моря. Сегодня существует множество глобальных моделей средних высот морской поверхности (СВМП) Мирового океана, в которые включена акватория Каспийского моря [Лебедев и Костяной, 2005]. Они отличаются друг от друга как данными, используемыми при расчетах, так и пространственным разрешением [Lebedev & Kostianoy, 2008; Lebedev, 2012; Лебедев, 2012]. Модель СВМП Мирового океана, включая акваторию Каспийского моря, вычисляется осреднением по времени данных альтиметрических измерений высот морской поверхности с учетом поправки на высоту приливов и поправки обратного барометра. Для Каспийского моря такая методика расчета СВМП представляет определенную трудность по ряду причин [Lebedev 2012;].

Поэтому, исходя из определения СВМП, как поверхности наиболее приближенной к

эквипотенциальной поверхности моря, предлагается вычислять региональную модель СВМП Каспийского моря как функцию, зависимую не только от широты и долготы, но и от времени с учетом сезонной и синоптической изменчивости высот морской поверхности.

Такой метод расчета СВМП требует постоянного обновления по мере поступления новых данных спутниковой альтиметрии. Для каждого календарного года ВМП интерполировались на регулярную сетку методом разложения на радиальные базисные функции с учетом климатической динамической топографии Каспия [Попов, 2004]. Построенная по такой методике модель Каспийского моря (названная как CS_MSS_GCRAS19) впервые позволила проанализировать не только межгодовую изменчивость уровня Каспия, но и пространственную неоднородность скорости его подъема или падения и ее связь с особенностями гравитационного поля.

Временная изменчивость аномалий водообмена через 133 и 209 треки, (рис. 4.8а) показывает сезонную и межгодовую изменчивость его значений. Максимальные амплитуды аномалий водообмена достигают $\pm 18 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ для 133 трека и около $\pm 11 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ для 209 трека. Максимальные значения аномалий водообмена наблюдались в 1993, 1994 и 2012 годах через 133 трек ($\pm 16 \div 18 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$) и в 1993, 1996 и 1997 годах ($\pm 11 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$) через 209 трек. Сравнение этих значений со средним стоком реки Волги ($4700 \div 11000 \text{ м}^3/\text{с}$) показывает, что последний является причиной только 1% аномалии водообмена между частями Каспийского моря. Таким образом, основной причиной аномалий в водообмене между Северным, Средним и Южным Каспием является изменчивость общей циркуляции в море.

На рис. 4.8б приведена временная изменчивость аномалий водного баланса Среднего Каспия. Эти величины варьировались от $+15 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ до $-20 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ с максимальными положительными значениями в летнее время и минимальными значениями в зимнее время. Эта сезонная изменчивость соответствует сезонной изменчивости уровня Каспийского моря, которая имеет максимум летом и минимум зимой. Сезонные амплитуды аномалий водообмена через 133 и 209 треки (рис. 4.8а) и водного баланса Среднего Каспия (рис. 4.8б) меняются от года к году и могут отличаться в три раза (рис. 4.8). Причины этой изменчивости еще не изучены.

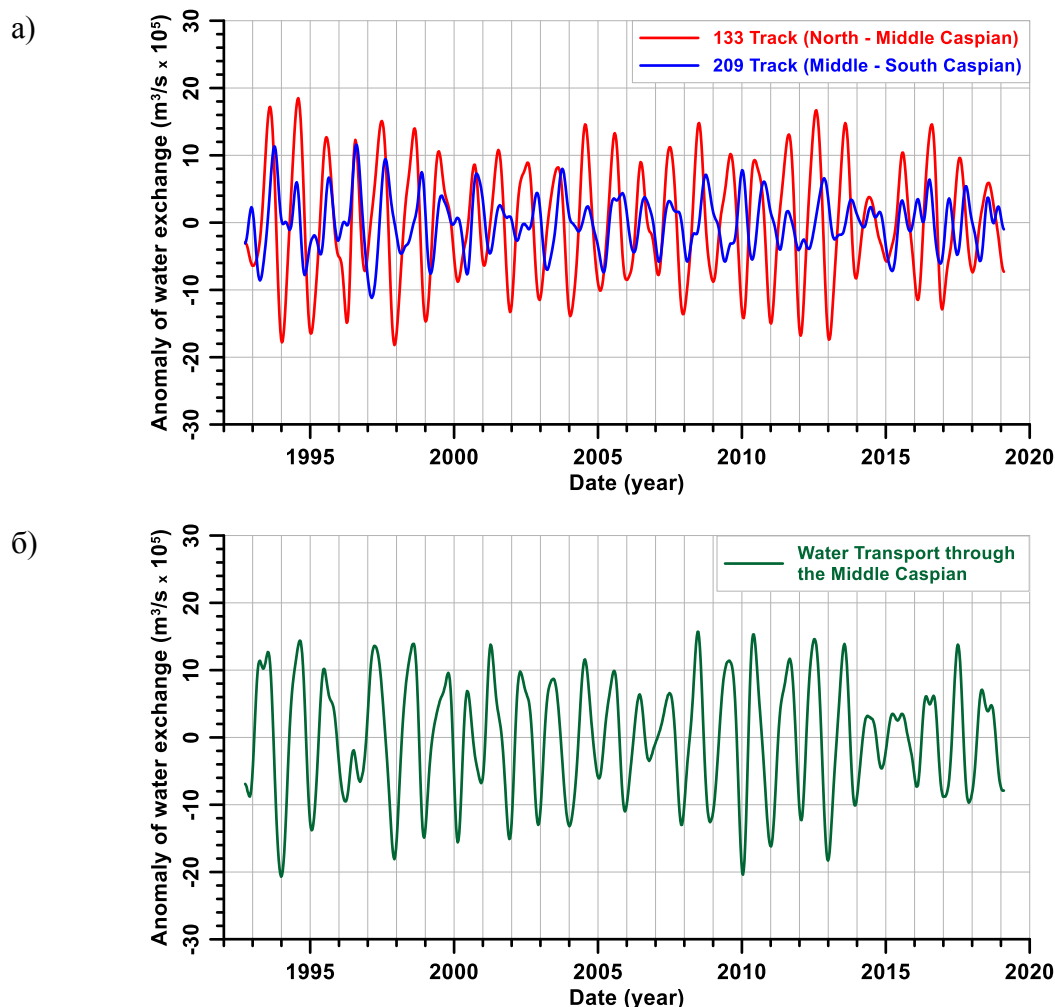


Рисунок 4.8 – Временная изменчивость аномалий водообмена ($\text{м}^3/\text{с}$) через 133 трек (красная линия) и через 209 трек (синяя линия) (а) и аномалии водного баланса Среднего Каспия ($\text{м}^3/\text{с}$) (б)

В настоящем исследовании продемонстрированы возможности использования данных спутниковой альтиметрии для анализа временной изменчивости аномалий водообмена между Северным, Средним и Южным Каспием. Предложенный метод показал себя очень эффективным, поскольку он позволяет рассчитывать эти значения каждые 10 дней, что невозможно сделать при *in situ* измерениях. Этот метод представляется очень полезным для других внутренних морей, например, Средиземного, Адриатического, Черного, Балтийского, Белого, где треки спутников пересекают разные части морей под разными углами, что позволяет оценить аномалии в водообмене между их суббассейнами.

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

Геофизический центр РАН является учредителем и издателем трех онлайн-журналов.

Журнал "Russian Journal of Earth Sciences" (RJES) (<http://rjes.wdcb.ru/>) публикует оригинальные научно-исследовательские работы по всем направлениям геологии, геофизики и геохимии, включая геоинформатику, экологию, физику атмосферы и океана. Статьи, представленные для публикации, подвергаются стандартному процессу "слепого" рецензирования, экспертной оценке и редакционной обработке. Статьи публикуются на английском языке в формате высокого разрешения PDF с гиперссылками к внутренним и внешним объектам, могут содержать элементы интерактивного и динамического контента. Наряду с регулярными научными статьями журнал начал публиковать интерактивные научные материалы, т.е. Flash и HTML5 презентации лекций и докладов, включающие видео материалы с синхронизированными слайдами, переходами, указателями и другими динамическими и интерактивными инструментами.

Журнал RJES индексируется системами Web of Science, Scopus (рис. 4.10), РИНЦ, входит в перечень ВАК и зарегистрирован в системе Crossref. В 2019 году журнал был проиндексирован по всем ранее вышедшим статьям в Scopus – одной из самых авторитетных библиографических и реферативных баз данных в мире.

Научно-информационный журнал "Вестник ОНЗ РАН" (<http://onznews.wdcb.ru/>) издается в формате электронного мультимедийного журнала. Новости в нем обновляются ежемесячно. Наряду с официальными документами, в журнале публикуются материалы о наиболее значимых и интересных событиях в жизни Отделения наук о Земле РАН и его институтов, а также научные статьи.

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

В 2019 г. опубликовано:

- в 19 томе журнала "Russian Journal of Earth Sciences" – 6 номеров (46 статей);
- в "Вестник ОНЗ РАН" – 413 новостных сообщений, 6 научных статей;
- в "Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН" – 6 отчетов.

В лаборатории электронных публикаций проводится внедрение ПО для организации процесса онлайн рецензирования для журнала RJES. В последние годы в редакцию резко

возрос поток статей. Возникла необходимость в оптимизации рабочего процесса т.к. современный научный журнал должен базироваться на программной платформе, реализующей развитую систему сервисов для работы с цифровым контентом. Было проведено сравнение существующих информационных систем с точки зрения автоматизации редакционных процессов. Редакция журнала сочла целесообразным использовать Open Journal Systems (OJS) как наиболее динамично развивающуюся, хорошо документированную информационную систему.

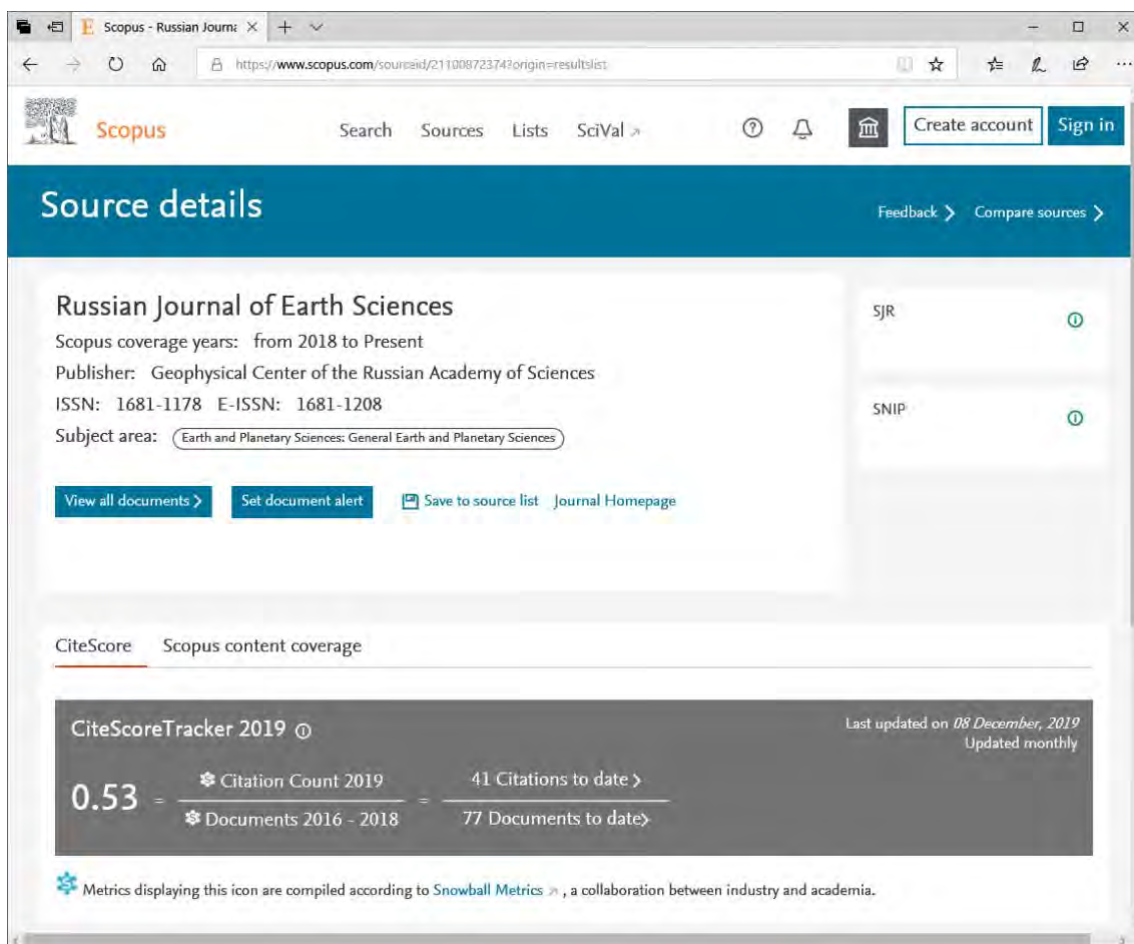


Рисунок 4.10 – Профиль журнала “Russian Journal of Earth Sciences”

В лаборатории электронных публикаций проводится внедрение ПО для организации процесса онлайн рецензирования для журнала RJES. В последние годы в редакцию резко возрос поток статей. Возникла необходимость в оптимизации рабочего процесса т.к. современный научный журнал должен базироваться на программной платформе, реализующей развитую систему сервисов для работы с цифровым контентом. Было проведено сравнение существующих информационных систем с точки зрения автоматизации редакционных процессов. Редакция журнала сочла целесообразным

использовать Open Journal Systems (OJS) как наиболее динамично развивающуюся, хорошо документированную информационную систему.

В качестве пилотного проекта произведена установка системы OJS на сервере ГЦ РАН, осуществлен перевод журнала RJES под управление этой системы. Однако полноценный переход перенесен на 2020 г. в связи с тем, что для полноценного функционирования данной системы необходимо полностью сформировать базу метаданных статей, опубликованных с 1998 г., базу рецензентов и т.д. Проводится наполнение БД статей, всестороннее тестирование системы для ее дальнейшего использования.

Список использованных источников

Гвишиани А. Д., А. И. Горшков, Е. Я. Ранцман, А. Систернас, А. А. Соловьев (1988), Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука.

Дзедобоев Б. А., А. Д. Гвишиани, И. О. Белов, В. Н. Татаринцев, С. М. Агаян, Ю. В. Барыкина (2019), Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай-Саяны-Прибайкалье. $M \geq 6.0$, *Физика Земли*, № 4, сс. 33–47, doi: 10.31857/S0002-33372019433-47.

Землетрясения Северной Евразии, ... год (ежегодники 1992–2012 гг.). – Обнинск: ГС РАН, 1997–2018.

Лебедев С. А. (2012), Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 9, № 3, сс. 224–234.

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

Логачёв Ю. И., Г. А. Базилевская, Е. И. Дайбог и др. Список солнечных протонных событий 24 цикла солнечной активности 2009–2019 гг. Москва, 2019. doi: <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-007>.

Мушкетов И., Орлов А. Каталог землетрясений Российской Империи // Записки Императорского Русского Географического Общества, по общей географии. Т. XXVI. / Под ред. И. Мушкетова. Санкт-Петербург, 1893.

Николова Ю. И., А. А. Соловьев, База данных по результатам оценок сейсмической опасности регионов Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье (устный) // Научная

конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 22–23 апреля 2019 г. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019. – С. 62.

Попов С. К. (2004), Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море, *Метеорология и гидрология*, № 5, сс. 76–84.

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

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

Соловьев А. А., О. В. Новикова, А. И. Горшков, Е. П. Пиотровская (2013), Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий, *Доклады академии наук*, Т. 450, № 5, сс. 599 – 601, doi: 10.7868/S0869565213170222.

Соловьев Ан. А., Ал. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, Б. П. Николов, Ю. И. Николова (2018), ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма, *Исследование Земли из космоса*, № 5, сс. 52–64.

Lebedev S. A. Mean Sea Surface Model of the Caspian Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 Satellite Altimetry Data // *Geodesy for Planet Earth* /Eds. S. Kenyon et al. Intern. Association of Geodesy Symposia 136. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 833–841. doi: 10.1007/978-3-642-20338-1 105.

Lebedev S. A., A. G. Kostianoy (2008), Integrated use of satellite altimetry in the investigation of the meteorological, hydrological, and hydrodynamic regime of the Caspian Sea, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, V. 19, № 1–2. pp. 71–82. doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.71(SA).

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

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0124-2019-0006

Номер госрегистрации: АААА-А19-119101590122-8

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

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

5.1. Развертывание стационарного пункта ГНСС-наблюдений на территории геомагнитной обсерватории «Климовская» (Архангельская область)

Летом и осенью 2019 г. велись работы по организации стационарного пункта ГНСС-наблюдений для обеспечения геомагнитных и геодинамических исследований на территории геомагнитной обсерватории «Климовская» (геобиостационар «Ротковец», Коношский район Архангельской области). Этапы работ включали в себя проектирование и закладку постаментов для установки высокоточной ГНСС-аппаратуры и развертывание необходимой сетевой инфраструктуры. В июле 2019 г. было выбрано место закладки пункта и точно определены его координаты. Строительство ГНСС-пункта выполнено в течение трех дней (8–10 июля 2019 г.). Основа фундамента постаментов геодезического пункта — асбоцементная труба диаметром 40 см, залитая армированным бетоном, которая составляет единое целое с бетонной плитой (якорем) размером 130х130 см и высотой 40 см, заложеной на глубину 365 см. В верхней части трубы закреплено устройство принудительного центрирования.

Для установки антенны и ГНСС-приемника на геодезическом репере на антенну был закреплен защитный конусообразный обтекатель (рисунок 5.1, слева). Сборка аппаратуры, изображенной на рисунке 5.2, в центре, производилась в магнитном павильоне ИЗМИРАН. Электричество к ГНСС-приемнику было проведено от электрического щитка абсолютного павильона. Кабель приемника, изображенный на рисунке 5.1, справа, подвешен на пластмассовую проволоку и пропущен через пластмассовую гофру.

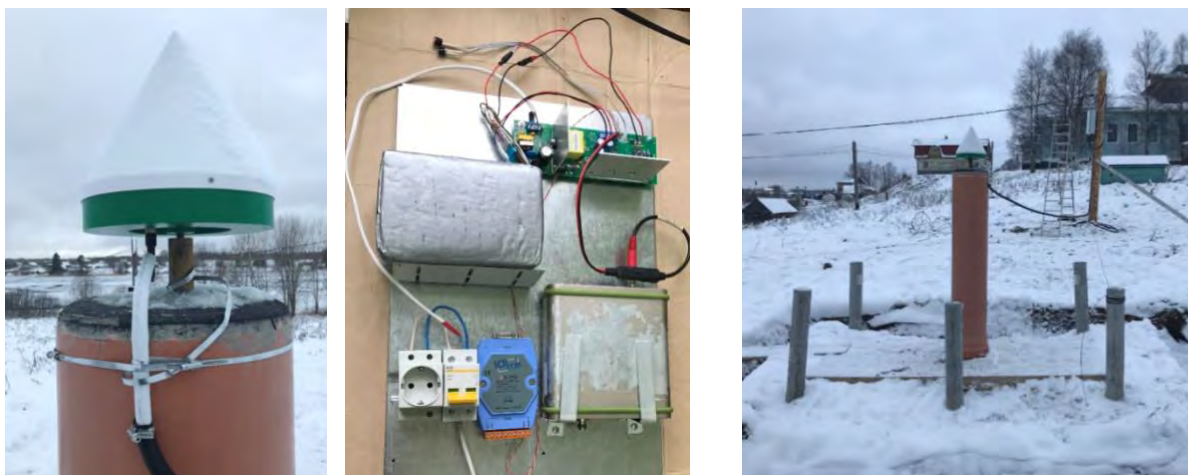


Рисунок 5.1 — Стационарный пункт ГНСС-наблюдений на обсерватории «Климовская»: вид на установленную ГНСС-антенну с обтекателем, устройство принудительного центрирования и подключенный кабель (слева), аппаратура комплекта для ГНСС-приемника (в центре) и общий вид на пункт (справа)

После окончания подготовительных и монтажных работ в ящик был установлен ГНСС-приемник. Тестовая передача данных в центр агрегации данных ИФЗ РАН произведена успешно; данные представлены на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 — Вывод данных ГНСС приемника на сайте центра агрегации данных ИФЗ РАН

Проведение подготовительной компонентной и площадной магнитной съемки на территории геофизической обсерватории «Михнево» (Московская область)

С 16 по 21 июля 2019 года состоялась экспедиция сотрудников ГЦ РАН в Геофизическую обсерваторию «Михнево» Института геодинамики геосфер (ИДГ) РАН, расположенную в 80 км на юг от Москвы (в окрестностях деревни Починки, Ступинский район Московской области). Целью командировки было выполнение магнитных исследований на территории полигона ИДГ РАН для определения мест, пригодных для

возведения абсолютного и вариационного павильонов планируемой обсерватории стандарта INTERMAGNET.

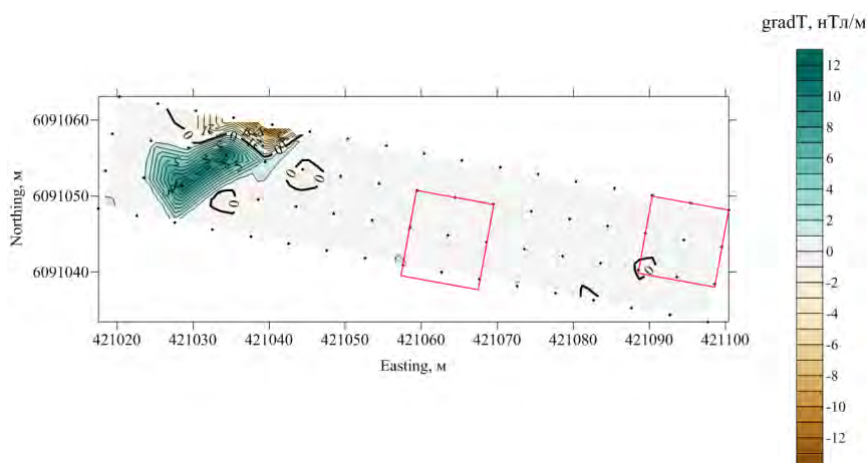
Площадная съемка производилась магнитоградиентометром GSM-19. Временная привязка регистрируемых данных к шкале всемирного времени (UTC) осуществлялась с помощью встроенного кодового ГНСС-приемника магнитоградиентометра. Также была произведена координатная привязка съемочной сети с помощью точной геодезической аппаратуры – GPS-приемников Topcon и тахеометра Trimble. Для учета суточной вариации магнитного поля использовался магнитометр GSM-19 в режиме базовой магнитовариационной станции, синхронизированный с магнитоградиентометром. Первая серия магнитной съемки выполнялась 17–18 июля на прямоугольном участке площадью $\sim 15 \times 80$ м. Интервалы съемки вдоль профиля и между ними составили 5 м, т.е. съемка была проведена по регулярной сети наблюдений. Детальная съемка была проведена 18 июля по двум четырехугольным участкам 12×10 м и 10×10 м, выбранным после обработки первого этапа съемки. Шаг по профилю и между профилями для этой серии составил 1 м.

Обработка полевых измерений состояла в учете дневной вариации. Для этого аномальная составляющая полной напряженности магнитного поля в каждой точке наблюдения рассчитывалась по формуле:

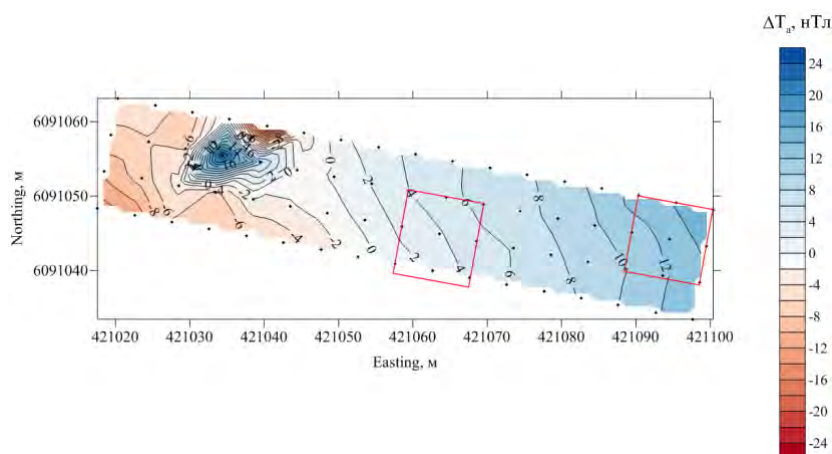
$$\Delta T_a = T_{obs} - T_{base},$$

где T_{obs} — поле, измеренное мобильным магнитометром, T_{base} — поле, измеренное стационарным магнитометром в момент времени, ближайший к моменту измерения поля мобильным магнитометром.. Карты приведены на рисунке 5.3: $gradT$ – вертикальный градиент магнитного поля (рисунок 5.3а), ΔT_a – аномальная составляющая магнитного поля (рисунок 5.3б). Источником присутствующей на картах аномального поля и вертикального градиента полосовая аномалия, проходящей с севера на юг, является кабель сейсмической станции. На остальной части участка аномальное поле слабо возрастает в восточном-северо-восточном направлении, вероятно, отражая эффект литосферного происхождения, а значения вертикального градиента магнитного поля близки к 0 нТл/м. Исходя из полученных результатов, согласно требованиям и рекомендациям Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA) [Jankowsky, 1996], для размещения павильонов подходит практически вся территория участка съемки на удалении 20 м от аномалии, вызванной кабелем, т.к. значения вертикального градиента на ней минимальны,

а горизонтальный градиент составляет 0.2–0.3 нТл/м. Участки для детальной съемки отмечены красными рамками.



а)



б)

Рисунок 5.3 — Результаты магнитоградиентометрии на выбранном участке: а) карта вертикального градиента магнитного поля Земли; б) карта аномальной составляющей магнитного поля Земли. Красным обведены участки, выбранные для детальной съемки. Сечение изолиний вертикального градиента 1 нТл/м

Карты детальной съемки для аномальной составляющей в целом повторяли тренд магнитного поля, характерный для исходного участка. Горизонтальные градиенты в обоих случаях составляли менее 1 нТл/м, вертикальный градиент иногда достигал 1.5–1.7 нТл/м. В пределах участков детальной съемки для павильонов выбраны наилучшие места с минимальными значениями градиентов (<1 нТл/м), пример — на рисунке. 5.4.

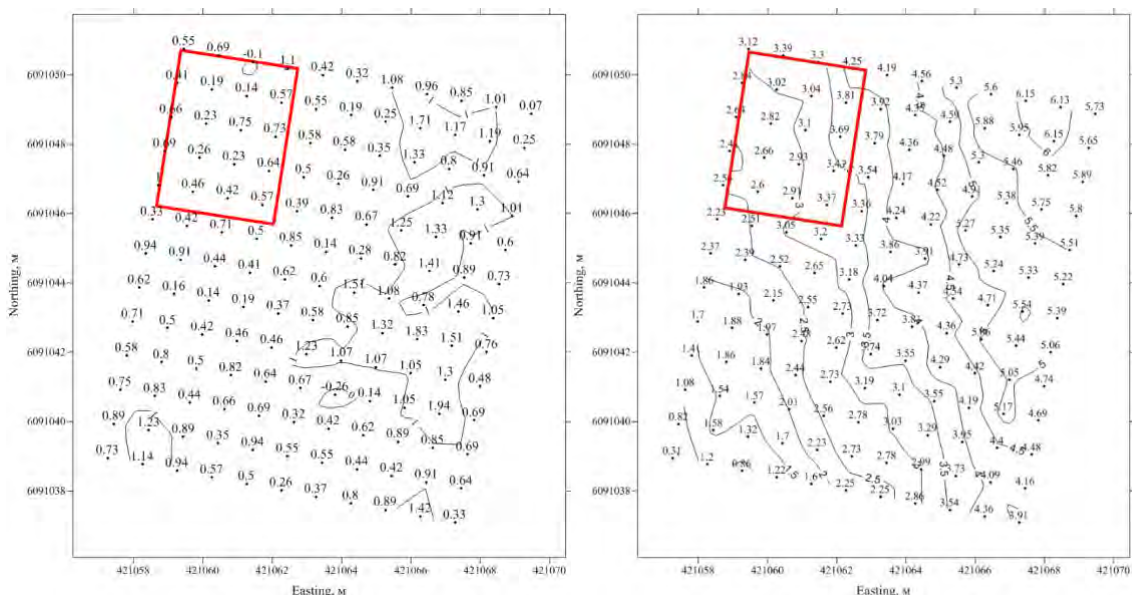


Рисунок 5.4 — Участок детальной съемки (с шагом 1х1 м) под место для абсолютного павильона: карта вертикального градиента (слева) и аномального магнитного поля (справа). Красным обведена выбранная зона установки павильона. Сечение изолиний вертикального градиента 1 нТл/м, аномальной составляющей – 0.5 нТл

В сентябре 2019 г. были подготовлены проекты павильонов обсерватории и основных элементов инфраструктуры. Для электроснабжения магнитометров будет организована низковольтная подсеть (такое решение уже было использовано на геомагнитной обсерватории ГЦ РАН «Климовская» [Соловьев и др., 2016]). Магнитная восприимчивость цементной смеси для закладки фундамента составляла $7,27 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, т.е. смесь относится к очень слабо намагничивающимся материалам [Дортман, 1984] и пригодна для будущего строительства. На рисунке 5.5 изображено место строительства по состоянию на 29 ноября 2019 г.



Рисунок 5.5 — строительная площадка абсолютного (слева) и вариационного (справа) павильонов

Разработка алгоритмов системного анализа для обработки временных рядов геофизических измерений

В 2019 г. было проведено исследование возможности применения методов дискретного математического анализа (ДМА) в задачах анализа геофизических сигналов. В частности, подход, получивший название регрессионных производных, был применен для разработки процедуры регистрации вступления волны цунами по оперативным данным измерения уровня моря от сети автоматизированных постов (АП) Службы предупреждения о цунами (СПЦ). Используемая в СПЦ процедура оценки времени вступления волны разработана в рамках задачи о выделении сигнала на фоне шума на основе критерия: о превышении пороговой скорости изменения уровня моря. Этот алгоритм неоднократно приводил к ложным сигналам о цунами. Увеличение порога не решает данную проблему и может привести к пропуску заметного цунами. Предложено было усовершенствовать процедуру с помощью регрессионных производных.

Пусть $BP[a, b]$ – пространство конечных временных рядов $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ на дискретном отрезке $[a, b]$ с узлами $t_i, i = 1, \dots, N, t_N = b$. Соответствие $x_i = x(t_i)$ превращает $BP[a, b]$ в N -мерное пространство. Роль окрестности узла t_i выполняет нечеткая структура $\delta_{t_i}(t_j)$, выражающая свойство близости к t_i остальных узлов: $\delta_{t_i}(t_j)$ – мера близости узла t_j к узлу t_i . Всегда должно быть:

$$\delta_{t_i}(t_j) \in [0, 1], \delta_{t_i}(t_i) = 1, \quad (5.1)$$

при этом возможны случаи $\delta_{t_i}(t_j) \neq \delta_{t_j}(t_i)$.

При построении регрессионных производных будет использоваться локальная конструкция близости:

$$\delta_{t_i}(t_j) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t_j - t_i|}{r}\right)^p, & |t_j - t_i| \leq r \\ 0, & |t_j - t_i| > r \end{cases}, \quad p > 0$$

С мерой близости $\delta_{t_i}(t_j)$ связывается матрица

$$A = (a_{ij}), \quad a_{ij} = \frac{\delta_{t_i}(t_j)}{\sum_{k=0}^{N-1} \delta_{t_i}(t_k)}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 0, 1, \dots, N-1, \quad \sum_j a_{ij} = 1. \quad (5.2)$$

В нечеткой окрестности узла t_i исходный ряд аппроксимируется линейной функцией $y_i(t)$ – функцией регрессии:

$$y_i(t) = \alpha_i(t - t_i) + \beta_i, \quad j = 1, \dots, N \quad (5.3)$$

где α_i, β_i – коэффициенты регрессии, которые находятся из условия минимума функционала $J(\alpha_i, \beta_i) = n(\sum_j a_{ij}[x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i]^2)$, по j суммирование производится по всем значениям. Значение $J(\alpha_i, \beta_i)$ задает меру близости исходного ряда и функции регрессии (5.3). Условия минимума функционала $J(\alpha_i, \beta_i)$ приводят к системе уравнений

$$\begin{cases} \sum_j a_{ij}(t_j - t_i)[x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i] = 0 \\ \sum_j a_{ij}[x_j - \alpha_i(t_j - t_i) - \beta_i] = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Введем оператор $M_i(y) = \sum_j a_{ij}y_j$, действующий на ряды вида $y = (y_1, \dots, y_N)$, который совпадает с математическим ожиданием дискретной случайной величины $y = (y_1, \dots, y_N)$, принимающей значение y_j с вероятностью a_{ij} . Аналогично, выражение $D_i(t) = M_i(t^2) - M_i(t)^2$ есть дисперсия $D_i(t)$, поэтому она может быть равна 0 только в случае $t_1 = t_2 = \dots = t_N$. Таким образом, в нашем случае $D_i(t) \neq 0$. С помощью оператора $M_i(y)$ решение системы (5.3) выражается в виде:

$$\alpha_i = (D_i(t))^{-1}[M_i(tx) - M_i(t)M_i(x)], \quad (5.5)$$

$$\beta_i = M_i(x) - (D_i(t))^{-1}[M_i(tx) - M_i(t)M_i(x)](M_i(t) - t_i). \quad (5.6)$$

Угловой коэффициент α_i называется регрессионной производной ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ в узле t_i и обозначается $(RD_{[a,b]}x)(t_i)$. Значение β_i называется регрессионным значением ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ в узле t_i и обозначается $(RV_{[a,b]}x)(t_i)$. Регрессионная производная отражает конкуренцию между трендами подъема и спада.

Для ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ построим дискретный ряд $\Phi_x(i)$. Введем параметры локального обзора – натуральные числа h^-, h^+ Фрагментом обзора с номером i , построенного на основе ряда x , назовем его отрезок $I_i(x) = \{x(t_l), l = i - h^-, \dots, i, \dots, i + h^+\}$. Для каждого фрагмента обзора $I_i(x)$ вычислим ряд регрессионных производных RDx . Далее формируем ряд $\Phi_x(i) = |(RD_{[i-h^-, i+h^+]}x)(t_i)|$ значения которого равны абсолютным величинам регрессионных производных в соответствующих точках. Введем параметр

обзора – натуральное Λ . Фрагментом обзора, построенного на основе ряда Φ_x назовем совокупность $\Lambda^i \Phi_x = \{\Phi_x(i - \Lambda), \dots, \Phi_x(i), \dots, \Phi_x(i + \Lambda)\} \in R^{2\Lambda+1}$. Рассмотрим на отрезке $\Lambda(i) = [i - \Lambda, i + \Lambda]$ весовую функцию $\varrho_i(j) > 0$, например, $\varrho_i(j) = \frac{\Lambda+1-|j-i|}{\Lambda+1}$. Определим $\Lambda^+(i) = \{j \in [i, i + \Lambda]: |\Phi_x(j) - \Phi_x(i)| > d\}$, $\Lambda^-(i) = \{j \in [i, i + \Lambda]: |\Phi_x(j) - \Phi_x(i)| \leq d\}$, где параметр $d > 0$ имеет смысл скачка регрессионной производной.

«Аргументом» в пользу того, что в момент t_i не произошло изменения тренда, можно считать величину $\sigma^-(\Lambda, i) = \sum_{j \in \Lambda^-(i)} |\Phi_x(j) - \Phi_x(i)| \varrho_i(j)$. Аналогично, «аргументом» в пользу изменения тренда в точке t_i можно считать величину $\sigma^+(\Lambda, i) = \sum_{j \in \Lambda^+(i)} |\Phi_x(j) - \Phi_x(i)| \varrho_i(j)$. Величина $\sigma^+(\Lambda, k)$ отражает с учетом веса общую «массу» выхода значений $\Phi_x(j)$ за пределы интервала $(\Phi_x(i) - d, \Phi_x(i) + d)$. Аналогичный смысл имеет величина $\sigma^-(\Lambda, k)$ – это общая «масса» значений $\Phi_x(j)$, оставшихся в пределах интервала $(\Phi_x(i) - d, \Phi_x(i) + d)$. Сравнение:

$$\mu(t_i) \equiv \mu(i) = \frac{\sigma^+(\Lambda, i) - \sigma^-(\Lambda, i)}{\max\{\sigma^-(\Lambda, i), \sigma^+(\Lambda, i)\}} \in [-1, 1] \quad (5.7)$$

может рассматриваться как нечеткая мера смены тренда в момент времени t_i . При помощи меры $\mu(t_i)$ можно ввести критерий смены тренда: « t_i » – точка смены тренда уровня не ниже α , если $\mu(t_i) > \alpha$. Соответственно, если $\mu(t_i) \leq \alpha$, то следует считать, что в точке t_i изменения тренда не наблюдалось. Однако условие $\mu(t_i) > \alpha$ необходимо дополнить условием «изолированности» – на отрезках $[i - \Lambda, i - 1]$ и $[i + 1, i + \Lambda]$ совокупная мера смены тренда должна быть невелика. Для этого введем дополнительные односторонние меры $\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i)$ и $\mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i)$, соответственно, левую и правую:

$$\mathcal{L}_\alpha \Phi_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i-\Lambda, i-1]} \mu_\alpha(j) \varrho_i(j)}{\sum_{j \in [i-\Lambda, i-1]} \varrho_i(j)}, \mathcal{R}_\alpha \Phi_x(i) = \frac{\sum_{j \in [i+1, i+\Lambda]} \mu_\alpha(j) \delta_k(j)}{\sum_{j \in [i+1, i+\Lambda]} \delta_k(j)} \quad (5.8)$$

Эти меры — знакопеременные функции принадлежности t_i к нечеткому множеству точек, в которых наблюдается смена тренда слева и справа соответственно. Они позволяют сформировать процедуру определения точек вступления волны по дискретной записи уровня моря $x = \{x(t_l), l = 1, 2, \dots\}$. Пример записи слабого цунами приведен на рисунке 5.2. При обработке записи слабого цунами можно воспользоваться приемом «выпрямления записи» [Гвишиани и др., 2008]. Перейдем от исходного ряда $x = \{x(t_l), l = 1, \dots, N\}$ (записи уровня моря) к его выпрямлению $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \{\bar{x}(t_l) = \sum_{k=l-\Lambda}^{k=l+\Lambda-1} |x(t_{l+1}) - x(t_l)|, l = \Lambda + 1, \dots, N - \Lambda\}. \quad (5.9)$$

Для выпрямления $\bar{x}$ амплитуда на участке записи, содержащей составляющую волн цунами, существенно выше амплитуды «шума», что наблюдается на рисунке 5.2. Затем на вход процедуры вместо исходной записи уровня моря x подается ее выпрямление $\bar{x}$.

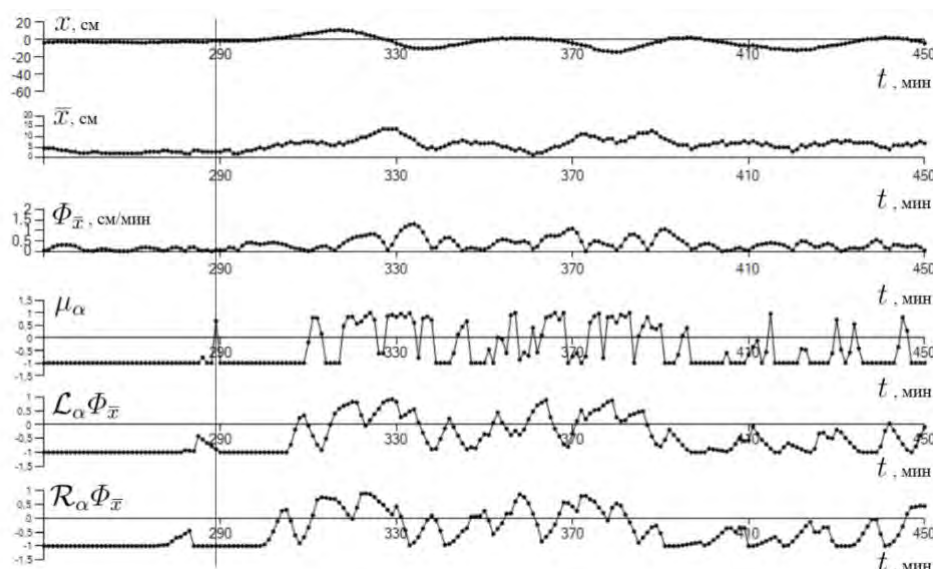


Рисунок 5.6 — Результат вычисления характеристик $\bar{x}$, $\Phi_{\bar{x}}(i)$, $\mu_{\alpha}(i)$, $\mathcal{L}_{\alpha}\Phi_{\bar{x}}(i)$, $\mathcal{R}_{\alpha}\Phi_{\bar{x}}(i)$ для записи уровня моря при проявлении слабого цунами от Великого восточно-японского землетрясения. Вертикальная линия обозначает результат вычисления времени вступления волны

Для изучения возможности использования процедуры использовались записи, полученные 18 береговыми АП на дальневосточном побережье России в период Великого восточно-японского землетрясения (11 марта 2011 г.). Также использовались записи цунами от землетрясения в районе островов Самоа (29 сентября 2009 г.) и землетрясения у берегов Чили (27 февраля 2010 г.). При анализе записей уровня моря приливная составляющая удалялась на основе предвычислений. Аппарат регрессионных производных, как и другие средства ДМА, имеет универсальный характер и не требует при своем применении к нерегулярным дискретным рядам дополнительных статистических гипотез. Он может использоваться как в задачах, аналогичных описанной, так и в более сложных задачах комплексного изучения геофизической информации.

Сбор данных российских сетей геофизических наблюдений

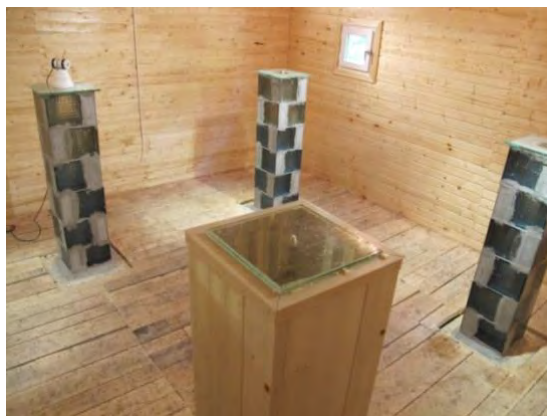
В 2019 г. организовано поступление данных геомагнитной обсерватории INTERMAGNET «Алма-Ата» (IAGA-код AAA) в ГЦ РАН. Данная обсерватория появилась как подразделение ИЗМИРАН в 1950-х с целью мониторинга магнитосферных и ионосферных процессов для обеспечения безопасности полетов космических аппаратов и

надежности радиосвязи с ними. Включение обсерватории «Алма-Ата» в обсерваторский сегмент РФ и ближнего зарубежья позволило его расширение на территорию центральной Евразии, давая возможность проведения исследований геомагнитной активности в межрегиональных масштабах, а также других фундаментальных исследований.

В результате сотрудничества ГЦ РАН и ИГИС НАН РА была создана и развивается магнитная обсерватория «Гюлагарак» (IAGA-код GLK), расположенная в Армении [Гвишиани и др., 2018]. В 2019 г. на ее территории было завершено строительство обсерваторских павильонов из современных композитных стройматериалов (рисунок 5.7а). В абсолютном павильоне установлены скалярный протонный оверхаузеровский магнитометр POS-1 (рисунок 5.7б, слева на постаменте) и деклинометр/инклинометр для ручных измерений абсолютных значений компонент магнитного поля Земли. Сотрудники обсерватории прошли двухдневный курс обучения абсолютным измерениям. Построена визирная цель для абсолютных измерений (рисунок 5.7в) и определён её азимут. После установки полного комплекта магнитометрической аппаратуры магнитная обсерватория «Гюлагарак» станет единственной точкой обсерваторских наблюдений геомагнитного поля на обширной территории Закавказья (ближайшая магнитная обсерватория расположена в 1200 км). Развитие этой обсерватории продвигает геофизические исследования в Ближнем зарубежье, вносит значительный вклад в изучение главного магнитного поля и позволяет получить современные данные о геомагнитной активности в регионе.



а)



б)



в)

Рисунок 5.7 — Магнитная обсерватория «Гюлагарак»: а) внешний вид павильона абсолютных измерений; б) приборные постаменты; в) визирная цель

В 2019 г. ГЦ РАН при содействии ИДГ РАН велись работы по развёртыванию геомагнитной обсерватории стандарта INTERMAGNET на базе геофизической

обсерватории «Михнево» (Ступинский район Московской области). В штатном магнитометрическом павильоне обсерватории был установлен векторный магнитометр FGE, данные которого в оперативном режиме передаются в ГЦ РАН. Датчик магнитометра вместе с датчиком штатного обсерваторского магнитометра LEMI-018 приведен на рисунке 5.8 слева. Анализ вариационных данных магнитометра FGE за два месяца и их сопоставление с данными штатного векторного магнитометра ГФО «Михнево» LEMI-018 и векторного магнитометра ближайшей к ГФО «Михнево» магнитной обсерватории «Москва» (ИЗМИРАН, IAGA-код MOS) позволил сделать предварительный вывод о пригодности размещения магнитной обсерватории в границах территории ГФО «Михнево». Сравнение данных станций «Михнево» и «Москва» за 28–29 апреля 2019 г. приведено на рисунке 5.8 в середине и справа; видно, что динамика суточного хода в целом совпадает. Новая обсерватория «Михнево» в перспективе предоставит возможность поддержки и замены обсерватории «Москва», данные которой всё больше и больше подвергаются влиянию техногенных возмущений.

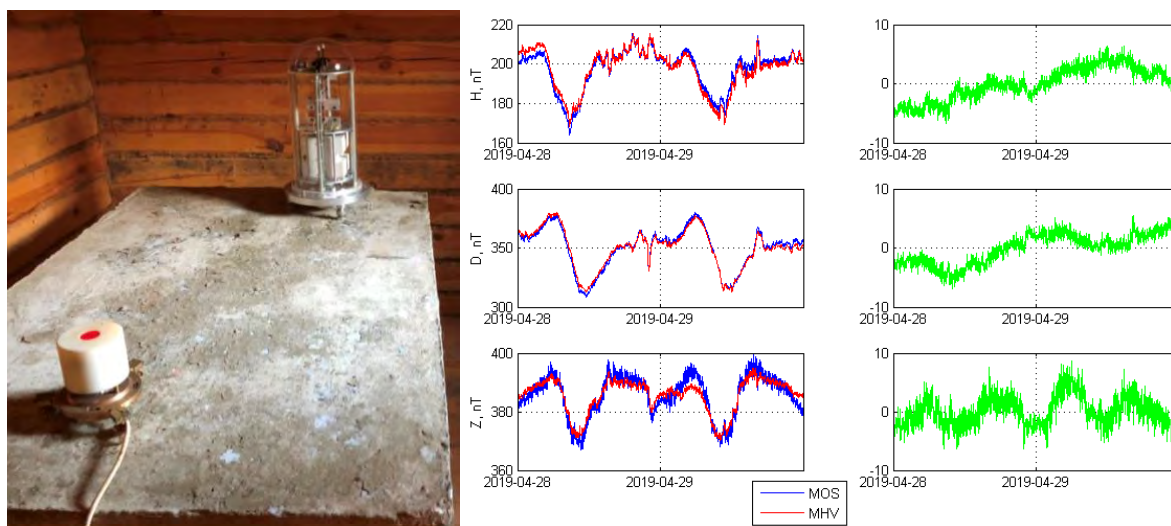


Рисунок 5.8 — Датчик векторного магнитометра FGE в магнитометрическом павильоне ГФО «Михнево» (слева на дальнем плане) и датчик штатного векторного магнитометра ГФО «Михнево» LEMI-018 (слева на переднем плане) и сравнение магнитных вариаций от магнитометра FGE, установленного на ГФО «Михнево» и от магнитометра магнитной обсерватории «Москва»: данные вариаций компонент H , D , Z с вычтенными средними значениями (в середине) и разности соответствующих вариаций (справа, изображены зелёным)

Список использованных источников

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. (2008), Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания, *Доклады Академии наук*, Т. 421, № 1, сс. 101—105.

Гвишиани А. Д., Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Краснопёров Р. И., Груднев А. А., Кудин Д. В., Карапетян Дж. К., Симонян А. О. (2018), Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье, *Вестник ОНЗ РАН*, Т. 10, NZ4001. doi: 10.2205/2018NZ000357

Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. — М., 1984.

Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Красноперов Р. И., Груднев А. А., Хохлов А. В. (2016), Новая геомагнитная обсерватория «Климовская», *Геомагнетизм и аэрономия*, Т. 56, № 3, сс. 365—377, doi: 10.1134/S0016793216030154

Jankowsky J., Sucksdorff C. Guide for magnetic measurements and observatory practice. — Warsaw, 1996.

6. Методы дискретной математики в задачах цифрового анализа геофизических данных на суперкомпьютере. Повышение точности прогноза состояния полярной ионосферы на основе численных моделей с применением методов ассимиляции данных

Номер госрегистрации: АААА-А19-119093090075-0

Руководитель: академик РАН А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: д.ф.-м.н. А. А. Лушников

Ответственный исполнитель: чл.-корр. РАН П. Н. Шебалин

Ответственный исполнитель: д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

Основные цели и задачи проекта в 2019 году:

- 1) Исследование эволюции конечных графов и циклизации в случайных графах. Применение полученных результатов к задачам гелеобразования. Оценка влияния аэрозолей на затухание электромагнитных волн в нижних слоях атмосферы.
- 2) Построение стохастической модели сейсмичности, улучшающей модель ETAS.
- 3) Валидация численной модели глобального распределения ионосферного электрического потенциала по наблюдениям SuperDARN.

6.1. Решение ряда задач образования циклов в случайных графах

Множество точек (вершин), случайным образом соединенных линиями (ребрами) образуют граф. Несмотря на простоту объекта графы естественным образом моделируют целый ряд исключительно важных процессов. Например, распространение эпидемий в следствие случайных контактов зараженных и незараженных особей приводит к распространению инфекции. Такой контакт двух особей может быть представлен линией, соединяющей две точки (две особи). Совершенно ясно, что также создаются кластеры знакомых людей, если люди случайным образом подходят друг к другу и знакомятся. Так толпа первоначально незнакомых людей превращается в множество кластеров (подмножество людей уже познакомившихся друг с другом). Таким же образом формируются связи в Интернете, по такому принципу развиваются сети дорог, также формируются и нейросети.

Очевидна также связь случайного графа с задачами коалесценции. Слияние двух объектов и образование нового объекта, размер (число вершин) которого равна сумме размеров материнских продуктов. Действительно, появление нового ребра в графе ведет к появлению одного кластера, размер которого равно сумме размеров двух сливающихся кластеров.

Задача образования гигантской компоненты (геля) позволяет оценить значение этого явления в теории климатообразования.

Оценка влияния аэрозолей на затухание электромагнитных волн в нижних слоях атмосферы имеет значение для калибровки дистанционной пассивной локации.

6.2. Создание стохастической модели сейсмичности с экспоненциальным распределением продуктивности землетрясений

Наиболее популярная в настоящий момент стохастическая модель сейсмичности ETAS существенно завышает количество событий в афтершоковых последовательностях, поэтому требуется построение альтернативной стохастической модели сейсмичности.

Важной особенностью сейсмичности является возникновение пространственно-временных скоплений, демонстрирующих взаимодействие землетрясений друг с другом. Сосредоточив внимание на том, как последовательность землетрясений развивается в пространстве и времени, мы можем рассматривать каждое событие как пусковой механизм для нарушения состояния стресса в некоторой области вокруг события. Зоны такого возмущения пересекаются во времени и пространстве, и каждое новое событие можно рассматривать как «потомство» всех предшествующих землетрясений. Для пуассоновского процесса такое эпидемическое поведение может быть описано как суперпозиция процессов, инициируемых каждым событием. С момента появления эпидемических моделей сейсмичности производительность стала основной проблемой, поскольку она определяет увеличение скорости сейсмичности после каждого землетрясения. В этих моделях число событий, вызванных землетрясением магнитуды m , считается изменяющимся как Пуассоновский процесс со скоростью $\langle N(m) \rangle = K10^{\alpha m}$. Значение α оценивалось в диапазоне от 0,5 до 2. Это значение обычно близко к наблюдаемому значению b , наклону распределения землетрясений по размерам. Однако эти оценки остаются неопределенными из-за сложности выделения относительных вкладов последовательных событий в последовательности. Эта задача остается на ранней стадии, несмотря на разнообразие методов декластеризации, применявшихся в прошлом. Два стохастических подхода были предложены для поиска причинных связей в каскадах вызванной сейсмичности. Первый подход заключается в отделении разветвленной структуры землетрясений от фоновой скорости с использованием итерационного алгоритма, основанного на оценке максимального правдоподобия параметров эпидемической модели сейсмичности ETAS. Второй подход является независимым от модели. Предполагается линейный вклад каждого землетрясения в общую сейсмичность. Эти два подхода предполагают, что каждое новое

землетрясение является «афтершоком» всех предшествующих событий, и цель состоит в том, чтобы оценить влияние каждого предшествующего события на каждое последующее событие с точки зрения вероятности. Альтернативный подход направлен непосредственно на рассмотрение дерева событий, в котором каждое событие может быть «родителем» нескольких более поздних событий, но оно может быть «потомком» только одного более раннего события. Технически «родитель» находится как «ближайший сосед», используя функции близости в областях времени-пространства-магнитуды. Здесь мы будем называть «родительскими» события, запускающие события, а их «потомками» – вызванные события.

Все эти методы подтверждают зависимость производительности от величины запускающего события. Тем не менее, было обнаружено, что в пределах этой зависимости существует огромное количество отклоняющихся событий в сейсмических каталогах. Недавно было обнаружено, что эта переменность может быть описана экспоненциальным распределением с максимумом в 0. Этот результат был получен для глобальной статистики числа подземных толчков от землетрясений магнитудой 6,5 и выше. Учитывались вспомогательные толчки выше порога, определяемого как величина основного удара минус 2.

Здесь мы изучаем распределение продуктивности в дереве подземных толчков для трех крупнейших землетрясений последнего десятилетия: 11 марта 2011 г., $M_w = 9,1$, землетрясение Тохоку; 27 февраля 2010 г., $M_w = 8,8$, землетрясение в Чили; 11 апреля 2012 г., $M_m = 8,6$, землетрясение в Индонезии. Мы находим, что для каждой последовательности распределение производительности также стремится к экспоненциальному виду. Таким образом, экспоненциальное распределение продуктивности землетрясений представляется общим свойством сейсмичности. Экспоненциальная форма распределения действительного числа инициируемых событий на триггерное событие противоречит ожидаемой форме распределения Пуассона. Чтобы лучше понять эту проблему, было проведено сравнение двух моделей для трех афтершоковых последовательностей.

6.3. Исследование сходимости итерационного метода, применяемого в численной модели при расчете глобального распределения ионосферных электрических полей

Модель основана на численном решении уравнения непрерывности электрического тока в ионосферно–магнитосферной системе. В общем случае источником электрического потенциала в ионосфере являются продольные токи магнитосферного происхождения. Поскольку для высокоширотной ионосферы характерно сильно

неоднородное распределение проводимости вследствие высыпаний авроральных частиц из магнитосферы, исследован вопрос о скорости сходимости при уменьшении пространственных масштабов неоднородностей в распределении проводимости и продольных токов, включая те, которые влекут за собой разрыв коэффициентов при старших производных в системе эллиптических дифференциальных уравнений. Серия численных экспериментов показала, что учет специфических локальных особенностей в распределении параметров задачи при сохранении времени расчета в пределах заданных лимитов, может быть достигнут за счет учащения сетки в глобальном масштабе вплоть до шага в десятые доли градуса. Более мелкомасштабные возмущения моделируются на основе краевой задачи для подобласти с использованием граничных условий, определенных из решения общей задачи. Численные оценки обоснованы сравнением с экспериментальными данными (радарные измерения). На рис. 6.1 показано распределение ионосферного электрического потенциала и векторы скорости конвекции по данным системы радаров SuperDARN (слева), модельные распределения изолиний потенциала (в центре) и разность между экспериментальными и модельными распределениями (справа). Серым цветом показаны области, где расхождение больше 5 кВ.

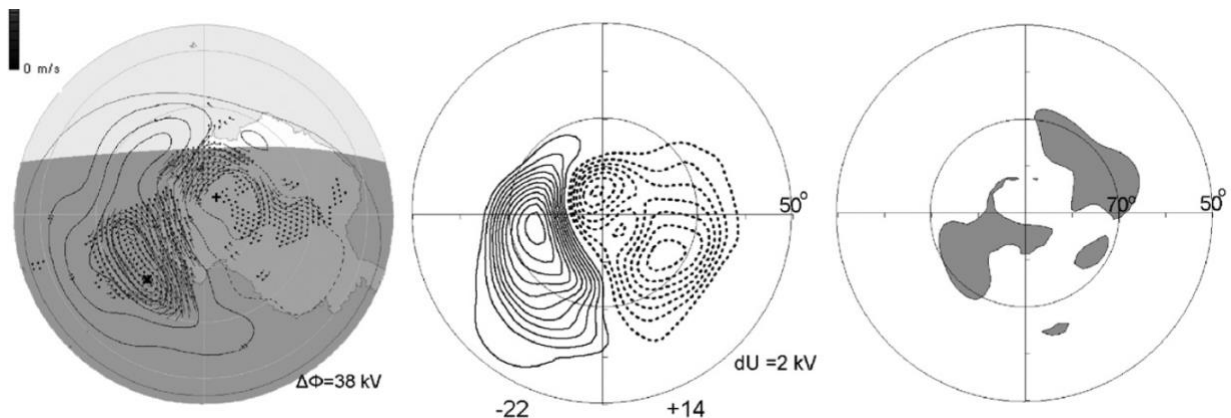


Рисунок 6.1 — Пример сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования распределения электрического потенциала в высокоширотной ионосфере

В задачи работы входило исследование пределов пространственного разрешения численной модели глобального распределения ионосферных электрических полей (описание приведено в предыдущих отчетах) и расчет конфигурации эквипотенциалей в условиях взаимодействия магнитосферы и солнечного ветра с нулевым межпланетным магнитным полем.

При длительном воздействии межпланетного магнитного поля (ММП) с компонентами $B_z=B_y=0$ взаимодействие магнитосферы и солнечного ветра (СВ)

осуществляется в основном за счет вязкого трения. Такое состояние магнитосферы можно рассматривать как базовое и как нулевой уровень отсчета при анализе возмущений. Минимум взаимодействия при следующих условиях: скорость $SV < 400$ км/с; величина вертикальной компоненты ММП меньше 2 нТ; величина общей интенсивности ММП меньше 5 нТ; эти условия выполняются в течение 2–4 часов.

Заключение

Задача образования гигантской компоненты в конечной системе эквивалентна задаче о полимеризации (образование геля) в мелких аэрозольных частицах. Учитывая тот факт, что почти все вторичные аэрозоли состоят из полимерных образований, можно оценить, какое значение играет это явление в теории климатообразования: полимеризация тесно связана с облакообразующей активностью мелких частиц.

Рассмотрены основные химические реакции, протекающие в нижней ионосфере Земли с участием ридберговских состояний молекул O_2 , N_2 и NO . К ним относятся реакции диссоциативной рекомбинации, ассоциативной ионизации, обмена и тушения ридберговских состояний, приводящие к образованию неравновесной двухтемпературной плазмы. Наиболее важной реакцией в D и E слоях ионосферы является реакция I–перемешивания, которая ответственна за формирование квантовых свойств среды распространения радиоволн. Это обусловлено образованием в плазме орбитально вырожденных состояний ридберговских комплексов, частоты переходов между которыми являются резонансными по отношению к несущим частотам спутниковых сигналов GPS.

Дано объяснение физической причины временной задержки спутникового сигнала, приводящей к ошибкам позиционирования. Предложен квантовый подход, который осуществляет переход от традиционного представления о распространении радиоволн к движению соответствующих им фотонов. Тогда эффективное время задержки при резонансном рассеянии фотона будет определяться характерным временем жизни промежуточных автоионизационных состояний ридберговских комплексов, находящихся в нейтральной среде. Величина времени жизни обусловлена проявлением сильной не адиабатической связи электронного и ядерного движений в промежуточных состояниях комплекса, которое не зависит от напряженности внешнего поля, создаваемого GPS передатчиком.

Полученные результаты представляют большой интерес для ряда современных направлений исследований: влияние грозовой активности на работу GPS, структура и свойства плазменных неоднородностей в ионосфере, определение состава атмосферы далеких экзопланет.

Действительно, при грозовой активности происходит воздействие электрических

полей облаков на плазмохимические процессы в D слое ионосферы, что должно приводить к заметному увеличению ошибок позиционирования глобальных спутниковых систем. Это связано с тем, что заряженные униполярно после разрядов линейной молнии электрические поля облаков приводят на высотах 90–100 км к резкому возрастанию концентрации электронов (на два-три порядка).

Не менее важным является то обстоятельство, что недавно австралийские ученые с помощью радиотелескопа MWA обнаружили в магнитосфере плазменные трубы, которые формируются вдоль магнитных силовых линий Земли и расположены на высотах 450–700 км выше D и E слоев ионосферы. Эти трубы представляют собой плазменные неоднородности в ионосфере, которые могут существенно влиять на ошибки позиционирования спутниковой системы GPS в различных географических областях на поверхности Земли. Однако их природа еще не достаточно изучена и требует специального рассмотрения.

Наиболее популярная стохастическая модель сейсмичности ETAS предсказывает пуассоновское распределение порождаемости землетрясения с ярко выраженной ненулевой модой. Построена альтернативная модель, учитывающая обнаруженное экспоненциальное распределение. Было проведено сравнение двух моделей на трех афтершоковых последовательностях. Параметры моделей оценивались по первым 48 часам последовательностей. Далее по каждой из моделей был построен набор синтетических каталогов землетрясений и проведено сравнение средних кумулятивных распределений времен событий. Модель ETAS во всех трех случаях дает сильно завышенную оценку количества события в интервале от 48 часов до 365 дней, в то время как предложенная альтернативная модель дает удовлетворительное кумулятивное распределение времен для этого интервала. На основании этого делается вывод, что экспоненциальное распределение является важным свойством сейсмического процесса, хотя пока не представляется возможным предложить правдоподобный механизм.

Увеличено пространственное разрешение численной модели глобального распределения электрического потенциала в ионосфере Земли. С помощью модели рассчитаны распределения потенциала при экстремально спокойных геомагнитных условиях. Выявлены мелкомасштабные флуктуации электрических полей, обусловленные локализованными продольными токами и неоднородностями электрической проводимости ионосферы вследствие высыпаний авроральных электронов на ночной стороне. расчета процессов коагуляции и гелеобразования.

По результатам 2019 г. получены 2 Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и опубликовано 3 статьи.

7. Разработка аналитической геоинформационной системы для формирования базы данных и цифровых карт для исследования месторождений стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации

Номер госрегистрации: АААА-А19-119093090072-9

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

Ответственный исполнитель: учёный секретарь, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёров

7.1. Актуальность исследований

Наблюдаемый в настоящее время скачкообразный рост объемов данных в области наук о Земле требует создания и внедрения современных инструментов их обработки, анализа и представления. В особенности это касается геолого-геофизических данных, имеющих географическую привязку. Современные геоинформационные системы (ГИС) являются одним из основных инструментов для анализа и представления пространственных данных по наукам о Земле. В настоящее время создан и успешно функционирует целый ряд специализированных ГИС-сервисов для решения перечисленных задач.

Несмотря на их многообразие в области геофизики в настоящее время существует ограниченное число эффективных инструментов, которые, используя современные геоинформационные и сетевые технологии, объединяют междисциплинарные геолого-геофизические данные и предоставляют широкий спектр инструментов для их комплексного анализа. Существующие ГИС, имеющие необходимую функциональность, как правило, реализованы в виде пользовательского программного обеспечения (напр., ArcGIS, MapInfo, ГИС Панорама, ГИС Интегро, gvSIG и др.) или сетевых сервисов, предоставляемых на коммерческой основе (ArcGIS Online). При этом, следует учитывать современные тенденции в науках о данных, включая концепцию т.н. «больших данных» (Big Data).

7.2. Краткая формулировка важнейших результатов

Цель проекта — создание аналитической геоинформационной системы (ГИС) для интеграции данных о месторождениях стратегических и высокотехнологичных металлов на основе современных методов геоинформатики и системного анализа. Создание единой базы геопро пространственных данных для хранения информации о месторождениях,

предоставляемых участниками Программы. Обеспечение удобного и оперативного доступа к базе современными ГИС-средствами.

Проведена модернизация тематического геопортала «Аналитическая ГИС для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России» (<http://geology-gis.gcras.ru/>). Основой геопортала является веб-ориентированное клиентское приложение, реализованное на базе программной платформы ArcGIS Web App Builder. Функционал приложения включает как стандартные инструменты для работы с пространственными данными (масштабирование, измерение расстояний, печать, выбор базовой карты, поиск), так и дополнительные инструменты интеллектуального анализа, собранные в единый набор «Геообработка».

Предлагаемый набор инструментов геообработки создан на основе оригинальных алгоритмов кластерного анализа, разработанных в ГЦ РАН. Интерфейс приложения является гибким и настраивается администратором геопортала в зависимости от решаемых задач. Созданное приложение также предоставляет доступ к сетевым картографическим сервисам, поддерживаемым сторонними организациями, с помощью стандартных протоколов обмена пространственной информацией (напр., WMS, KML и др.). Приложение имеет гибкую архитектуру и легко масштабируется, в зависимости от реализуемых задач (рис. 7.1).

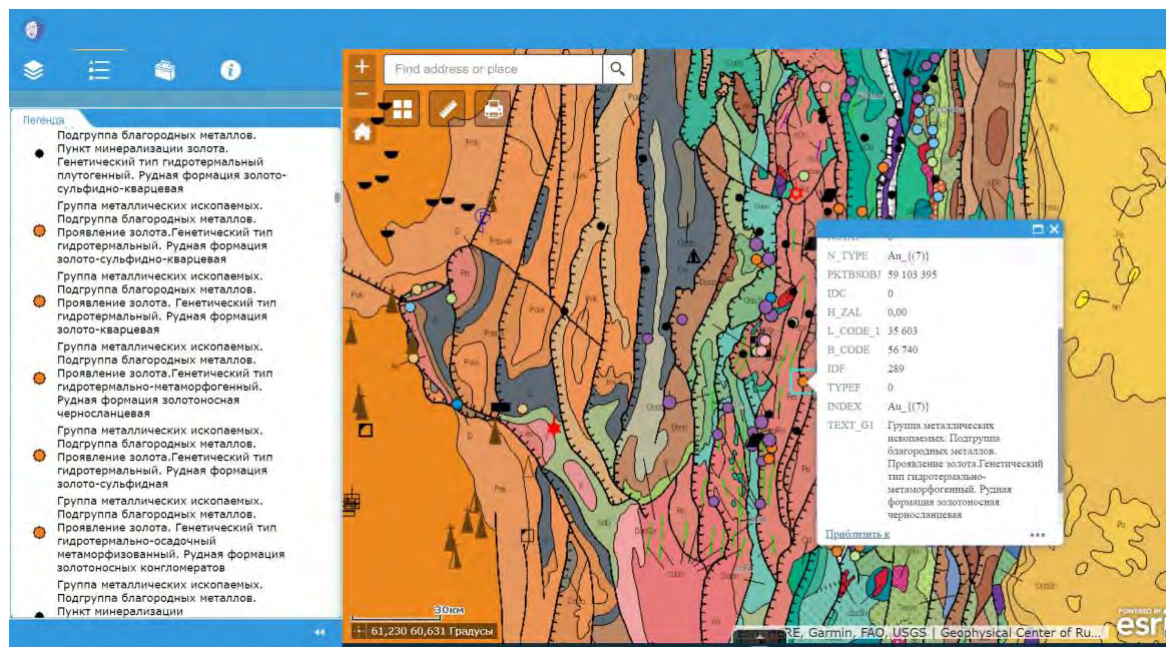


Рисунок 7.1 — Карта полезных ископаемых масштаба 1:1000 000 (лист Р-40, ВСЕГЕИ). Представление средствами картографического приложения (<http://geology-gis.gcras.ru/>)

7.3. База геопространственных данных, собранных в рамках проекта

В рамках работ по предыдущим этапам была сформирована регулярно пополняемая база геопространственных данных (геоданных), включающая геологические и минерагенические карты, карты месторождений полезных ископаемых, карты моделей гравитационного поля и др. информацию. В базу были включены карты гравитационного поля (аномалии в свободном воздухе, аномалии Буге, вертикальные градиенты гравитационного поля) высокого разрешения и изостатических аномалий гравитационного поля для территории Российской Федерации, а также значительной сопредельной территории. Карты оформлены в виде слоев ГИС и объединены в картографические сервисы, опубликованные на ГИС-сервере ГЦ РАН.

Обновленный геопортал также предоставляет доступ к многочисленным сетевым геолого-геофизическим ресурсам, поддерживаемым сторонними организациями (напр. ФГБУ «ВСЕГЕИ»). В частности, в 2019 г. в общую базу были добавлены следующие сервисы: «Карта перспективных объектов с оцененными прогнозными ресурсами категории Р3 и металлогеническим потенциалом», «Карта перспективных объектов Р1 и Р2», «Карта петротипов территории Российской Федерации».

Карта петротипов характеризует типичные комплексы пород, выделяемые по минеральному составу и отчасти по структуре. Карты прогнозных ресурсов показывают возможное количество полезных ископаемых в геологически слабо изученных участках земной коры и гидросферы. Прогнозные ресурсы твёрдых полезных ископаемых оцениваются в границах бассейнов, крупных районов, рудных узлов, рудных полей и отдельных месторождений, отдельно по каждому виду полезного ископаемого и направлению их возможного промышленного использования. По степени обоснованности они подразделяются на 3 категории: Р1, Р2 и Р3. Прогнозные ресурсы категории Р1 отражают возможность прироста запасов за счёт расширения площадей распространения тел полезных ископаемых за контуром подсчёта запасов по категории С2 или обнаружения новых тел полезных ископаемых на разведанных, разведываемых, а также выявленных при поисково-оценочных работах месторождениях. Прогнозные ресурсы категории Р2 учитывают возможность обнаружения в бассейне, районе, рудном узле, рудном поле новых месторождений полезных ископаемых. Прогнозные ресурсы категории Р3 отражают лишь потенциальную возможность обнаружения новых месторождений на основании благоприятных стратиграфических, литологических, тектонических и палеогеографических предпосылок.

Сервисы созданы и поддерживаются ФГБУ «ВСЕГЕИ» на основе результатов проведения работ по Государственному геологическому картированию масштаба

1:1 000 000 и 1:200 000. Так, в состав карты прогнозных ресурсов категории РЗ включена база данных по более чем 2200 объектам, из которых более 900 апробировано.

Также были добавлен набор листов Государственной геологической карты РФ масштаба 1:1 000 000 Уральской серии (третье поколение), которые составлены на основе обобщения Госгеолкарт масштабов 1:1 000 000 (второе поколение) и 1:200 000 (первое и второе поколение). Листы Уральской серии расположены между 54° и 66° в.д., и между 48° и 68° с.ш. Схема расположения представлена на изображении ниже (рис. 7.2а), также, как и пример расположения полезных ископаемых (лист Р-41) (рис. 7.2б,в).

Информация на картах полезных ископаемых была разделана по группам: «Горючие», «Металлические», «Неметаллические», «Соли», «Полезные воды», которые в свою очередь подразделяются на подгруппы и виды. Также условные обозначения разделены по размерам месторождений: «Крупные», «Средние», «Малые», «Проявления», «Пункты минерализации». На площадях листов выявлены: многочисленные промышленные месторождения нефти, газа, газоконденсата, железных руд, редких, цветных и благородных металлов, платины, золота, алюминия, алмазов, натриевых, магниевых и калийных солей, минеральных промышленных вод, строительных материалов. За счет данных карт была обновлена база данных в разделе «Геология».

Были обработаны следующие листы карт:

М-40—41 (Оренбург) [*Кваснюк и Чечулина, 2013; Лядский и др., 2013*];

Н-41 (Челябинск) [*Шох и Орлов, 2013; Пужаков и др., 2013*];

Н-40 (Уфа) [*Князева и Айдаров, 2013; Князев и др., 2013*];

О-40 (Пермь) [*Кириллов, 2015; Водолазская и др., 2015*];

О-41 (Екатеринбург) [*Петров и Жиганов, 2011; Петров и др., 2011*];

Р-41 (Ивдель) [*Ковригина и др., 2007; Брадучан и др., 2007*];

Р-40 (Североуральск) [*Курзанов и др., 2005; Водолазская и др., 2005*];

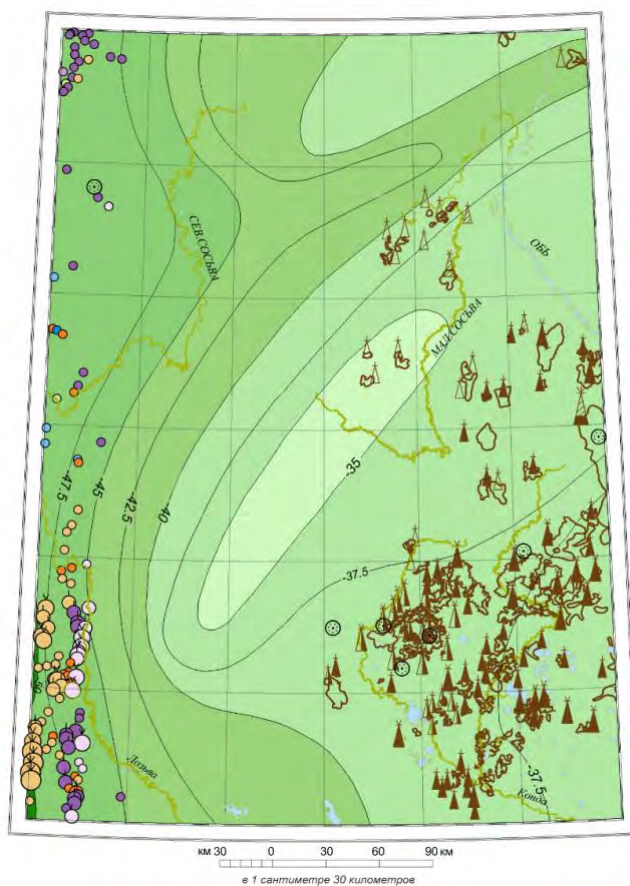
Q-41 (Воркута) [*Шишкин и др., 2007а,б*];

Q-40 (Печора) [*Михайлов и др., 2013; Водолазская и др., 2013*].

Схема расположения листов
Уральской серии



а)



б)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Полезное ископаемое	Ранг месторождения			Проявление
	Крупное	Среднее	Малое	
Железо				•
Марганец		○	○	○
Полиметаллические руды: титана, титана и циркония				○
Хром				○
Алюминий	○	○	○	○
Медь				○
Медь, цинк				○
Свинец				○
Золото				○
Нефть		▲	▲	▲
Нефть, газ		▲	▲	▲
Газ				▲
Конденсат и газоконденсат		▲	▲	▲

Интервалы абсолютных отметок поверхности Мохоровичича, км

- < -50
- 45 - (-50)
- 40 - (-45)
- 35 - (-40)
- > -35

-45,0 - изогипсы поверхности Мохоровичича, км

▲ уникальное нефтегазоконденсатное Красноспининское месторождение

○ контуры площадей месторождений УВ

в)

Рисунок 7.2 — Листы карт Уральской серии: а) Схема расположения листов Уральской серии; б) Расположение главнейших полезных ископаемых территории

7.3 Заключение

Созданная ГИС представляет собой удобный и гибкий инструмент для эффективной работы с разнородной пространственной информацией по геологии и геофизике. Картографическое приложение и тематический геопортал реализованы на основе клиент-серверного подхода, который в настоящее время является основным при создании современных ГИС.

База геоданных проекта сформирована на основе актуальных данных о геологическом строении и месторождениях полезных ископаемых отдельных регионов, а также современных геофизических моделей. При наполнении тематической базы геоданных использованы сетевые картографические сервисы, предусматривающие распределенное хранение самих данных. Публикация данных в формате сетевых картографических сервисов на сервере также позволяет эффективно их использовать при формировании сторонних ГИС-сервисов. Созданная ГИС позволит исследователям проводить комплексный анализ геолого-геофизической информации, используя широкий набор инструментов геообработки без необходимости использования дополнительного программного обеспечения.

В ходе работы над проектом в 2019 г. были подключены три готовых сервиса ВСЕГЕИ «Карта перспективных объектов с оцененными прогнозными ресурсами категории РЗ и металлогеническим потенциалом», «Карта перспективных объектов Р1 и Р2», «Карта петротипов территории Российской Федерации», а также было добавлено 9 карт полезных ископаемых Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Для каждой карты был произведен процесс создания базы данных условных обозначений и присвоения символов объектам карт полезных ископаемых.

Список использованных источников

Förste C., Bruinsma S., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J., Flechtner F. et al (2014), EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *GFZ Data Services*. doi: 10.5880/icgem.2015.1

Kaban M. (2001), A Gravity Model of the North Eurasia Crust and Upper Mantle: 1. Mantle and Isostatic Residual Gravity Anomalies, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 3, N 2, 143—163, doi: 10.2205/2001ES000062

Kaban M., Schwintzer P., Reigber Ch., (2004), A new isostatic model of the lithosphere and gravity field, *Journal of Geodesy*, 78, 368—385, doi: 10.1007/s00190-004-0401-6

Брадучан Ю. В., Волобуев Е. А., Воронин А. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Р-41 (Ивдель). Объяснительная записка. — СПб., 2007.

Водолазская В. П., Иванов В. Н., Петров Г. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Р-40 (Североуральск). Объяснительная записка. — СПб., 2005.

Водолазская В. П., Опаренкова Л. И., Зархидзе Д. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Q-40 (Печора). Объяснительная записка. — СПб., 2013.

Водолазская В. П., Тетерин И. П., Кириллов В. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист О-40 (Пермь). Объяснительная записка. — СПб., 2015.

Кваснюк Л. Н., Чечулина Ю. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист М-40 (Оренбург) с клапаном М-41. Карта полезных ископаемых. — СПб., 2015.

Кириллов В. А., Стряпунина Е. В., Водолазская В. П., Жиганов А. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист М-40 (Пермь). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2015.

Князева О. Ю., Айдаров Э. М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист N-40 (Уфа). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2013.

Князев Ю. Г., Князева О. Ю., Сначев В. И., и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист N-40 (Уфа). Объяснительная записка. — СПб., 2013.

Ковригина Е. К., Лебедева Е. А., Сай Т. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Р-41 (Ивдель). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2007.

Курзанов И. Ю., Шумилов А. В., Стороженко Е. В., Полякова Н. Ф. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Р-40 (Североуральск). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2005.

Лядский П. В., Кваснюк Л. Н., Жданов А. В. и др. Государственная геологическая

карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист М-40 (Оренбург) с клапаном М-41. Объяснительная записка. — СПб., 2013.

Михайлов В. И., Водолазская В. П., Белонина Л. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Q-40 (Печора). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2013.

Петров Г. А., Жиганов А. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист О-41 (Екатеринбург). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2011.

Петров Г. А., Жиганов А. А., Стефановский В. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист О-41 (Екатеринбург). Объяснительная записка. — СПб., 2011.

Пужаков Б. А., Савельев В. П., Кузнецов Н. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист N-41 (Челябинск). Объяснительная записка. — СПб., 2013.

Шишкин М. А., Астапов А. П., Кабатов Н. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Q-41 (Воркута). Объяснительная записка. — СПб., 2007а.

Шишкин М. А., Попов М. Я., Файбусович Я. Э. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Q-41 (Воркута). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2007б.

Шох В. Д., Орлов М. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист N-41 (Челябинск). Карта полезных ископаемых. — СПб., 2013.

8. Разноранговый системный анализ месторождений углеводородов в рамках ГИС-проекта “ROSA”

Номер госрегистрации: АААА-А19-119100190165-2

Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН д. ф.-м. н. академик РАН

А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: н. с. А. А. Одинцова

Данное исследование направлено на создание новых принципов и подходов к большому объему разнородных данных на примере ГИС-проекта “ROSA”, ключевыми элементами которого являются созданная авторами уникальная база данных по месторождениям углеводородов, а также специализированный веб-сервис с расширенными функциональными возможностями на базе методов системного анализа.

Задачи формулировки принципов работы с данными, среди которых из наиболее важных значатся принципы систематизации, верификации и унификации, а также расширение базы геопространственных данных по месторождениям нефти и газа России и мира за 20-21 вв. путем добавления новых полей атрибутивных таблиц и новых уровней данных по стратегически важным месторождениям России были решены в ходе предыдущего этапа выполнения работ по проекту. В 2019 году были задачи, касающиеся создания и ввода в эксплуатацию специализированного веб-сервиса с расширенным функционалом для комплексного анализа объектов базы данных.

8.1. Визуализация базы данных в ГИС-среде

Проведение аналитического исследования и оценки развития методов добычи и разработки месторождений РФ на основе созданной многоуровневой базы данных стало возможным благодаря **интеграции и визуализации пространственных данных по месторождениям углеводородов**, собранных в ходе выполнения проекта, **в ГИС-среде**. В результате чего все месторождения были представлены в виде единой карты с инструментами работы с параметрами месторождений по выбору пользователя. Интеграция данных по месторождениям и их последующее представление в виде карт в единой геоинформационной среде обеспечивает пользователей возможностью проведения аналитического анализа пространственных данных.

В качестве геоинформационной системы для обработки и визуализации данных использовалась среда ArcGIS компании ESRI. Месторождения, хранящиеся в базе данных, были представлены в ГИС в качестве шейп-файлов, содержащих точечные объекты (каждый файл соответствует одному уровню иерархии) (рис. 1). В качестве базовой карты

использовались стандартные карты, предоставляемые компанией ESRI.

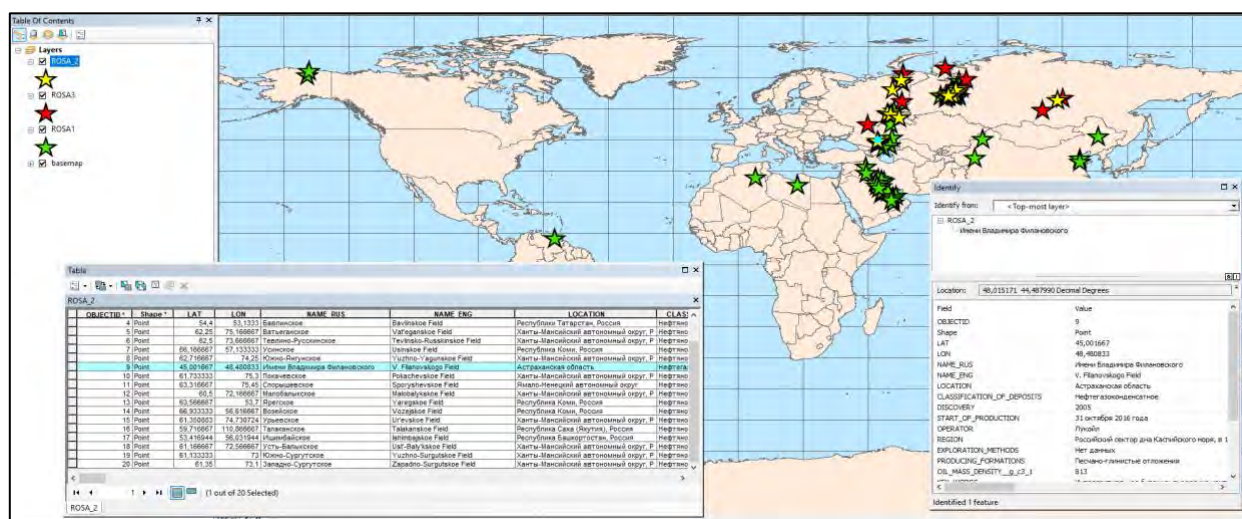
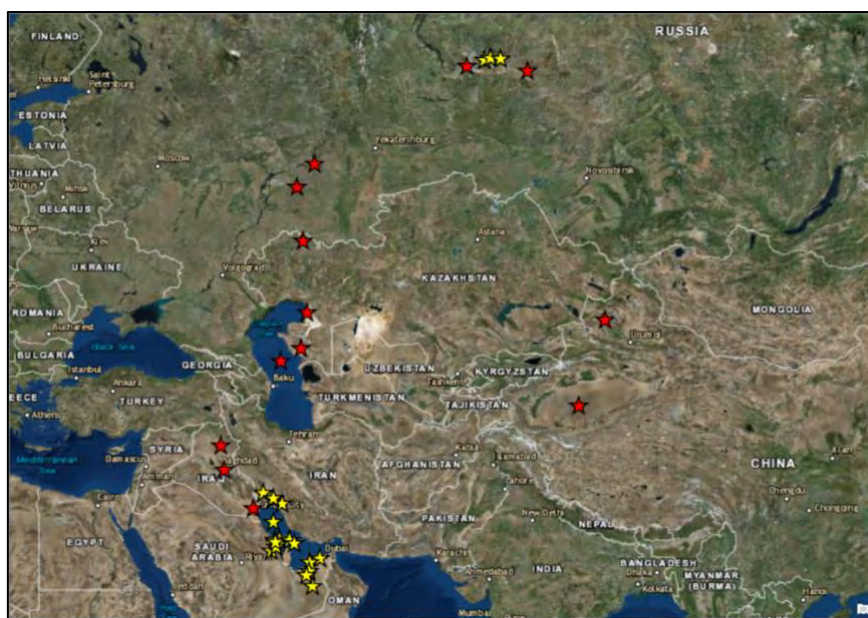


Рисунок 8.1 – Представление данных по месторождениям нефти и газа на территории России и мира в ГИС

Для каждого месторождения доступна атрибутивная информация, которую можно просмотреть в таблице атрибутов или при нажатии на элемент на карте. Кроме этого, при работе с базой данных в среде ArcGIS (например, в приложении ArcMap, как на рис. 8.1) пользователю доступен набор специализированных инструментов анализа и обработки данных по различным направлениям исследования, входящий в состав пакета инструментов геообработки ArcToolbox. Также для обработки и анализа описанных данных был использован пакет инструментов геообработки «Clustering», содержащий методы кластеризации, разработанные в Геофизическом центре. В качестве примера имеющиеся месторождения нефти и газа были проанализированы с использованием метода кластеризации «DPS», входящего в состав пакета инструментов «Clustering» (Discrete Perfect Sets). Алгоритм «DPS» был создан для выделения плотных областей с определенным уровнем плотности α в наборе точечных объектов. Данный метод является частью дискретного математического анализа (ДМА), в основе которого лежат элементы искусственного интеллекта, а также основные понятия нечеткой математики и логики. Результат работы метода DPS к имеющимся месторождениям представлен на рис. 8.2.



а)



б)

Рисунок 8.2 – Кластеризация месторождений нефти и газа с использованием метода «DPS»: а) исходные объекты, б) результат кластеризации

8.2. Создание веб-сервиса с расширенным функционалом

Следующим этапом проведения работ по проекту стало разработка специализированного **веб-сервиса с расширенными функциональными возможностями**, созданного на базе инфраструктуры Portal for ArcGIS. С использованием Web AppBuilder for ArcGIS, входящим в состав портала, создано веб-приложение (рис. 3), позволяющий не только посматривать элементы базы «ROSA», но также производить их анализ различными методами.

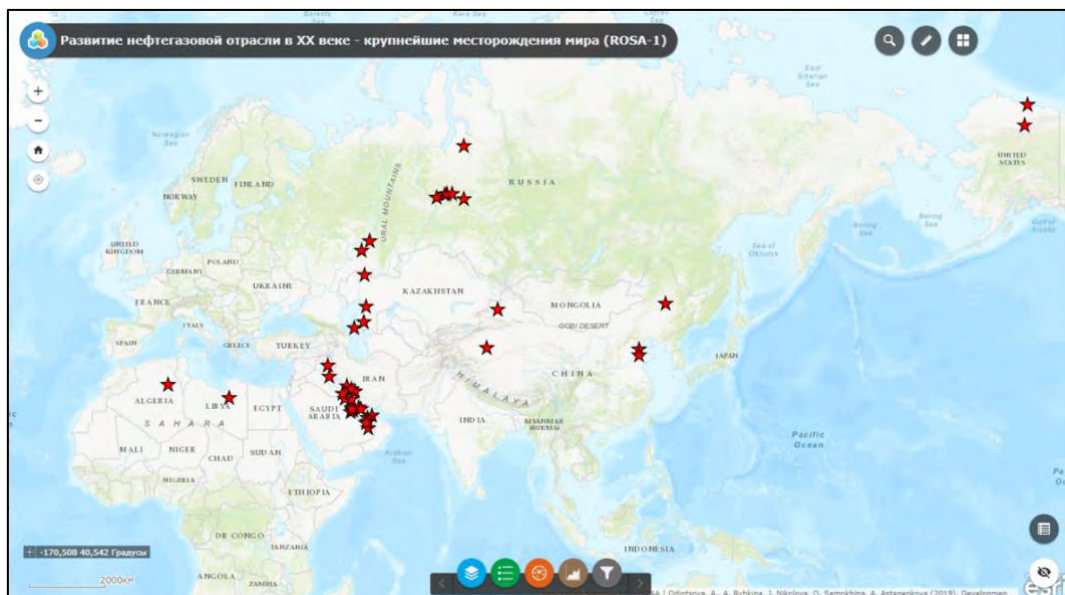


Рисунок 8.3 – Общий вид запущенного веб-приложения

Вся атрибутивная информация базы данных, представленная на рис. 1, сохранена и в веб-приложении. Просмотреть ее можно так же, как и в приложении ArcMap (рис. 4). Для некоторых объектов помимо текстовой информации доступно изображение месторождения.

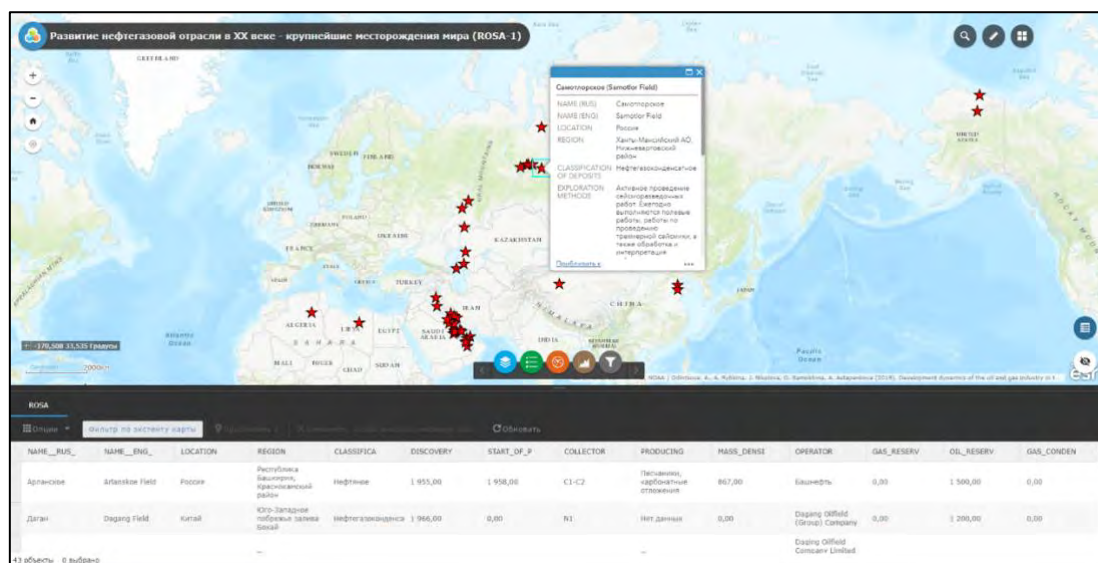
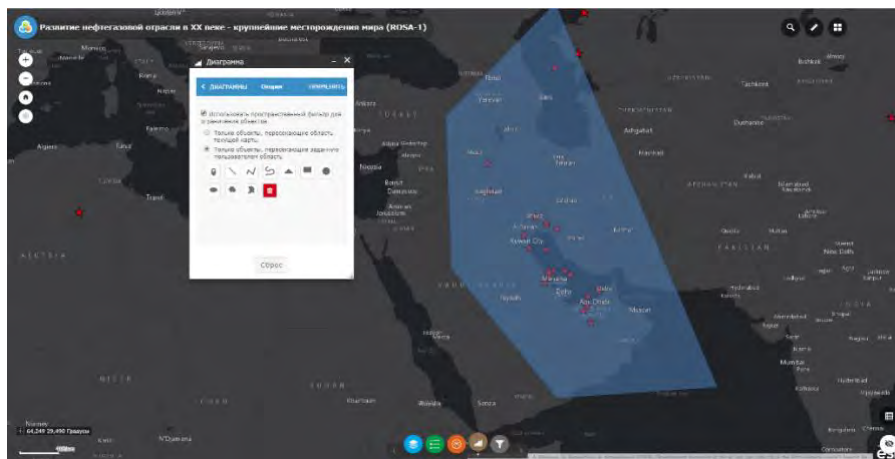


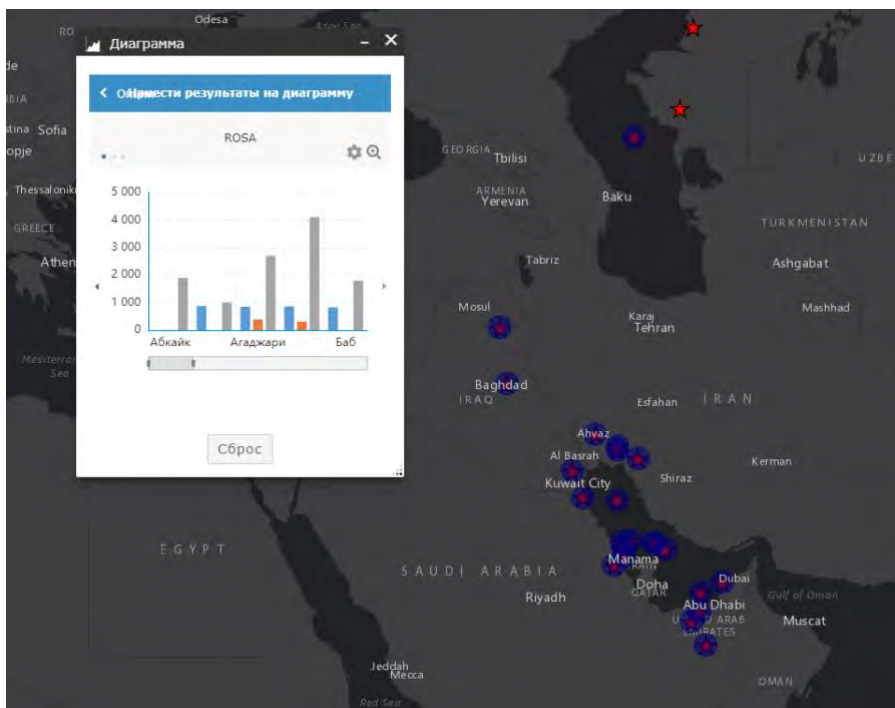
Рисунок 8.4 – Отображение атрибутивной информации месторождений в веб-приложении

Функциональность приложения обеспечивает набор добавленных виджетов. К стандартным инструментам работы с картой можно отнести масштабирование, поиск объекта на карте, измерения (длина отрезка между двумя заданными точками; площадь выделенной на карте области; координаты отмеченной точки на карте и текущие координаты курсора), просмотр списка слоев и легенды. Дополнительно в приложение добавлены виджеты «Фильтр», «Анализ» и «Диаграмма».

Виджет «Диаграмма» отображает количественные атрибуты рабочего слоя данных в виде графического представления. Это позволяет конечным пользователям наблюдать возможные паттерны и тенденции на необработанных данных (рис. 5а). В приложении для заданных параметров доступны столбчатая (рис. 5б) и линейная диаграммы, а также диаграмма-график (столбчатая, линейная и диаграмма-график).



а)



б)

Рисунок 8.5 – Использование виджета «Диаграмма»: а) выбор области интереса, б) построение диаграмм различных типов для выбранных объектов.

Виджет «Анализ» позволяет пользователям использовать инструменты пространственного анализа доступных в ArcGIS Online или Enterprise в веб-приложении. Для пользователей доступны следующие инструменты анализа точечных данных:

- подсчитать плотность;
- найти горячие точки;
- поиск выбросов;
- найти схожие местоположения;
- интерполировать точки.

Результат применения одного из методов анализа представлен на рис. 6.

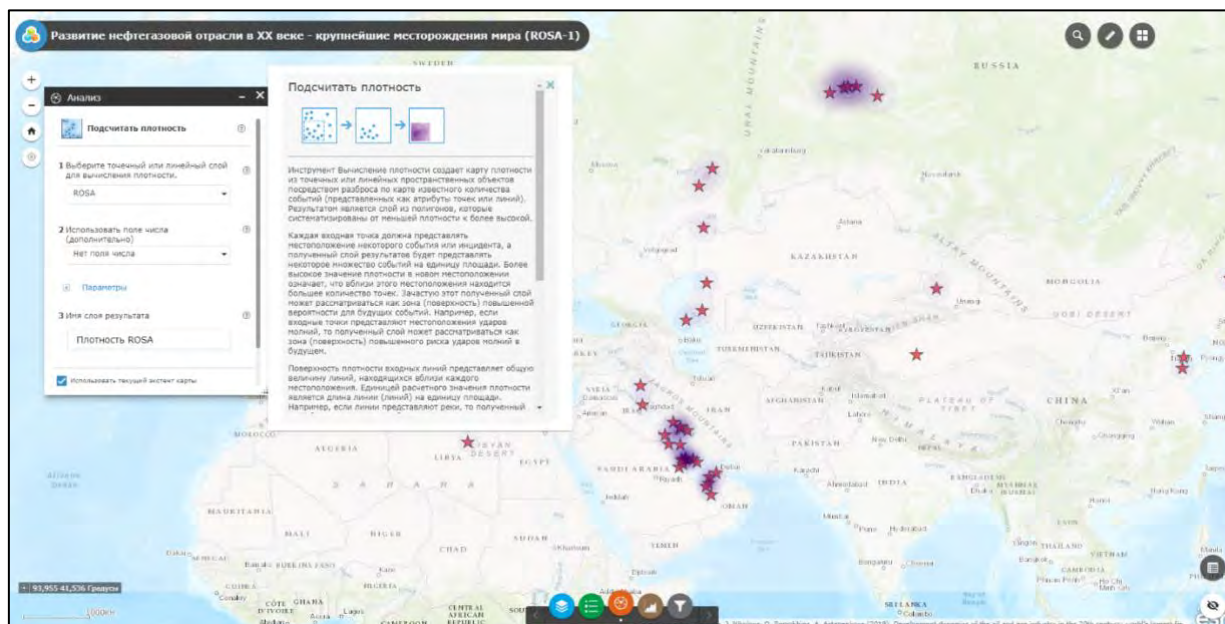


Рисунок 8.6 – Использование виджета «Анализ» на примере подсчета плотности

Виджет «Фильтр» позволяет пользователям ограничить видимость объектов на карте путём написания выражения. На карте будут видны только те объекты, которые соответствуют критериям запроса. В качестве примера на рисунке 8.7 представлен результат фильтрации объектов базы данных ROSA: выбраны только те объекты, параметр которых «Mass density» (плотность вещества) меньше или равен 850.

8.3 Новизна и значимость результатов

Создание базы данных по крупнейшим месторождениям углеводородов России и мира обусловлено отсутствием аналогичных научных продуктов, доступных пользователям в открытом доступе в среде Интернет. Представленные в настоящее время базы данных различаются по типу полезных ископаемых, по виду контента и по параметрам атрибутивных таблиц, соответственно. В рамках данного исследования представлена верифицированная и эффективно организованная база данных с представлением месторождений углеводородов в виде карт, оснащенная инструментом сортировки необходимых пользователю данных для проведения сравнительной оценки месторождений углеводородов России и мира. Кроме того, расширение базы данных за счет добавления

менее масштабных месторождений России и более подробной производственной информации (характеристики разрабатываемых платов, физико-химические свойства нефти и пр.) позволяет проводить более детальные исследования по территории России и делает разработанную базу данных применимой и для решения специфических производственных задач.

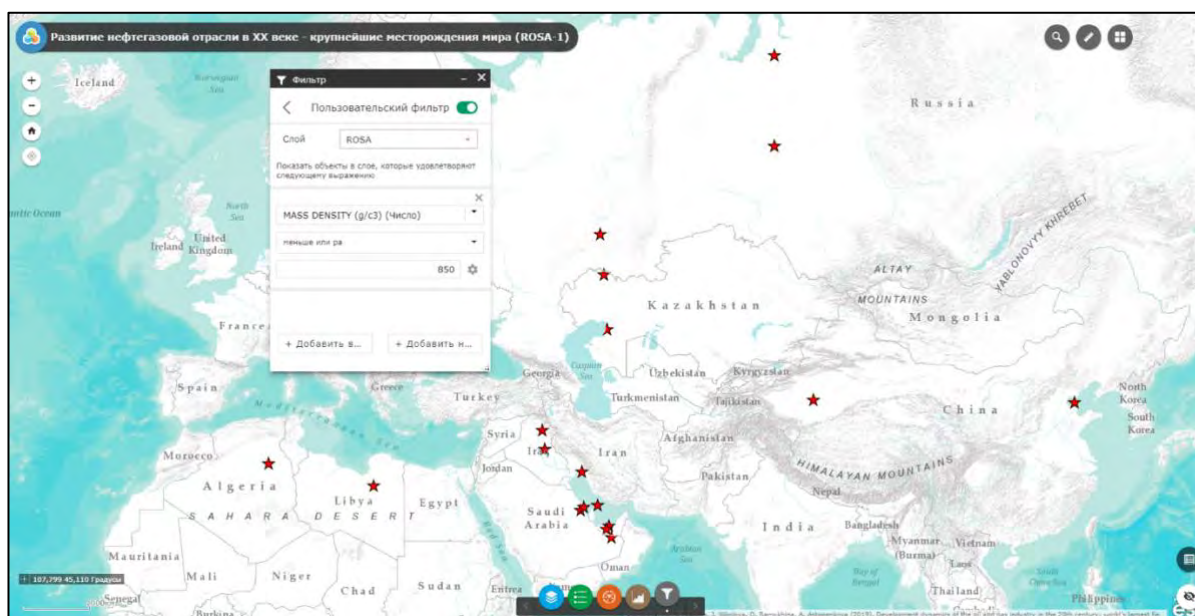


Рисунок 8.7 – Результат фильтрации объектов базы данных ROSA

Аналитическая составляющая, в том числе применение новейших методов обработки и визуализации данных, качественно отличает данное исследование от существующих аналогов и предоставляет возможность последующей оценки и апробации широкого спектра данных.

Создание специализированного веб-приложения позволило обеспечить удобный доступ к разработанной авторами многоуровневой базы данных “ROSA” по крупнейшим месторождениям нефти и газа России для проведения аналитических исследований.

9. Разработка методов системного анализа и геоинформатики для интеллектуального анализа геофизических данных на основе современных ГИС-технологий

Номер госрегистрации: АААА-А19-119093090073-6

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

Ответственный исполнитель: учёный секретарь, к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров

9.1. Расширение базы геопространственных данных

В 2019 г. в базу геопространственных данных ГИС и в картографический сервис «Геофизика» были включены цифровые карты, основанные на новых глобальных геофизических моделях: новой глобальной модели эффективной мощности упругой литосферы и новой тепловой модели верхней мантии Евразии.

Данные о вариациях температуры в верхней мантии имеют большое значение для многих областей геофизики, в первую очередь, для геодинамических приложений. Температура мантийного вещества напрямую влияет на его реологические параметры, в частности, вязкость, упругие модули и прочность. Существует два основных способа расчета температуры верхней мантии. Во-первых, для можно использовать данные о тепловом потоке. Недостатком этого метода является то, что значительную часть теплового потока на поверхности (до 70%) определяется радиоактивными элементами в земной коре, влияние которых сложно рассчитать с достаточной точностью. В результате собственно мантийная часть теплового потока определяется с большими погрешностями. Другой проблемой данного метода является то, что в тектонически молодых областях тепловой поток нестационарный, что также увеличивает неопределенность расчетов. Другой метод, который доминирует в последнее десятилетие, основан на анализе сейсмических скоростей [Goes *et al.*, 2000], в первую очередь, скоростей поперечных волн (Vs). Последние в определяющей степени зависят от температуры и давления, и в меньшей степени – от состава. Поскольку давление известно с достаточной точностью, на основании вариации скоростей можно определить распределение температуры. Этот метод и был использован для определения температур, представленных в данном отчете. Основой являются данные, полученные в работе [Kaban *et al.*, 2016] для большей части Евразии. Главное отличие от ранее представленных данных состоит в том, что использовалась гораздо более детальная томографическая модель SL2013sv [Schaeffer and Lebedev, 2013, 2014]. Кроме того, была усовершенствована методика расчета.

Основа метода, использованного в работе [Kaban *et al.*, 2016], была предложена в [Stixrude and Lithgow-Bertelloni, 2005]. В этом методе используются данные о физических свойствах отдельных минералов, составляющих мантийные породы, в зависимости от температуры и давления. В свою очередь, эти данные основаны на результатах работы [Cammarano *et al.*, 2003]. Принципиальный момент состоит в том, что при интерпретации этих данных важно учесть такие эффекты, как нелинейность деформации горных пород и минералов, приводящую к эффекту ангармоничности, и квазиупругую деформацию [Karato and Spetzler, 1990]. Оба эти эффекта зависят от частоты волны, которая сильно отличается у экспериментальных измерений и реальных сейсмических волн. Методика учета этих факторов развивается, например в [Goes *et al.*, 2000].

Для расчета температур используется итеративный метод, предложенный в работах [Sobolev *et al.*, 1997; Goes *et al.*, 2000]. Для ряда температур (T) рассчитываются синтетические скорости поперечных волн (V_{syn}), которые сравниваются с наблюдаемыми (V_{obs}). В зависимости от этой разницы рассчитывается поправка. Процесс заканчивается, когда отличие становится минимальным.

Синтетические скорости определяются с учетом ангармоничных (Vanh) и неупругих эффектов (Vanel) в зависимости от состава (X) и частоты (ω) согласно [Minster and Anderson, 1981]. Синтетическая производная скорости от температуры также включает оба этих эффекта. Скорости, полученные для различных минералов, составляющих мантийные породы, суммировались с использованием метода Voigt-Reuss-Hill (VRH) [Hill, 1963]. В качестве значений упругих параметров и их производных использовались данные из работы [Cammarano *et al.*, 2003]. Для расчетов был принят типичный состав континентальной верхней мантии согласно [Jordan, 1979], который был выбран в качестве основного в предыдущих работах [Goes *et al.*, 2000]. Эффект квазиупругости рассчитывался с использованием параметра затухания сейсмических волн (Q) [Tesauro *et al.*, 2009]. Для расчета эффекта ангармоничности были использованы параметры модели Q4 [Cammarano *et al.*, 2003], которая показала наилучшее соответствие реальным параметрам верхней мантии.

Томографическая модель SL2013sv [Schaeffer and Lebedev, 2013, 2014], которая использовалась в работе [Kaban *et al.*, 2016], получена, в-основном, по результатам анализа поверхностных волн, поэтому она обеспечивает достаточно однородное покрытие. Распределение вариаций поперечных волн для глубины 150. Описанный выше метод был использован для расчета вариаций температуры на глубинах 50—300 км для большей части Евразии [Kaban *et al.*, 2016]. На рисунке 9.1 для примера показаны расчетные температуры

для глубины 200 км.

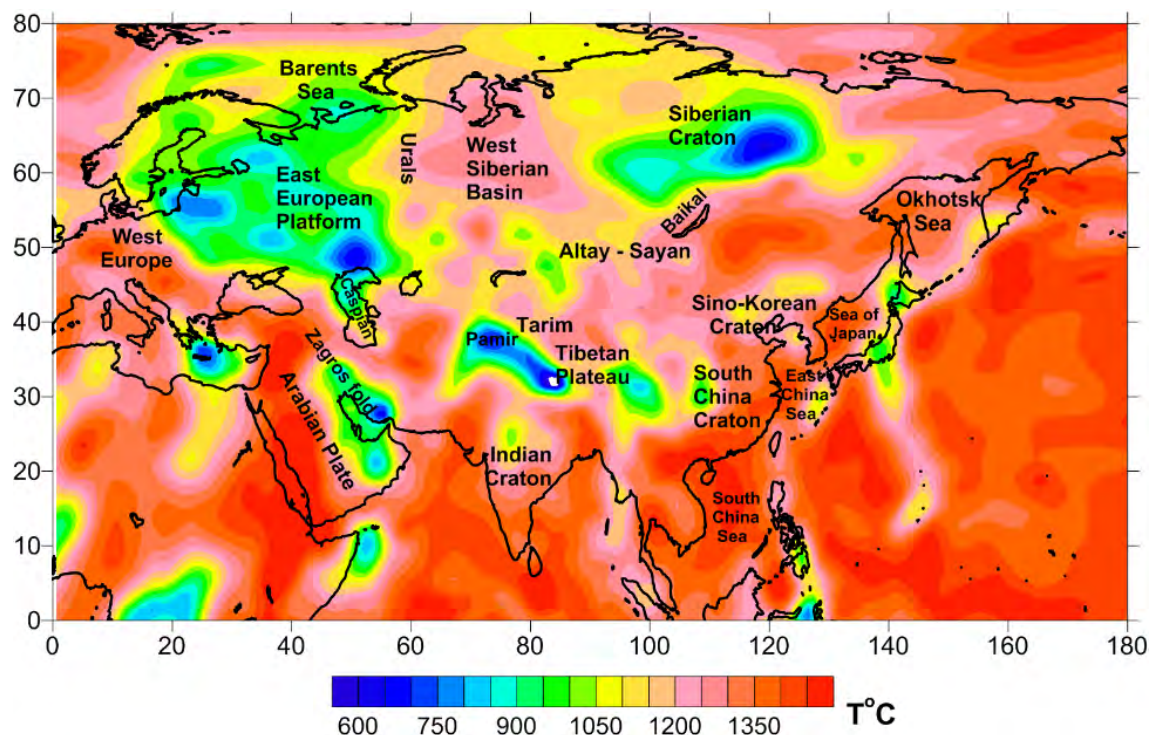


Рисунок 9.1 — Распределение температуры на глубине 200 км

Важно оценить возможные погрешности расчета поля температур. Погрешность самого метода, которая связана в первую очередь с возможными вариациями состава верхней мантии относительно использованного при расчетах может достигать 100—150°C [Tesauro *et al.*, 2009]. Значительный вклад могут также вносить погрешности определения сейсмических скоростей. К сожалению, томографические модели обычно представляются без определения возможных ошибок. Если считать, что они могут составлять 1—2% от абсолютной скорости для протяженных аномалий, это приведет к возможным изменениям температуры порядка 100°C с учетом разрешения томографической модели [Tesauro *et al.*, 2009]. Таким образом, общая погрешность может достигать 200°C (статистический разброс порядка 150°C, если считать, что приведенные выше факторы независимы).

Диапазон изменения температур в верхней мантии Евразии составляет 300°C—1400°C, т.е. значительно превышает возможные погрешности расчета. Наименьшие температуры выявлены под древними кронами Восточно-Европейской платформы, Восточной Сибири, а также в областях континентальной коллизии Индийской и Аравийской плит с Евразийской плитой, которые характеризуются большими значениями мощности литосферы. Самые высокие значения температуры выявлены в Западной Европе и в зоне к юго-востоку от Байкала, включая Алтай и Саяны. Умеренно высокие значения получены в Западной Сибири, Тибетском плато и Индийской плите.

Эффективная мощность упругой литосферы — важный реологический параметр, который используется во многих геодинамических моделях. Он является удобной аппроксимацией прочности и изгибной жесткости литосферы, поэтому его изменения напрямую связаны с распределением сейсмичности, что определяет важность этого параметра для целей сейсмического районирования. Эффективная мощность упругой литосферы (далее ЕЕТ) определяется как мощность однородной упругой плиты, которая будет деформироваться под влиянием внешней нагрузки таким же образом, как и реальная литосфера [Tesauro *et al.*, 2013].

В серии работ [Tesauro *et al.*, 2012a,b, 2015] была разработана новая реологическая модель литосферы для всей Земли и определено распределение ЕЕТ. В отличие от результатов, переданных в 2014 г., использовались новейшие модели строения земной коры и верхней мантии, а также уточненные реологические параметры. Кроме того, было получено распределение ЕЕТ для всей Земли, включая океанические районы. Для верхней мантии анализировались два возможных состава: примитивная (нормальная) и деплетированная мантия [Tesauro *et al.*, 2015]. На основании данных о плотности коры и верхней мантии, температуры и состава рассчитывалась функция YSE, интегрирование которой по вертикали давало интегральную прочность литосферы (рис. 9.2).

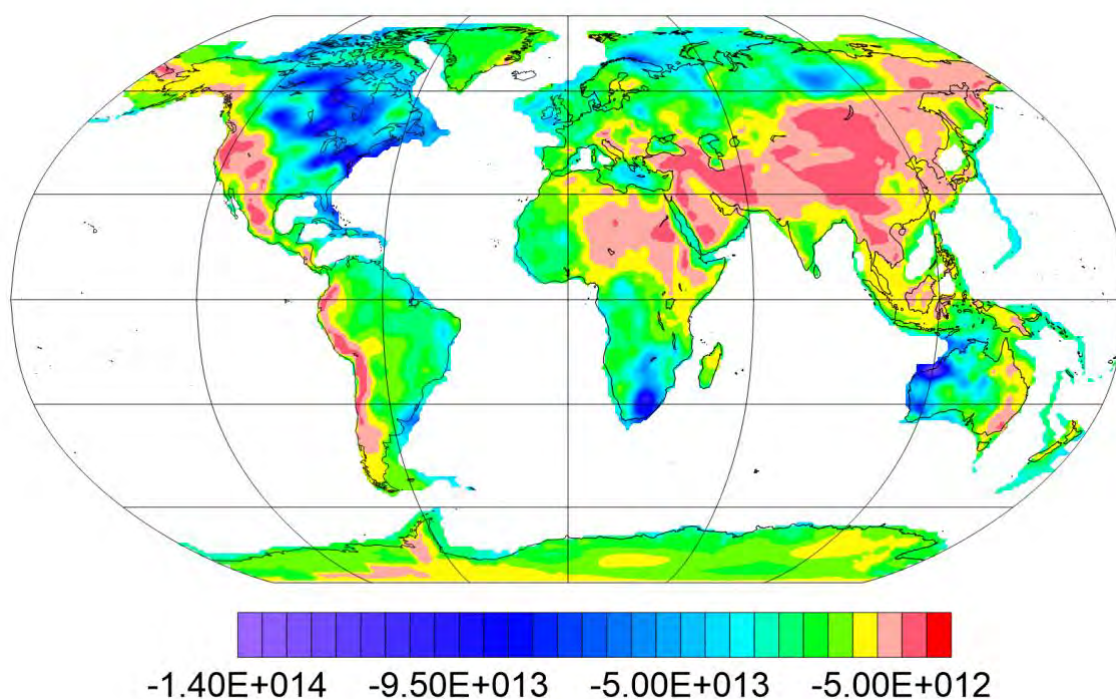


Рисунок 9.2 — Интегральная прочность литосферы ($\text{Pa} \cdot \text{m}$) в условиях сжатия для континентальных районов

На основании данных о жесткости слоев литосферы, а также с учетом условий на

границах этих слоев была рассчитана эффективная мощность упругой литосферы (рис. 9.3).

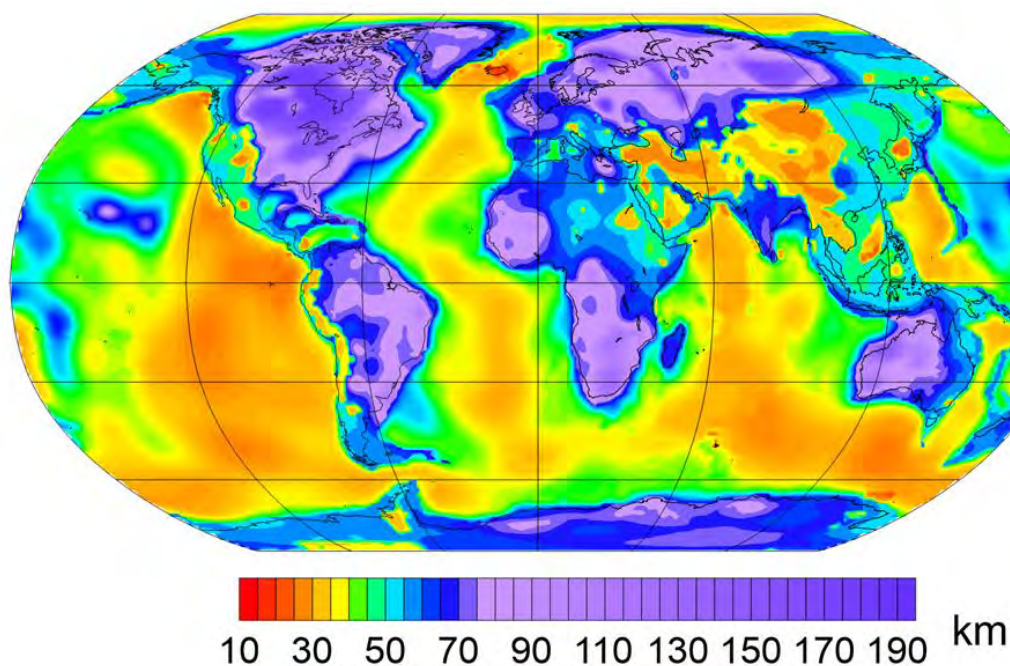


Рисунок 9.3 — Эффективная мощность упругой литосферы ЕЕТ

9.2. Средства взаимодействия с геопространственными данными

Для эффективного взаимодействия пользователя с базой геопространственных данных развиваемой ГИС была разработана новая версия тематического геоportала «Интеллектуальная ГИС “Данные наук о Земле по территории России”». Геоportал представляет собой веб-ресурс (gis.gcras.ru), содержащий инструментарий для интерактивной работы с цифровыми картами, а также набор дополнительной тематической информации, включая каталог метаданных включенных в базу слоев.

Просмотр и взаимодействие с картами тематического геоportала осуществляется через клиентское картографическое веб-приложение «Geoportal Server Map Viewer», созданного при помощи конструктора приложений Web AppBuilder компании Esri. Функциональность приложения обеспечивает набор специальных виджетов. В работе использовались следующие виджеты: список слоев; легенда; масштабирование карты; возврат к экстену карты, установленному по умолчанию; базовые карты (позволяют изменить подложку карты в любой момент работы с системой); измерение (позволяет пользователю измерить расстояние между точками, площадь участка или координаты точки на карте); печать (подготовка готового к печати документа, с использованием одной из заданных компоновок карты). Просмотр атрибутивной информации векторных данных (точечных, линейных и полигональных) может осуществляться через таблицу атрибутов

слоя или при нажатии на объект на карте. На рисунке 9.4 приведен внешний вид главной страницы геопортала с клиентским картографическим приложением.

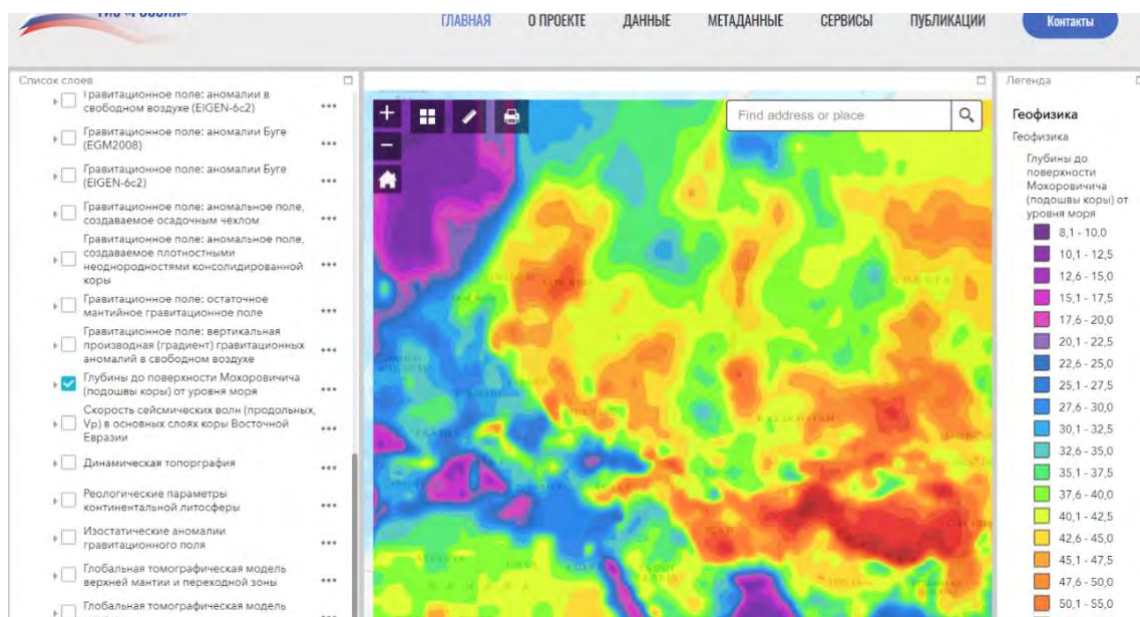


Рисунок 9.4 — Обновленная версия тематического геопортала gis.gcras.ru.

9.3 Заключение

В рамках проекта был реализован обновленный тематический геопортал ГЦ РАН (gis.gcras.ru). Его основой является специализированное картографическое приложение, включающее в себя как стандартные средства для взаимодействия с картографическими данными, так и инструменты, созданные на основе алгоритмов интеллектуального анализа. Значительно расширена база геопространственных данных по структуре литосферы. Все геопространственные данные оформлены в формате отдельных картографических слоев и включены в картографический сервис «Геофизика», доступ к которому осуществляется средствами созданного геопортала.

Список использованных источников

Cammarano F., Goes S., Vacher P., Giardini D. (2003), Inferring upper-mantle temperatures from seismic velocities, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 138, 197-222, doi: 10.1016/S00319201(03)00156-0

Goes S., Govers R., Vacher P. (2000), Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B5, 11153—11169, doi: 10.1029/1999JB900300

Hill R. (1963), Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 11, 357—372.

Jordan T. H. Mineralogies, densities and seismic velocities of garnet lherzolites and their geophysical implications, in *The Mantle Sample: Inclusions in Kimberlites and Other Volcanos*. — Washington, D. C., 1979.

Kaban M. K., Stolk W., Tesauro M., El Khrepy S., Al-Arifi N., Beekman F., Cloetingh S. A. P. L. (2016), 3D density model of the upper mantle of Asia based on inversion of gravity and seismic tomography data, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 17, No. 11, 4457—4477, doi: 10.1002/2016GC006458

Karato S., Spetzler H. (1990), Defect microdynamics in minerals and solid-state mechanisms of seismic wave attenuation and velocity dispersion in the mantle, *Reviews of Geophysics*, Vol. 28, 399—421.

Minster J. B., Anderson D. L. (1981), A model of dislocation-controlled for the mantle. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 299, 319—356.

Schaeffer A., Lebedev S. (2013), Global shear-speed structure of the upper mantle and transition zone, *Geophysical Journal International*, Vol. 194, No. 1, 417—449, doi: 10.1093/gji/ggt095

Schaeffer A., Lebedev S. (2014), Imaging the North American continent using waveform inversion of global and USArray data, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 402, 26—41, doi 10.1016/j.epsl.2014.05.014

Sobolev S. V., Zeyen H., Granet M., Achauer U., Bauer C., Werling F. Altherr R., Fuchs K. (1997), Upper mantle temperatures and lithosphere-asthenosphere system beneath the French Massif Central constrained by seismic, gravity, petrologic and thermal observations, *Tectonophysics*, Vol. 275, 143—164, doi: 10.1016/S0040-1951(97)00019-X

Stixrude L., Lithgow-Bertelloni C. (2005), Thermodynamics of mantle minerals – I. Physical properties, *Geophysical Journal International*, Vol. 162, No. 2, 610–632, doi 10.1111/j.1365-246X.2005.02642.x

Tesauro M., Kaban M., Cloetingh S. (2009) A new thermal and rheological model of the European lithosphere, *Tectonophysics*, Vol. 476, 478—495, doi: 10.1016/j.tecto.2009.07.022

Tesauro M., Kaban M., Cloetingh S. (2012a), Global strength and elastic thickness of the lithosphere, *Global and Planetary Change*, Vol. 90—91, 51—57, doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.12.003

Tesauro M., Audet P., Kaban, M., Bürgmann R., Cloetingh S. (2012b), The effective elastic thickness of the continental lithosphere: Comparison between rheological and inverse approaches, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 13, No. 9, doi: 10.1029/2012GC004162

Tesauro M., Kaban M., Cloetingh S. (2013), Global model for the lithospheric strength and

effective elastic thickness, *Tectonophysics*, Vol. 602, 78–86, doi: 10.1016/j.tecto.2013.01.006

Tesauro M., Kaban M. K., Mooney W. D. (2015), Variations of the lithospheric strength and elastic thickness in North America, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 16, No. 7, 2197-2220, doi: 10.1002/2015GC005937

10. Изучение современных геодинамических процессов в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на основе системного анализа данных наблюдений спутниковыми системами GSP/ГЛОНАСС

Номер госрегистрации: АААА-А19-119093090070-5

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

Проект направлен на решение фундаментальной задачи геолого-геофизического изучения верхней части земной коры в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на основе сбора и системного анализа данных геофизических и геодезических наблюдений за кинематикой современных движений земной коры (СДЗК) и особенностями распределения геофизических полей.

В 2019 году исследования были направлены на решение следующих задач:

- 1 Системное обобщение результатов геолого-геофизических и геодезических исследований в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты (Северная часть Нижне-Канского массива);
- 2 Разработка алгоритмов анализа деформаций земной поверхности в связи с сейсмической активностью на основе наблюдений спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС;
- 3 Совершенствование сети геодезического мониторинга Нижне-Канского массива на основе анализа изменчивости полей деформаций.

В настоящее время по данному району накоплена достаточно большая база данных, содержащая информацию о геологии, тектонике, геодинамике, результатах геофизического изучения района, геодезических исследованиях и т.д. В последние годы были получены новые данные о СДЗК в северной части Нижне-Канского массива на основе ГНСС-методов и высокоточного повторного нивелирования, имеется также большой массив геофизических данных, которые фактически ни разу не использовались ранее. В этой связи задача сбора и системного обобщения огромного объема данных выходит на первое место в проблеме прогноза кинематики в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Системное обобщение результатов геолого-геофизических исследований предполагала

решение *следующих задач*:

1. Выявление блочной структуры в строении верхней части земной коры в ее

иерархической подчиненности с привлечением морфоструктурного, морфометрического, структурно-геологического, горно-геометрического анализа, геофизики и других методов;

2. Оценка кинематики и динамики взаимодействия выявленных структурно-тектонических блоков;

3. Определение направления действия и величин главных напряжений внутри и на границах СТБ, выделение геодинамических напряженных зон.

Результаты системного обобщения данных из открытых источников, а также архивных и фондовых материалов, необходимые для геодинамического районирования (Северная часть Нижне-Канского массива), структурированы и представлены в 4-х разделах:

1. Геологическая характеристика;
2. Результаты математического моделирования полей напряжений;
3. Результаты геодезических наблюдений;
4. Результаты геофизических наблюдений.

В 2019 г. проводились также работы по разработке алгоритма анализа деформаций земной поверхности по данным наблюдений спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС на основе аппроксимации одномерными изопараметрическими конечными элементами. Результаты повторных ГНСС-измерений базисных линий в пределах геодинамического полигона, а именно приращение данных базисных линий $\pm(\Delta L_i)$, дают возможность предварительной оценки деформации площади геодинамического полигона, оконтуренного граничными реперами, внутри которых реализуются современные геодинамические процессы.

С точки зрения эффективности обработки результатов измерений, представляется целесообразным как-то «выпрямить» этот контур для того, чтобы появилась возможность оценивать величины деформаций через вычисленные значения производных от перемещений в узлах спрямленного контура.

С этой целью привлекается методика аппроксимации с помощью одномерных изопараметрических конечных элементов. Нахождение производных от перемещений в вычислительном пространстве производится посредством конечно-разностных формул второго порядка аппроксимации. Производные от перемещений в узлах контура вычисляются через «разностные» производные на вычислительном порождающем конечном элементе с помощью формулы нахождения производной от функции, заданной параметрическим образом. В результате получают искомые величины деформаций в

узлах контура, позволяя оценивать характер деформирования в окрестностях узлов по данным измерений.

Рассмотрим в параметрическом (вычислительном) пространстве вдоль оси X отрезок $[0,1]$ с $n+2$ равноотстоящими узлами, который будем называть порождающим конечным элементом:

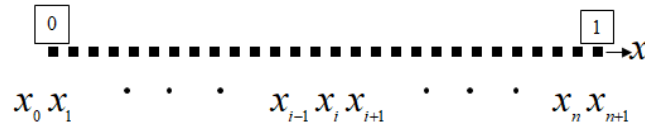


Рисунок 10.1 – Порождающий конечный элемент

Введем функции формы $\{f_i(x; x_i)\}_{i=0}^{n+1}$ для порождающего конечного элемента, обладающие следующими свойствами δ - Кронекера:

$$f_i(x_j; x_i) = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, (i, j = \overline{0, n+1})$$

Отобразим порождающий конечный элемент на криволинейный пространственный конечный элемент в физическом пространстве XYZ с помощью формулы:

$$\begin{Bmatrix} X(x) \\ Y(x) \\ Z(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=0}^{n+1} f_i(x; x_i) \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{Bmatrix}$$

Эта формула, вследствие свойств функций формы, осуществляет точное отображение узлов x_i из параметрического (вычислительного) пространства в узлы $\{X_i, Y_i, Z_i\}$ физического пространства. При этом порождающий конечный элемент (единичный отрезок) приближенно отображается в криволинейный конечный элемент, ограниченный узлами $i=0$ и $i=n+1$.

Если обозначить перемещения узлов (X_i, Y_i, Z_i) в направлении осей X, Y, Z соответственно через $\{U_i, V_i, W_i\}$, то согласно изопараметрическому подходу, будем иметь аппроксимации перемещений $U(x), V(x), W(x)$ в любой точке конечного элемента:

$$\begin{Bmatrix} U(x) \\ V(x) \\ W(x) \end{Bmatrix} = \sum_{i=0}^{n+1} f_i(x; x_i) \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \end{Bmatrix}$$

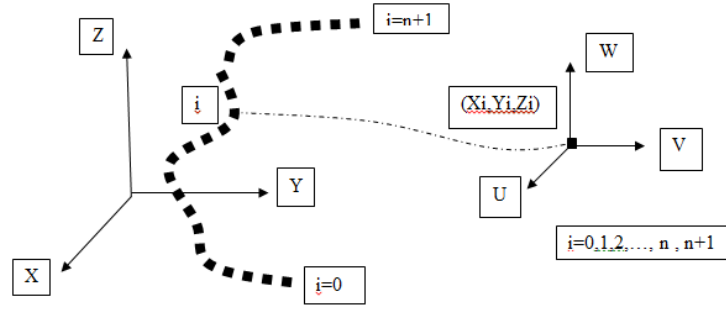


Рисунок 10.2 – Криволинейный конечный элемент

Для некоторой физической (или геометрической) переменной – функции φ будем использовать интерполяционный многочлен, основанный на функциях формы $\{f_i(x; x_i)\}_{i=0}^N$, с равноотстоящими узлами:

$$\varphi^h(x) = \sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) \varphi(x_i)$$

Здесь

$$N = n + 1; h = \frac{1}{N} = \text{const}; x_i = i h, i = \overline{0, N}$$

Для функций формы, кроме отмеченных свойств δ - Кронекера, выполняется тождество разбиения единицы:

$$\sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) \equiv 1$$

Введем на множестве узлов $\{x_i = i h\}_{i=0}^N$ порождающего конечного элемента базис из кусочно-линейных функций формы $\{f_i(x; x_i)\}_{i=0}^N$.

Для левого граничного узла функция формы имеет вид:

$$f_0(x; x_0) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{h}x, & 0 \leq x \leq h \\ 0, & h \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Графически это представлено на рис. 10.3:

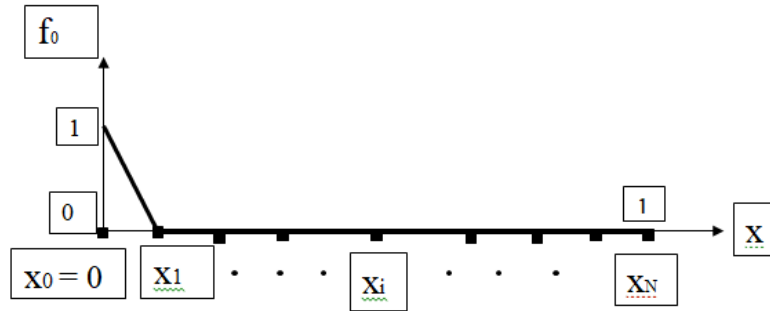


Рисунок 10.3 – График функции формы для левого граничного узла

Функция формы для правого граничного узла и ее график имеют вид (рис. 10.4):

$$f_N(x; x_N) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq x_n \\ \frac{x - x_n}{1 - x_n}, & x_n \leq x \leq 1 \end{cases}$$

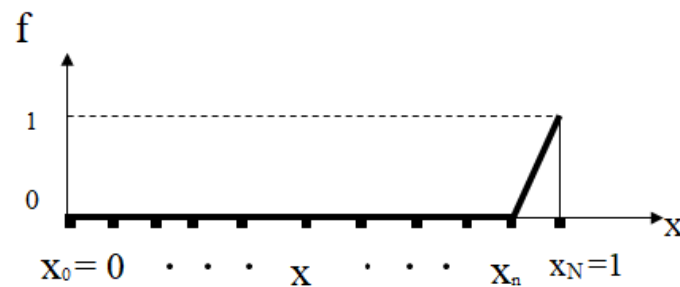


Рисунок 10.4 – График функции формы для правого граничного узла

Для внутренних узлов функции формы запишутся в следующем виде:

$$f_i(x; x_i) \Big|_{i=1}^n = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq x_{i-1} \\ \frac{x - x_{i-1}}{h}, & x_{i-1} \leq x \leq x_i \\ \frac{x_{i+1} - x}{h}, & x_i \leq x \leq x_{i+1} \\ 0, & x_{i+1} \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Их графики похожи на «крышки», отсюда и название этого семейства функций формы (рис. 10.5):

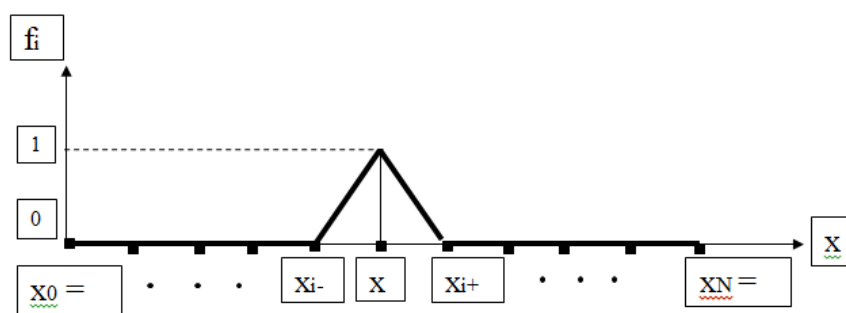


Рисунок 10.5 – График функции формы для i -го внутреннего узла

Пронумеруем узлы контура от 0 до N ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) (рис. 10.6):

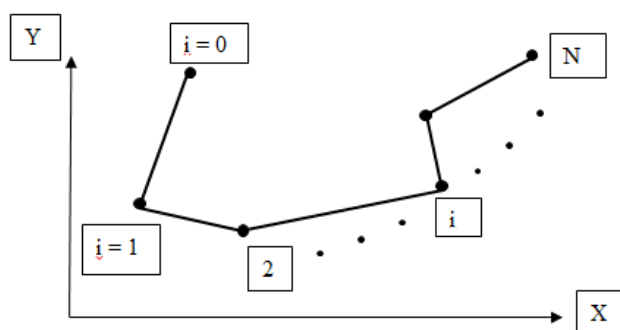


Рисунок 10.6 – Базовый контур точек наблюдений

Обозначим через L_i ($i = 1, 2, \dots, N$) длины звеньев, соединяющих узлы контура.

Разложим удлинения звеньев Δ_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$), представляющие собой замеренные изменения расстояния между узлами по направлению отрезков прямых, на проекции вдоль осей физической системы координат (рис. 10.7):

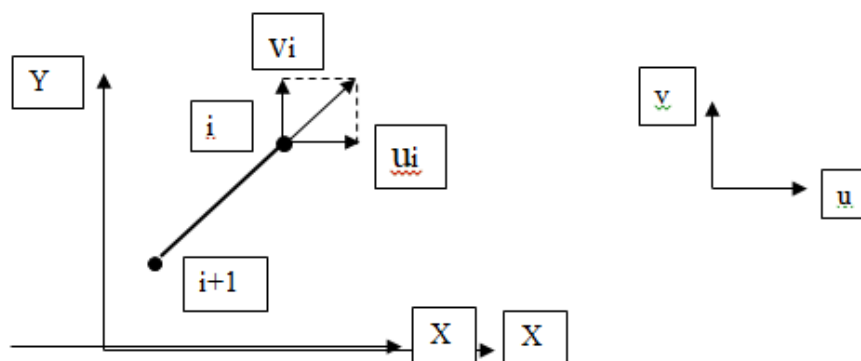


Рисунок 10.7 – Перемещения в i -ом узле

Здесь u_i, v_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) – проекции вектора перемещений узлов в физической системе координат соответственно на ось X и Y ; u, v – горизонтальное и вертикальное перемещения в физической плоскости.

Представим геометрические координаты в физической плоскости в следующем параметрическом виде:

$$X(x) = \sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) X_i; \quad Y(x) = \sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) Y_i$$

Согласно изопараметрическому подходу для аппроксимации перемещений используем тот же базис из функций формы:

$$u(x) = \sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) u_i; \quad v(x) = \sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) v_i$$

Здесь:

$u(x)$ и $v(x)$ – перемещения произвольной точки конечного элемента в физической плоскости;

u_i и v_i ($i=0,1,2,\dots,N$) – перемещения узлов конечного элемента в физической плоскости.

Будем моделировать контур геологической среды стержневой системой с осевой ломаной линией, проходящей через центры тяжести поперечных сечений стержней и испытывающей деформации растяжения-сжатия вдоль оси стержневого контура.

Таким образом, мы приходим к одномерной схематизации контура, при котором его осевые деформации зависят только от одного параметра (имеющего смысл безразмерной длины вдоль оси контура).

Тогда величины деформаций в направлении координатных осей X и Y запишутся в виде [36]:

$$\varepsilon_x(x) = \frac{1}{A} \left\{ \sum_{i=0}^N \frac{df_i}{dx}(x; x_i) u_i \right\} \lambda_x(x)$$

$$\varepsilon_y(x) = \frac{1}{A} \left\{ \sum_{i=0}^N \frac{df_i}{dx}(x; x_i) v_i \right\} \lambda_y(x)$$

Функциональные коэффициенты направляющих косинусов λ_x, λ_y определяются формулами:

$$\lambda_x(x) = \frac{1}{A} \frac{dX}{dx}(x); \quad \lambda_y(x) = \frac{1}{A} \frac{dY}{dx}(x)$$

Функциональный коэффициент изменения длины при отображении имеет вид:

$$A = A(x) = \sqrt{\left(\frac{dX}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dY}{dx}\right)^2}$$

Выражения для деформаций содержат производные от функций формы, которые при применении простейших функций-крышек, используемых для аппроксимации геометрии и перемещений, будут при прямом дифференцировании приводить к разрывным функциям.

Для того чтобы избежать разрывов в производных, перепишем выражения для деформаций в форме производных от интерполяционных многочленов (являющихся линейными комбинациями функций формы):

$$\varepsilon_y(x) = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) v_i \right]' \lambda_y(x)$$

$$\varepsilon_x(x) = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=0}^N f_i(x; x_i) u_i \right]' \lambda_x(x)$$

Эти формулы уже можно использовать для приближенного дифференцирования, поскольку они позволяют, например, применить конечно-разностный подход.

В рассматриваемом случае аппроксимации геометрии ломаной линией, формулы для функциональных множителей упрощаются и принимают в узлах ($i = 1, 2, \dots, N$) контура следующий вид:

$$\lambda_x = \lambda_{x,i} = (X_i - X_{i-1}) / L_i, i = \overline{1, N}$$

$$\lambda_y = \lambda_{y,i} = (Y_i - Y_{i-1}) / L_i, i = \overline{1, N}$$

$$A = A_i = A(x_i) = L_i / 2, i = \overline{1, N}$$

Здесь: L_i – длины звеньев контура.

Деформации в узлах ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) кусочно-линейного контура определяются по формулам:

$$\varepsilon_x(X_i, Y_i) = \frac{1}{A_i} u'(x_i) \lambda_{x,i}$$

$$\varepsilon_y(X_i, Y_i) = \frac{1}{A_i} v'(x_i) \lambda_{y,i}$$

11. Разработка методов геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктике

Номер госрегистрации: АААА-А19-119093090076-7

Руководитель: академик РАН А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

11.1 Введение

Актуальность исследований обусловлена необходимостью обеспечения устойчивой работы высокотехнологичных систем в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), а именно устройств навигации, радиосвязи, линий электропередачи, трубопроводных систем и транспортных артерий. Чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее становятся их сбои вследствие воздействия негативных факторов космической погоды, которые приводят к возмущениям магнитного поля Земли. Источником магнитных бурь являются возмущения межпланетного пространства выбросами солнечной корональной массы или высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр. Энергия потока солнечной плазмы накапливается в хвосте магнитосферы и спорадически высвобождается во время магнитных бурь и суббурь. Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений, связанных с магнитными бурями (суббурями), наблюдаются в высоких широтах северного и южного полушарий. Космическая погода и вызванные ей глобальные электромагнитные возмущения представляют опасность и для трубопроводов, особенно для тех, которые вытянуты в азимутальном (восток-запад) направлении и расположены в зоне интенсивной геомагнитной активности. Колебания в геомагнитном поле при магнитных бурях и суббурях могут оказать критическое влияние на операции направленного бурения нефтяных скважин.

В северных высоких широтах – в АЗРФ, происходит активное развитие различных промышленных проектов, для которых возмущения магнитного поля Земли представляют большую опасность. Мониторинг и анализ геомагнитных возмущений при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сложных

систем, расположенных в АЗРФ, для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, является исключительно важной задачей. Для решения широкого круга научных и практических задач необходимо создание новых полномасштабных магнитных обсерваторий высшего стандарта качества ИНТЕРМАГНЕТ в АЗРФ. Создание научно-методической основы организации геомагнитных наблюдений в целях повышения точности наклонного бурения скважин в арктической зоне является актуальной задачей взаимодействия науки и промышленности. В настоящее время в РФ такие разработки находятся в стадии становления. По мере расширения работ на арктическом шельфе геомагнитное сопровождение должно развиваться как в плане обоснования расположения, строительства и оснащения новых обсерваторий для мониторинга геомагнитного поля, так и в плане разработки научных методов оперативного анализа спорадических геомагнитных флуктуаций, математических интерполяционных алгоритмов, методик коррекции подземного позиционирования по обсерваторским данным.

В 2019 г. проводились теоретические и прикладные исследования, связанные с разработкой научных основ геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения скважин в Арктическом регионе.

11.2 Развитие систем мониторинга геомагнитного поля

С использованием ЦКП ГЦ РАН по сбору и обработке геомагнитных данных проводился мониторинг глобальной и региональной геомагнитной активности в 2019 г. Проанализированы характеристики геомагнитных бурь и других сильных возмущений, которые произошли в 2019 г. В фазу минимума текущего солнечного цикла происходили только слабые ($Dst \approx 50$ нТл) магнитные бури. Бури были детектированы в мае, августе и сентябре 2019 г. Интенсивность суббуревой активности также была относительно низкой: максимальные значения AE индекса не превышали 2 000 нТл.

В целях развития арктической сети магнитных обсерваторий и развертывания новых обсерваторий проведена оценка возможного выбора места для развертывания современной геомагнитной обсерватории стандарта INTERMAGNET в АЗРФ. Сотрудниками ГЦ РАН была осуществлена экспедиция на Кольский полуостров. Выбор места для будущей обсерватории проводился с учетом требований, предъявляемых к местам расположения обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ. В ходе экспедиции были детально обследованы места расположения действующих и исторических геомагнитных станций и обсерваторий. По

итогах экспедиции сделан вывод, что территория обсерватории «Ловозеро» Полярного геофизического института и ее инфраструктура полностью удовлетворяют всем требованиям необходимым для развертывания геомагнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ.

Получаемые данные о магнитном поле Земли предназначены, в том числе, для сопровождения работ по наклонному бурению при развитии нефтяных месторождений на северных территориях Западной Сибири. Было проведено системно-аналитическое исследование выбора места размещения магнитометрической обсерватории на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Комплексу сформулированных требований удовлетворяет территория пос. Тазовский. Работа выполнена при консультации ВНИИГНИ и Центра научных исследований ЯНАО.

На Третьем Форуме Полярных Данных (Финляндия, Хельсинки, 18–22 ноября 2019 г.) представлена информация о состоянии и перспективах развития российского сектора геомагнитных обсерваторий высшего стандарта качества ИНТЕРМАГНЕТ в Арктической зоне.

11.3 Исследование мест возможного развертывания обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ на Кольском полуострове

Одной из актуальных проблем российского сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ является недостаток действующих обсерваторий в высокоширотных областях (геомагнитная широта $>60^\circ$) и, в частности, в заполярной зоне. На 2019 год всего одна обсерватория российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ (Восток, IAGA-код VOS) расположена в заполярной зоне южного полушария (78.464 ю.ш., геомагнитная широта -83.507). В северном полушарии отсутствуют высокоширотные российские обсерватории. Целью поездки сотрудников ГЦ РАН на Кольский полуостров стал выбор места будущей обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ. Подбор места будущей обсерватории проводился с учетом стандартных требований, предъявляемых к местам расположения обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Наряду с этим, на место расположения будущей обсерватории накладывались ограничения, вызванные стремлением обеспечения оптимального покрытия северных территорий обсерваториями ИНТЕРМАГНЕТ. Предполагаемое место расположения новой обсерватории должно было быть достаточно удаленным от существующей обсерватории Соданкюля и строящейся обсерватории «Белое Море» (рис. 11.1).

Предварительный анализ мест расположения действующих и исторических станций

IAGA (таблица 11.1), расположенных на Кольском полуострове, показал, что предпочтительными для размещения новой обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ местами являются магнитные станции Полярного Геофизического Института (ПГИ) и сейсмостанции Кольского филиала Геофизической службы РАН (КоФ ГС РАН).

В ходе командировки, сотрудники ГЦ РАН обсудили возможности по созданию новой обсерватории с руководством ПГИ и КоФ ГС РАН. Установлено, что требованиям к инфраструктуре, предъявляемым к обсерваториям ИНТЕРМАГНЕТ удовлетворяют только точки Териберка, Ловозеро и Лопарская. Вследствие развитой инфраструктуры, отсутствия шумов и постоянного наличия персонала выбор сделан в пользу станции Ловозеро ПГИ.

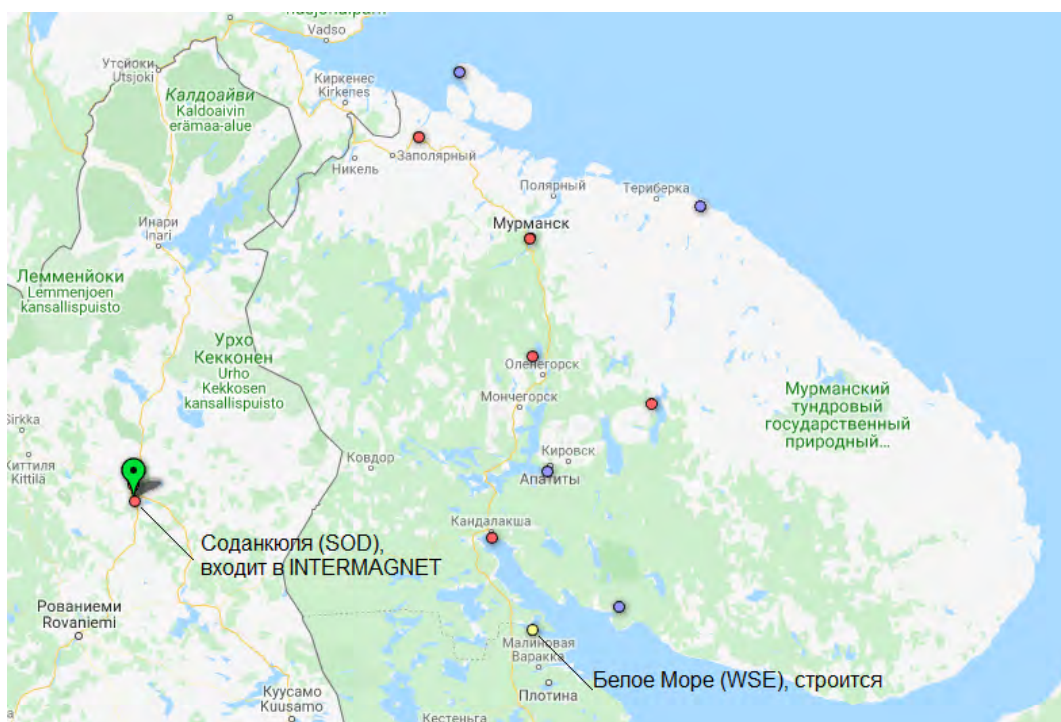


Рисунок 11.1 – Карта Кольского полуострова и станции наблюдения за магнитным полем Земли

Таблица 11.1. Геомагнитные координаты станций наблюдения за магнитным полем Земли

Код	Название	Географическая		Геомагнитная		Статус
		Широта	Долгота	Широта	Долгота	
LOZ	Ловозеро	67.970	35.020	63.41	126.76	Станция ПГИ
MMK	Лопарская	68.250	33.080	63.93	125.45	Станция ПГИ
RYB	Рыбачий	69.900	31.900	65.63	125.97	Сейсмостанция КоФ ГС РАН
TUM	Туманный	69.140	35.820	64.41	128.33	Станция ПГИ
—	Териберка	69.201	35.105	64.55	127.83	Сейсмостанция КоФ ГС РАН
WSE	Белое Море	66.552	33.100	62.33	124.14	Обсерватория ГЦ РАН

11.4 Оценка долготных различий в величине вариаций магнитного склонения при магнитных возмущениях

Важным компонентом технологии для подземной навигации при наклонно-направленном бурении глубоких скважин в Арктике является контроль ориентации буровой колонны под землей, основанный на данных непрерывных измерений магнитного поля магнитометром-инклинометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны. Наиболее критичным параметром для подземной навигации является магнитное склонение. Амплитуда и частота геомагнитных возмущений увеличивается с увеличением магнитной широты и достигает максимума приблизительно на 70° магнитной широты. Самые большие колебания вызваны суббурями. С помощью моделирования и анализа реальных измеренных данных выявлено, что при суббурях существуют значительные различия в величине вариаций магнитного склонения в высоких широтах северного полушария как функция долготы. Интенсивность вариаций склонения меняется в зависимости от геомагнитной долготы из-за различий склонения земного диполя и горизонтального магнитного поля вдоль постоянных геомагнитных широт. Согласно мировой магнитной модели (WMM) в зоне, где горизонтальная напряженность поля (H) меньше 2 000 нТл, значения магнитного склонения неточны и подвержены критическим колебаниям в периоды геомагнитных возмущений (рис. 2). Зона неопределенности магнитного склонения вытянута вдоль меридианов 90° восточной и западной долготы и затрагивает районы западной Сибири. Склонение меняется значительно в зависимости от долготы вдоль постоянных геомагнитных широт. Наибольшее положительное модельное склонение в западной части Сибири около 170° геомагнитной долготы, а отрицательное – около 30° геомагнитной долготы в Лабрадорском море. В дипольной системе координат наибольшие отрицательные и положительные углы склонения находятся около 110° и 250° геомагнитной долготы соответственно. Регион наибольших различий между склонением и склонением диполя (до 4°) находится около 160° геомагнитной долготы в Западной Сибири.

При суббуре электроджеты развиваются в E-области ионосферы. Они описываются в дипольной системе координат. Магнитные элементы в этой системе не всегда совпадают с элементами на уровне земли, т.е. локальными D, I и F, по которым осуществляется подземная навигация. Так как соотношение между склонением в дипольной и геомагнитной системах координат изменяются пространственно на поверхности Земли, сигнатура идентичных суббурь может варьироваться в зависимости от долготы в разных координатных системах (например, в географический XYZ и геомагнитной DHZ или DIF),

даже если сами суббури одинаковы по интенсивности и другим параметрам.

Проведена количественная оценка увеличения или уменьшения амплитуды вариации магнитного склонения при заданных идентичных магнитных возмущениях (интенсивности и геометрии суббурового электроджета, вытянутого вдоль дипольной магнитной широты) для различных долготных секторов Арктической зоны. Это позволяет выделить географические регионы, для которых авроральные магнитные суббури наиболее опасны с точки зрения их влияния на колебания магнитного склонения.

В модели ионосферный суббуровой электроджет с оком, текущим на запад, располагался на высоте 110 км от поверхности Земли и по долготе занимал четыре часа местного магнитного времени (60° геомагнитной долготы) с центром в местную полночь. Плотность тока 10^6 А. Модельная суббуря имела продолжительность два часа, изменение горизонтальной магнитной H компоненты аппроксимировалось равнобедренным треугольником, минимум H составлял -1 000 нТл. Географические точки в различных долготных секторах, но на одной и той же географической широте, в которых располагался центр суббурового электроджета, обозначены на рис. 11.2 цифрами 1–4. В таблице 11.2 приведены значения геомагнитной широты и значения H и D компонент поля для каждой точки. Эти значения округлены до тысяч (для H) и десятков (для D).

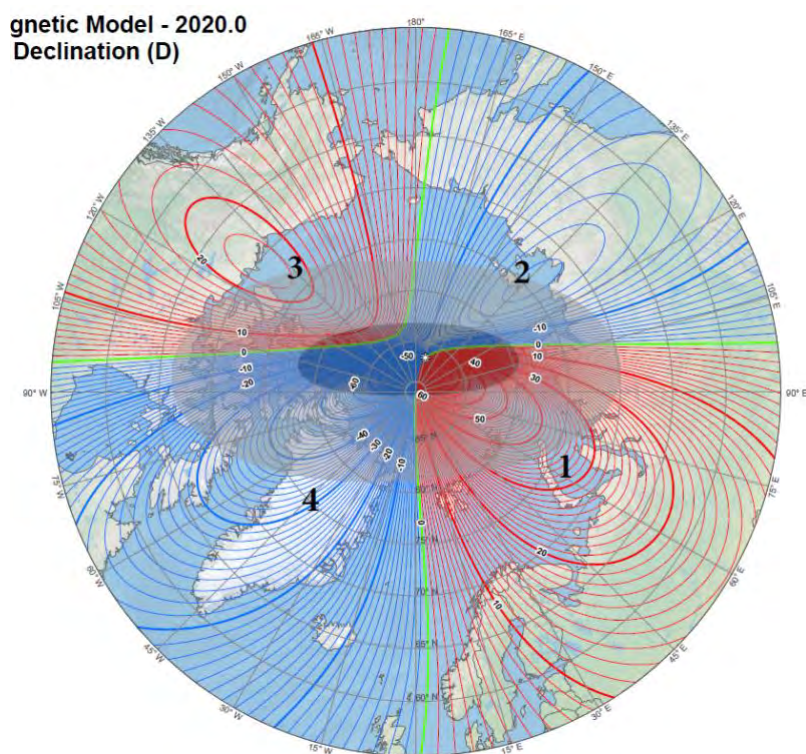


Рисунок 11.2 – Карта магнитного склонения по модели WMM. Зоны малых значений D затенены. Цифрами 1–4 обозначены точки в четырех долготных секторах, в которые помещены центры модельного суббурового электроджета

Таблица 11.2. Параметры модельных точек, рассчитанные по модели главного поля

№	Геом. долгота (гр.)	H (нТл)	D (гр.)	MLT-местная полночь
1	180	5000	40	20
2	220	4000	-20	16
3	300	9000	20	12
4	10	10000	-30	3

Компоненты магнитного поля от суббурового ионосферного электроджета на поверхности Земли рассчитывались по закону Био-Савара-Лапласа и пересчитывались в магнитное склонение. Модельный центр суббури помещался в различные долготные сектора. По результатам моделирования было рассчитано изменение величины склонения D в ходе бури в различных областях, имеющих одинаковую геомагнитную широту (60°), но разную долготу. Результаты представлены на рис. 11.3. Можно видеть, что отклонения D варьируются в зависимости от долготного сектора. Наибольшие положительные отклонения, достигающие 2° , характерны для западной части Сибири, а отрицательные – для ее восточной части. В районе Гренландии (Аляски) отклонение D положительно (отрицательно), но меньшей амплитуды.

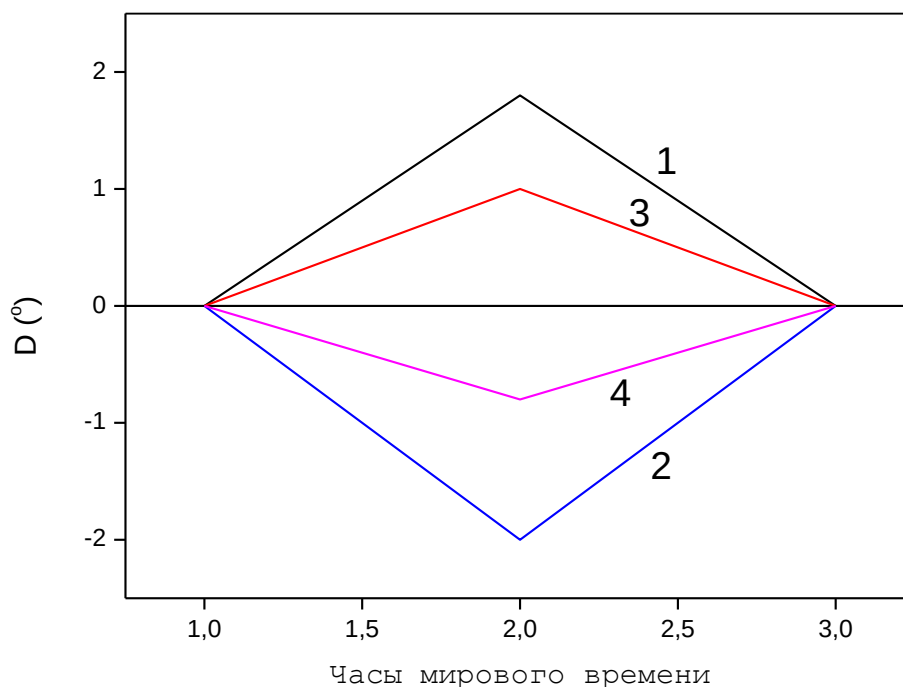


Рисунок 11.3 – Изменение склонения D на уровне земли в различных долготных секторах от модельного суббурового электроджета

11.5 Выводы

Полученные результаты связаны с разработкой новой технологии для подземной навигации при наклонно-направленном бурении глубоких скважин в Арктике. Такие скважины могут достигать резервуаров, расположенных за несколько километров от исходной точки бурения, в том числе под морским дном.

Магнитное поле Земли используется в качестве эталона при навигации бурового оборудования, а его мониторинг имеет большое значение в контексте эксплуатации ресурсов в Арктике. Критическим параметром для подземной навигации при буровых работах является магнитное склонение, по которому вычисляется азимут направления. Поскольку геомагнитная активность увеличивается с увеличением широты, в Арктике геомагнитные колебания большой амплитуды создают проблемы для компаний, занимающихся бурением наклонно-направленных и горизонтальных скважин для добычи углеводородов. Местное магнитное склонение в основном определяется внутренним динамо Земли и намагниченностью земной коры. Магнитные возмущения, вызванные ионосферными токами, приводят к тому, что спорадические изменения вокруг этого, достаточно стабильного, значения, бывают достаточно велики, и их нельзя игнорировать.

Сеть полномасштабных магнитных обсерваторий в российском секторе Арктике пока не создана. В регионе функционируют несколько вариометрических станций, а обсерватории расположены только в более низких широтах. В настоящее время рассматривается возможность создания новых полномасштабных высокоширотных обсерваторий. Важной задачей остается дальнейшее совершенствование систем сбора и обработки магнитных данных, а также разработка методики детектирования геомагнитных возмущений и их фильтрации в целях коррекции показаний подземной телеметрии. Результаты проекта внесли значимый вклад в решение этой задачи.

12. Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы

Номер проекта РНФ: 16-17-00121-П

Номер госрегистрации: АААА-А16-116030110009-6

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

Ответственный исполнитель: д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко

12.1 Поддержание станций регистрации геомагнитного поля и геоиндуцированных токов в ЛЭП

За отчетный период получила дальнейшее развитие магнитная обсерватория «Белое море» (IAGA-код WSE). В течение года исправно осуществлялись непрерывная регистрация данных и их передача в геомагнитный центр на базе ГЦ РАН. Данные представляют собой вариации трех компонент и модуля вектора магнитного поля с 15-секундной дискретизацией. По мере поступления данных в ГЦ РАН в автоматическом режиме обеспечивается их обработка при помощи авторских математических алгоритмов, при этом решаются следующие задачи: а) распознавание техногенных помех, б) многокритериальная оценка магнитной активности, с) экспорт исходных данных, результатов распознавания и оценки активности в СУБД. Установленный прибор POS-4 отечественной разработки помимо самих измерений обеспечивает оценку качества получаемых измерений при помощи параметра QMC, который имеет смысл среднеквадратической погрешности данных. На протяжении 2019 г. параметр QMC систематически имел низкое значение порядка 5-10 пТл, что свидетельствует о высоком качестве регистрируемых данных.

Данные обсерватории «Белое море» регулярно сравниваются с данными соседних обсерваторий – «Санкт-Петербург», «Абиско» (Швеция) и др., а также с модельными прогнозами. За отчетный период состоялось две экспедиции сотрудников ГЦ РАН на обсерваторию. Станция «Белое море» играет важную роль в укреплении сети магнитных наблюдений обсерваторского класса в Арктической зоне РФ наряду с обсерваторией «Мыс Шмидта» (Чукотский АО) и двумя строящимися обсерваториями «Самойловский» (Республика Саха) и «Сабетта» (Ямало-Ненецкий АО) (рис. 12.1). За счет средств гранта оказывалась поддержка (оплата каналов передачи и приобретение ноутбука для регистрации) системе регистрации геоиндуцированных токов (ГИТ) Полярного Геофизического Института КНЦ РАН в линиях электропередач (ЛЭП) Кольского полуострова и Карелии.

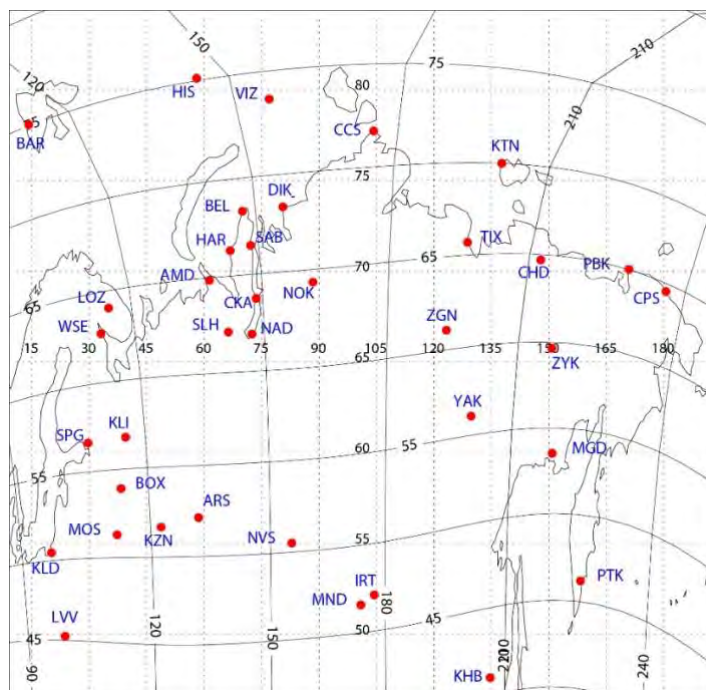


Рисунок 12.1. — Карта с положением российских магнитных станций, включая станции, поддерживаемые ГЦ РАН

12.2 Анализ тонкой структуры геомагнитных возмущений и генерация интенсивных ГИТ

В ходе работ получены важные результаты о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений и их влиянии на наведенные токи в промышленных линиях электропередач. Решение задач по расчету и предсказанию ГИТ в технологических системах не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики, а потребовало выяснения фундаментальных вопросов о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Быстрые изменения dB/dt магнитного поля Земли во время магнитных бурь и суббурь могут вызывать большие ГИТ, которые могут оказывать вредное воздействие на технологические системы. Космическая погода активизирует глобальные электромагнитные и плазменные процессы в околоземной среде. Однако при более детальном анализе тонкой структуры геомагнитных возмущений обнаружено, что генерация интенсивных ГИТ в значительной степени связана не с глобальными геомагнитными возмущениями большой амплитуды (магнитные бури), а с локальными быстрыми вариациями сравнительно небольшой амплитуды, наложенными на глобальные возмущения. Данные системы регистрации ГИТ Полярного геофизического института КНЦ РАН в линиях электропередач (ЛЭП) Кольского полуострова и Карелии и магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик variability геомагнитного поля [Belakhovsky et al., 2019]. Выделены несколько типов

таких быстрых процессов и рассмотрено их влияние на ЛЭП на Кольском полуострове: межпланетные ударные волны, конвективные ионосферные вихри; импульсная структура суббурь; и иррегулярные пульсации РiЗ (рис. 12.2). Показано, что во время рассматриваемых импульсных событий ионосферные токи колеблются как в направлении восток-запад, так и в направлении север-юг, и они индуцируют ГИТ в широтно-вытянутой ЛЭП. Таким образом, тонкая структура быстрых геомагнитных вариаций во время бурь и суббурь представляет интерес не только для фундаментальной космофизики, но и оказалась крайне важной с практической точки зрения.

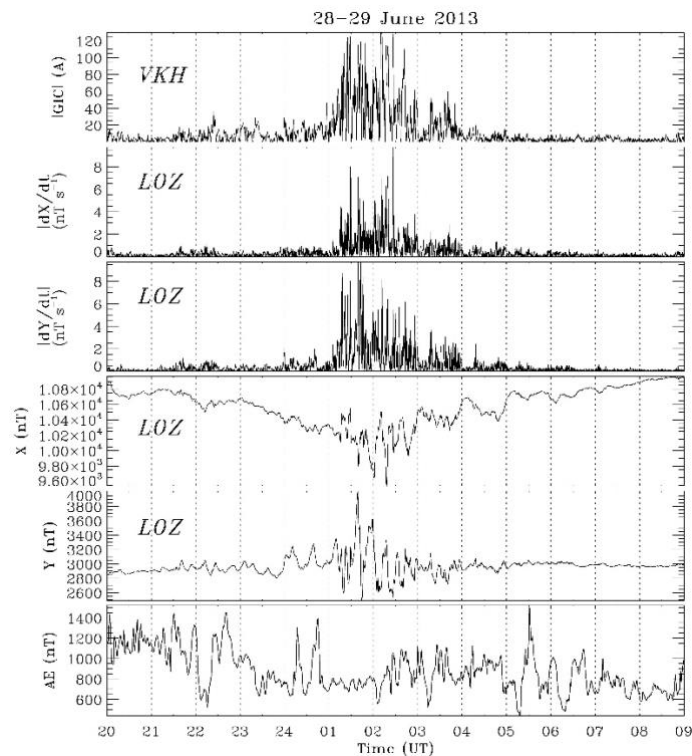


Рисунок 12.2. — Вариации амплитуды ГИТ на станции Выходной, производных геомагнитного поля, возмущений геомагнитного поля, и АЕ индекса, характеризующего интенсивность аврорального электроджета.

Быстрые изменения магнитных полей, связанные с большими изолированными магнитными возмущениями (Magnetic Impulse Events) с амплитудами $|\Delta B|$ порядка сотен нТл и 5–10-минутных периодов могут вызвать всплески ГИТ, которые могут нанести вред энергетическим системам. В статье [Engebretson *et al.*, 2019] представлены статистические характеристики импульсов МІЕ в ночное время, которые наблюдались в арктической зоне Канады с 2014 по 2017 гг., с использованием данных четырех сетей магнитометров: MACCS, AUTUMNX, CANMOS и CARISMA, охватывающих диапазон магнитных широт от 68 до 78 градусов. Большинство, но не все МІЕ, были связаны с суббурями: примерно 2/3 произошли между 5 и 30 мин после начала суббури. Исследование методом наложенных

эпох 21 сильных импульсов показало, что самые большие значения $|dB/dt|$ значения появляются в радиусе ~ 275 км, в области между направленными вверх и вниз продольными токами. Статистические распределения амплитуд как $|dB|$ так и $|dB/dt|$ хорошо описываются лог-нормальным распределением на всех станциях. Этим же законом зачастую описывается турбулентность околослойной плазмы. Знание статистических характеристик этих событий позволило оценить вероятность возникновения экстремальных импульсных возмущений, используя экстраполяцию лог-нормального распределения [Vorobev et al., 2019]. Обнаруженные в ночное время импульсы, по-видимому, связаны с локализованными авроральными структурами, и вызываются выбросами потоков частиц и всплесками потоков плазмы (Burst Bulk Flow) в хвосте магнитосферы.

Локализованные структуры, связанные с вихревыми ионосферными токами, ответственны за всплески интенсивности геоиндуцированных токов в протяженных ЛЭП. Интенсивными возмущениями, которые могут наблюдаться не только в период высокой магнитосферной активности (магнитные бури и суббури), но и при спокойной геомагнитной обстановке, являются специфичные для дневной высокоширотной ионосферы движущиеся конвективные вихри *TCV* (travelling convection vortices), являющимися откликом на локальное воздействие на магнитосферу. Наземным проявлением *TCV* являются уединенные магнитные импульсы *MIE* (magnetic impulse event) – спорадические возмущения геомагнитного поля длительностью $\sim 5\text{--}10$ мин и с амплитудами ~ 100 нТ. В картине эквивалентных ионосферных токов *TCV* проявляется как двойной вихрь Холловских токов с характерными размерами порядка первых сотен км. Эти вихревые структуры образуются вокруг пары (восходящего и нисходящего) продольных токов между ионосферой и магнитосферой. Пространственная локальность этого возмущения приводит к тому, что оно проявляется не только в горизонтальной (X), но и в вертикальной (Z), компонентах магнитного поля. Обычно *TCV* распространяются по долготе в анти-солнечном направлении со скоростью $\sim 5\text{--}10$ км/с, которая соответствует ионосферной проекции скорости обтекания флангов магнитосферы потоком солнечной плазмы. Физический механизм возбуждения *TCV* и его взаимодействия с ионосферой не определены однозначно. Возможным источником *TCV/MIE* могут быть импульсные вариации динамического давления солнечного ветра и спорадически возникающие локальные области горячей плазмы в переходном слое магнитосферы (hot flow anomalies). Масштаб и центр вихря сейчас на практике оценивается “на глаз”. В работе [Чинкин и Соловьев, 2019] впервые предложена автоматизация этой процедуры, а также метод выделения мелкомасштабного и короткоживущего вихря на крупномасштабном фоне. К

данным каждой станции применяется фильтр для устранения низкочастотной инструментальной погрешности. На следующем этапе реализуется пространственная интерполяция отфильтрованных данных на регулярную географическую сетку. Для этого применяются кубические полиномы к данным в неравномерно расположенных базовых точках, которые представляют собой координаты станций в плоском приближении. Получившаяся картина векторного поля регуляризуется так, чтобы она удовлетворяла условию потенциального поля. Автоматическое обнаружение центров и оценка размеров выделенных вихрей основаны на поиске экстремума соответствующей функции «завихренности поля». Эффективность предложенного метода была продемонстрирована на примере трех *TCV*-событий.

12.3 Разработка статистических моделей для оценки величины ГИТ

Помимо анализа отдельных событий с экстремальными значениями ГИТ (более 100 ампер), были разработаны статистические модели, позволяющие оценить ожидаемую величину ГИТ при заданных параметрах геомагнитного возмущения. На основе данных наблюдений магнитных обсерваторий сети IMAGE и станции по регистрации ГИТ в ЛЭП, в работе [Воробьев и др., 2019] исследованы корреляционные взаимосвязи между вариациями геомагнитного поля и ГИТ за 2015 г. Наибольшую корреляцию интенсивность ГИТ имеет с вариабельностью поля $|dB/dt|$ ($R > 0.7$), при этом корреляции ГИТ с вариациями производных X и Y компонент близки. Суточный ход среднего значения вариабельности поля $|dB/dt|$ и интенсивности ГИТ имеют широкий ночной максимум, связанный с суббуревой активностью, и утренний максимум, предположительно обусловленный интенсивными геомагнитными пульсациями типа Pc5-Pi3. Построена регрессионная линейная модель для оценки величины ГИТ по производной во времени геомагнитного поля и AE-индекса. Статистические распределения плотности вероятности значений производной геомагнитного поля и ГИТ соответствуют лог-нормальному закону [Vorobev et al., 2018]. Таким же законом часто описываются свойства МГД турбулентности в хвосте магнитосферы, что может свидетельствовать о близости этих явлений. На основании построенных распределений оценены вероятности экстремальных значений $|dB/dt|$ и ГИТ в рассматриваемой системе.

12.4 Спектральный состав возмущений геомагнитного поля, теллурических полей, и ГИТ

Определяются ли величины ГИТ полностью только вариациями магнитного поля, т.е. величиной dB/dt ? На этот вопрос дан ответ в работе [Kozyreva et al., 2019], где анализируется временная и пространственная изменчивость геомагнитных и теллурических

электрических полей в Восточной Фенноскандии. Эти вариации сравниваются с доступными измерениями ГИТ в ЛЭП на Кольском полуострове и в Карелии. Информация о тензорах импеданса земной поверхности в рассматриваемом регионе была ранее получена при глубинном магнитотеллурическом зондировании в проекте BEAR. Данные сети геомагнитных наблюдений IMAGE анализируются совместно с результатами измерений ГИТ в близлежащих ЛЭП Кольского полуострова и Карелии и синтетическими теллурическими полями. Электротеллурическое поле было синтезировано по вариациям геомагнитного поля с использованием комплексного тензора импеданса. Вариации геомагнитного поля и теллурического поля были проанализированы для различных проявлений космической погоды: магнитных бурь и пульсаций P_{i3}. Проведено сравнение спектрального содержания вариаций геомагнитных и теллурических полей, и ГИТ. Это сравнение показывает, что обычно используется в качестве характеристики ГИТ производная геомагнитного поля, dB/dt , не полностью соответствует ГИТ. Отчетливо проявляется подавление высокочастотной составляющей в спектре ГИТ по сравнению с изменениями dB/dt , которое определяется частотно-зависимым характером геоэлектрического отклика земной коры на вариации геомагнитного поля. В работе [Соколова и др., 2019] представлены результаты изучения временной и пространственной изменчивости геомагнитного и теллурического полей на территории центральной и восточной части Фенноскандинавского щита во время возмущений космической погоды. Для синтеза теллурических полей по наблюдаемым геомагнитным вариациям использовались оценки магнитотеллурических импедансов площадного электромагнитного зондирования Фенноскандии BEAR. Сравнение спектрального состава геомагнитных, теллурических и ГИТ вариаций в ряде пунктов для различных событий космической погоды показало, что обычно используемая как мера ГИТ-возмущений производная геомагнитного поля по времени (dB/dt) контролирует спектральный состав ГИТ не полностью. Анализируемые теллурические поля и наблюдаемые ГИТ проявляют существенную зависимость от индукционного отклика проводящей Земли, характер которого сильно меняется в различных структурно-геологических доменах Фенноскандинавского щита. Пространственные вариации теллурического поля и ГИТ, обусловленные неоднородностями глубинной геоэлектрической структуры региона, накладываются на закономерный тренд снижения их амплитуд при удалении от авроральных широт. На основе данных магнитотеллурических зондирований для ряда областей получены оценки экстремальных величин теллурических полей во время геомагнитных бурь и суббурь, что является ключевой информацией для прогнозирования ГИТ в региональных ЛЭП.

12.5 Компьютерное моделирование работы промышленных трансформаторов при наличии квази-постоянных ГИТ

В сотрудничестве с Московским Энергетическим Институтом (Москва) начаты работы по компьютерному моделированию работы промышленных трансформаторов в условиях квази-постоянных ГИТ. В работе [Гусев и др., 2019] представлены результаты исследования влияния токов со знакопостоянными составляющими, протекающих по обмоткам силовых трансформаторов, на переходные процессы, вызванные короткими замыканиями и оперативными переключениями в электроэнергетической системе. Исследования процессов намагничивания при протекании знакопостоянных токов были проведены на расчетной модели в программной среде EMTP_RV (PowerSys, Франция). Верификация модели проведена путем подтверждения паспортных данных трансформатора и на основе натурных испытаний на трехфазном силовом трансформаторе марки ТЛС_25/6. Определена вольт-секундная характеристика намагничивания силового трансформатора знакопостоянным током. Обоснована необходимость учета ГИТ при расчетах термической и электродинамической стойкости трансформаторов, при выборе уставок релейных защит.

12.6 Средства анализа динамики геомагнитных возмущений высокого порядка

Магнитные возмущения на Земле, являющиеся отражением процессов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, можно контролировать, сравнивая временные ряды магнитных записей и параметров космической погоды. Однако серьезным недостатком анализа наземных магнитограмм является неизбежная вариация магнитного отклика, вызванная постоянными изменениями местоположения станции относительно Солнца и магнитосферы. Идеальным, но невозможным решением этой трудности, которое могло бы разделить временные и пространственные вариации, было бы развертывание «стационарной» обсерватории с фиксированным положением в солнечно-магнитосферной системе координат. Однако желаемый результат можно получить с помощью метода «виртуальных магнитограмм» (VM) [Kozyreva et al., 2019]. Этот метод был реализован для ключевых областей магнитосферы (ночная авроральная область и дневной касп) как инструмент для мониторинга реакции магнитосферы на вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). VM для фиксированной системы отсчета строится путем 2D-интерполяции 1-мин магнитограмм с мировой сети магнитных станций (>300). В частности, помимо суббурь, реакция магнитосферы на воздействие солнечного ветра и ММП включает «пилообразные» (sawtooth) колебания, которые представляют собой квазипериодическую (с периодичностью 2–3 часа) серию изолированных суббурь,

сопровождающихся инъекциями энергичных частиц. Пилообразные колебания предположительно обусловлены либо серией повышений давления солнечного ветра на фоне длительного южного ММП, либо они являются внутренним магнитосферным откликом с собственной периодичностью на устойчивое повышенное поступление энергии солнечного ветра. Применение ВМ к выделению и анализу пилообразных колебаний для события 14 октября 2000 г. ясно показывает квазипериодический характер отклика магнитосферы в ночное время на фоне слабой магнитной бури ($|\text{SYM-H}| \sim 100$ нТл), обусловленный постоянным (более 17 часов) ММП южного направления B_z (положительное электрическое поле солнечного ветра E_y). Временной ряд ВМ указывает на появление 8 суббурь с амплитудами магнитных бухт от ~ 200 нТл до ~ 700 нТл. Интенсификация каждой суббури более отчетливо видна на ВМ, чем в поведении АЕ или РС индексов. Кроме того, анализ одной комбинированной ВМ гораздо проще, чем стандартный анализ многочисленных магнитограмм из множества станций с неизбежной пространственно-временной неопределенностью. База данных рассчитанных ВМ, а также одновременные межпланетные параметры (плотность и электрическое поле солнечного ветра) и геомагнитные индексы (SYM-H, PC, AE), свободно доступны через специально спроектированный сайт (<http://vm.gcras.ru>) для всех заинтересованных исследователей. ВМ были рассчитаны на период с 1994 г. по настоящее время.

12.7 Быстрые возмущения геомагнитного поля по данным низкоорбитальных спутников

Рассмотрен вопрос о том, насколько высока чувствительность магнитометров низкоорбитальных спутников SWARM путем проверки их способности надежно регистрировать слабые УНЧ сигналы на фоне аппаратурных и естественных помех. В работе [Мартинес-Беденко и др., 2019] рассмотрены волновые возмущения геомагнитного поля типа Pi2 (периоды 1–2 мин), зарегистрированные одновременно магнитометрами на низкоширотных станциях и на спутниках SWARM как во время начала суббури, так и в несуббуревые периоды. Создана база (с 2013 г. по наст. время) скорректированных данных спутников SWARM возмущений магнитного поля (удаление главного модельного магнитного поля Земли, поворот в систему координат, ориентированную вдоль силовых линий геомагнитного поля), и разработаны программы отбора событий с одновременной регистрацией УНЧ сигналов на спутниках и на наземных станциях. Обнаружено, что в ночное время волны Pi2 в верхней ионосфере и на Земле почти одинаковы по амплитуде и синфазны. Эти волны на спутнике в основном проявляются в продольной (вдоль геомагнитного поля) и радиальной магнитных компонентах. Сравнение результатов

наблюдений с моделью взаимодействия МГД волн с системой ионосфера – атмосфера – Земля показывает, что ночные низкоширотные сигналы Pi2 создаются магнитосферными быстрыми магнитозвуковыми волнами, проходящими при распространении к Земле через область непрозрачности. Результаты аналитических оценок и численное моделирование согласуются со свойствами Pi2 сигналов, зарегистрированных в верхней ионосфере и на Земле. Таким образом, магнитометры спутников SWARM способны надежно регистрировать даже слабые УНЧ возмущения с амплитудой не более нескольких тысячных % от величины геомагнитного поля.

Исследовано поведение продольных токов, текущих вдоль силовых линий геомагнитного поля и связывающих ионосферу с пограничными слоями магнитосферы [Lukianova, 2019]. Продольные токи и являются источником геомагнитных возмущений на поверхности Земли. Для наиболее мощных за последние годы магнитных бурь в марте 2015 г. и сентябре 2017 г. по данным магнитометров спутников Swarm выявлены экстремальные значения продольных токов на пространственных масштабах от тысяч до единиц километров. Бури отличались друг от друга интенсивностью и морфологией, в частности различным типом суббуревой активности. В первом случае усиление суббуревой активности предшествовало максимуму *Dst*, а во втором – пики суббурь и *Dst* практически совпадали. Показано, что в том случае, когда пик *AE(AL)* индекса не совпадает с пиком *Dst*, максимум плотностей тока достигается во время интенсификации суббуревой активности. На пике суббури плотности втекающих и вытекающих продольных токов достигают 3–4 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, в то время как уровень в невозмущенном состоянии составляет около 0.1–0.2 $\mu\text{A}/\text{m}^2$. Минимальная широта экваториальных границ области, занятой токами, ограничена 50° магнитной широты для обеих бурь, несмотря на разницу в интенсивности. Мелкомасштабные (~10 км) токи с плотностью до нескольких десятков $\mu\text{A}/\text{m}^2$ появляются в главную фазу бури во время активации суббурь. Локальные повышения концентрации и температуры электронов, показывают, что токи генерируются на краях авроральных дуг.

12.8 Список научных работ по гранту РНФ 16-17-00121, опубликованных в 2019 г.

Российские журналы

- Гусев Ю. П., Лхамдондог А., Монаков Ю. В., Ягова Н. В. (2019) Влияние знакопостоянного тока на процессы намагничивания трехфазных силовых трансформаторов, *Электричество*, №9, 16–21, [doi:10.24160/0013-5380-2019-9-16-21](https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-9-16-21).
- Мартинес-Беденко В. А., В. А. Пилипенко, Е. Н. Федоров, Э. Нахайо, Э. Яйзенгау (2020) Низкоширотные Pi2 волны по наблюдениям на спутниках *SWARM* и наземных станциях.

Космические Исследования, 58, №1, 5–15, DOI: 10.1134/S0023420620010057.

Соколова Е. Ю., Козырева О. В., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Епишкин Д. В. (2019) Вариации геомагнитных и теллурических полей в северо-западных регионах России при возмущениях космической погоды: Связь с геоэлектрической структурой и индуцированными токами в ЛЭП, Геофизические процессы и биосфера. Т. 18, № 4, 66–85. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-7>.

Международные журналы

Belakhovsky V., V. Pilipenko, M. Engebretson, Ya. Sakharov, V. Selivanov (2019) Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines, J. of Space Weather and Space Climate, 9, A18, doi:10.1051/swsc/2019015 (Q2)

Engebretson M. J., Pilipenko V. A., et al. (2019) Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada, 1, Survey and statistical analysis. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124. [doi:10.1029/2019JA026794](https://doi.org/10.1029/2019JA026794) (Q1)

Kozyreva O. V., V. A. Pilipenko, A. A. Soloviev, M. J. Engebretson (2019a), Virtual magnetograms – a tool for the study of geomagnetic response to the solar wind/IMF driving, Russian J. Earth Science, 19, ES2005, doi:10.2205/2019ES000654.

Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., Sakharov Ya., Epishkin D. (2019b) Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents, in: “Problems of Geocosmos-2018”, T. B. Yanovskaya et al. (eds.), Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 297–307, doi:10.1007/978-3-030-21788-4_26.

Vorobev A. V., V. A. Pilipenko, Ya. A. Sakharov, V. N. Selivanov (2019a) Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet and geomagnetically induced currents, Solar-Terrestrial Physics, 5, no.1, 35–42, doi:10.12737/stp-512019052018.

Vorobev A. V., V. A. Pilipenko, Ya. A. Sakharov, V. N. Selivanov (2019b) Statistical properties of the geomagnetic field variations and geomagnetically induced currents, in: “Problems of Geocosmos-2018”, T. B. Yanovskaya et al. (eds.), Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer Nature Switzerland AG 2020, 39–50, doi:10.1007/978-3-030-21788-4.

Vorobev A., V. Pilipenko, M. Engebretson (2019c) Nightside magnetic impulsive events: Statistics and possible mechanisms, in: “Trigger Effects in Geosystems”, 607–614, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, G. Kocharyan and A. Lyakhov (eds.), <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0> (ИФЗ+ГЦ, РНФ).

Доклады на конференциях по проекту за 2019 г.

- Чинкин В. Е., А. А. Соловьев. Оценка центров и масштабов конвективных вихрей в ионосфере (устный) // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 22–23 апреля 2019 г. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019. С. 84
- Kozyreva O., V. Pilipenko, L. Baddeley, Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents, ICS-14, 29 September – 04 October 2019, Tromso, Norway.
- Lukianova R., SWARM field-aligned currents during the September 2017 severe magnetic storm, Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU General Assembly, EGU2019-13556, 2019
- Pilipenko V., Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents, “The Plasma Physics of the Magnetosphere”, Pollenzo, Italy, June, 2019.
- Soloviev A.. Geomagnetic field dynamics in the Arctic region: sources, observations and models (plenary) // Arctic Science Summit Week 2019, 22–30 May 2019, Arkhangelsk, Russia, 2019
- Soloviev A., A. Smirnov, S. Bogoutdinov, S. Agayan, Mathematical tools for estimating geomagnetic field dynamics based on extensive observatory data processing, 27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8–18 July, 2019.

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

Номер проекта РНФ: 17-17-01215

Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990128-8

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

Ответственный исполнитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В. Г. Гетманов

13.1.1. Первая часть настоящего краткого отчёта содержит рассмотрение вопросов, связанных с проведением экспериментов на мюонном годоскопе по отработке методики ранней диагностики корональных выбросов масс (КВМ), вызывающих геомагнитные бури, апробацией методов идентификации КВМ в гелиосфере, вызывающих мощные магнитные бури, с помощью анализа характеристик и динамики анизотропии временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН (МГ) [NEVOD complex, 2019] и оцениванием эффективности методов ранней идентификации геоэффективных КВМ по данным динамики анизотропии временных рядов матриц МГ-наблюдений.

13.1.2. Было произведено обсуждение результатов, связанных с обеспечением реализации экспериментов на МГ в 2019 году по отработке методики ранней диагностики КВМ, вызывающих геомагнитные бури [Astapov et al., 2013; Barbashina et al., 2008]. Сделан анализ эффективности и контроль за работой МГ, проведена профилактическая работа и обеспечено своевременное устранение возникающих неполадок. Кроме того, была проанализирована геомагнитная обстановка по данным сети нейтронных мониторов [<http://www.izmiran.ru>, (2019)]. На их основе был составлен каталог «Космической погоды» в 2019 г., который использовался для отбора мощных КВМ, вызвавших магнитные бури. Сформирована база данных временных рядов МГ-наблюдений за 2019 г., скорректированных на барометрический и температурный эффекты [Dmitrieva et al., 2011]. Экспериментальные данные использованы для исследования вариаций гелиосферных мюонных потоков (МП) и отработки методов диагностики КВМ, вызывающих геомагнитные бури.

13.1.3. Апробация методов идентификации КВМ в гелиосфере, которые вызывали мощные магнитные бури реализовывалась на основе анализа характеристик динамики анизотропии временных рядов матриц МГ-наблюдений [Борог В. В. и др., (2017)]. С использованием каталога «Космической погоды» были отобраны гелиосферные события по

параметрам индукции межпланетного магнитного поля и ее проекции на вертикальную ось (B и B_z), скорости солнечного ветра (V_{sw}), температуры и плотности протонов солнечного ветра (T_p и N_p). По этой информации были идентифицированы КВМ, повлиявшие наибольшим образом на межпланетное магнитное поле (ММП). Были подготовлены временные ряды матриц данных МГ во время развития магнитосферных возмущений. В матричные МГ-наблюдения были внесены поправки на барометрический и температурный эффекты. С этой целью была собрана и верифицирована информация по температурному профилю атмосферы от двух источников: 1. Центральной аэрологической обсерватории (г. Долгопрудный, Моск. обл.); 2. Глобальной системы сбора данных (The Global Data Assimilation System, GDAS), содержащей данные численной модели атмосферы для предсказания погоды. Собранная информация была использована для апробации метода анализа динамики анизотропии временных рядов матриц МГ во время гелиосферных возмущений. Был подготовлен список КВМ, произошедших в 2019 году. Отбор производился для КВМ со средней скоростью более 500 км/с.

Таким образом, для 2019 года выделено 3 геоэффективных КВМ. Было установлено, что для геоэффективных событий наблюдались характерные увеличения вариаций космических лучей по направлению на Солнце в угловом диапазоне $+0^\circ$ – $+90^\circ$. На средней долготе 45° – 90° в периоды времени с возмущениями, когда $K_p > 4$, доминируют области пониженного МП, причем в моменты максимумов наблюдаются значительные вариации по всем угловым ячейкам мюнограмм.

13.1.4. Оценка эффективности методов ранней идентификации геоэффективных КВМ осуществлялась по данным динамики анизотропии временных рядов матриц МГ [Yashin I. I. et al., (2015)]. Анализировался метод выделения «образа» КВМ выброса по анизотропии углового распределения потока мюонов. Были изучены данные по анизотропии за период 2007–2017 гг. Выявленные направления найденных деформаций и соответствующие глубины/высоты были собраны в соответствующие гистограммы. Ячейки гистограмм были выбраны размером $5^\circ \times 5^\circ$ по зенитным и азимутальным углам. Приведены результаты анализа анизотропии за 11 лет наблюдений, собранные в соответствующие гистограммы направлений деформаций с размером не менее 0.02стерадиан (ср) в зависимости от глубины/высоты: а) – отрицательные деформации с глубиной от -4σ и глубже; б) – отрицательные деформации с глубиной от -3σ и глубже; в) – положительные деформации с высотой от $+3\sigma$ и выше (σ – с.к.з. относительно среднего значения деформаций). Также анализировались гистограммы питч–углов к ММП для деформаций с размером не менее 0.02 ср в ячейках $5^\circ \times 5^\circ$ по данным 2007–2017 гг. в

зависимости от глубины/высоты. На основе полученных распределений были выбраны критерии оценки появления магнитосферного возмущения после образования областей анизотропии через 1, 2, 3 суток.

Важной частью раздела является апробация метода «обратных траекторий». Этот метод, развитый в течение предыдущих двух этапов проекта предназначался для создания простой и эффективной динамической модели КВМ с целью исследования поведения анизотропии космических лучей (КЛ) в зависимости от различных факторов, вызывающих модуляции КЛ в гелиосфере [Kovylyayeva A. et al., (2019), Moestl et al.,(2018)]. К таким факторам относятся полярность ММП, характеристики самого КВМ, влияние значения создаваемого турбулентными явлениями эклектического поля, направления и энергии прилета частиц КЛ, которые попадают, в конечном счете, в апертуру МГ. Разработанная модель КВМ достаточно приближённо описывает изменения ММП в момент прохождения КВМ через Землю. Реальные КВМ имеют более сложную внешнюю и внутреннюю структуру. Но для качественных оценок, важных для понимания топологии развития геоэффективного КВМ и формирования анизотропии КЛ при взаимодействии с возмущенной областью ММП, данная модель является удобной и полезной.

13.2.1. Вторая часть отчёта содержат результаты, касающиеся апробации методов и алгоритмов для временных рядов матриц МГ-наблюдений с целью ранней диагностики геомагнитных бурь и экстремальных событий в гелио и магнитосфере и оценивания эффективности методов ранней диагностики геомагнитных бурь и экстремальных событий в гелио и магнитосфере мюонного годоскопа. Апробация включала рассмотрения алгоритмов моделирования, методов и алгоритмов 1D- полосовой фильтрации и 2D- фильтрации устранения высокочастотных шумов для матричных МГ-наблюдений; метода и алгоритма усреднённых функций вариаций интенсивностей мюонных потоков (ФВИМП); метода и алгоритма функций интенсивностей мюонных потоков (ФИМП); метода и алгоритма распознавания аномалий в МГ-наблюдениях.

13.2.1.2. Для первого варианта апробации был сформирован алгоритм параметрического моделирования временных рядов матричных МГ-наблюдений. Назначение алгоритма состояло в возможности тестирования предложений по проекту. Для параметрической модели предложена структура, учитывающая её аппаратную функцию, вид которой определён конструкцией МГ, атмосферными затуханиями интенсивности МП; модельные Форбуш- затухания приняты в виде функций- лунок; предложена модель шумов в наблюдениях, основанная на матрицах случайных нормально распределённых чисел. Реализованы процедуры двухэтапной оптимизации [Katkovnik V. et al., (2006)],

обеспечивающие вычисление значения параметров предлагаемой модели. Уточнён подход к моделированию, учитывающий пуассоновский характер МГ-наблюдений.

Получены результаты апробационных расчётов для матричных наблюдений, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма моделирования и его эффективность с точки зрения его адекватности и использования для тестирования.

13.2.1.3. Для второго варианта апробации рассмотрен метод и алгоритм 1D-полосовой фильтрации временных рядов экспериментальных матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН [Сидоров Р. В. и др., (2019), Getmanov V. G. et al., (2015)]. Его назначение состоит в обеспечении устранения периодических суточных, годовых, солнечных 11-летних и 27-суточных вариаций во временных рядах матричных МГ-наблюдений. Проанализированы матричные МГ-наблюдения с использованием функции суммарной интенсивности. Во временной области для этой функции оказались видны указанные периодичности. В частотной области на основе дискретного преобразования Фурье были определены частоты среза полосовой фильтрации с целью устранения периодических составляющих.

Были предложено реализовать необходимую 1D-полосовую фильтрацию матричных МГ-наблюдений с помощью традиционных КИХ-фильтров. На их основе были сформированы последовательный и параллельный методы фильтрации. Были установлены области применимости сформированных методов- последовательная фильтрация более эффективна с точки зрения затрат времени для матричных МГ-наблюдений большой длительности, параллельная фильтрация более эффективна для наблюдений малой длительности.

Предложен подход к фильтрации матричных МГ-наблюдений, учитывающий их пуассоновский характер. Для данного случая предложен алгоритм формирования соответствующего КИХ-фильтра с помощью линейного программирования.

Был рассмотрен пример устранения периодических суточных составляющих. Приведённые результаты – вычисления относительных временных затрат на фильтрацию позволили сделать вывод об эффективности предложенных метода и алгоритма 1D-фильтрации.

Разработанные метод и алгоритм могут быть успешно использованы для задач мюонной диагностики экстремальных событий в гелиосфере.

13.2.1.4. Для третьего варианта апробации был рассмотрен метод и алгоритм 2D-фильтрации временных рядов матричных МГ-наблюдений [Getmanov V.G et al. (2019), Lim J. S.(1990)]. Назначение предложенного метода и соответствующего алгоритма состоит в

реализации на их основе устранения шумовых (высокочастотных) составляющих в МГ-наблюдениях. Данные метод и алгоритм основаны на построении систем аппроксимационных скользящих локальных модельных функций с последующим их взвешенным усреднением. Разработан алгоритм 2D-фильтрации, основанный на взвешенном суммировании аппроксимационных скользящих кусочно-линейных модельных функций.

Приведены результаты тестирования алгоритма фильтрации и вычисления его оптимальных параметров на модельных мюонограммах. Произведено оценивание погрешностей алгоритма с помощью статистического моделирования. Представлен пример тестирования на экспериментальных мюонограммах.

Анализ работы метода и алгоритма с модельными МГ-наблюдениями позволил сделать вывод об удовлетворительной апробации предложенной фильтрации для снижения шумов и определения областей с уменьшенной интенсивностью, связанных с Форбуш – эффектами. Сделанные расчёты, касающиеся разработанного метода и алгоритма позволяют сделать вывод, что предложенная 2D- фильтрация является эффективной и может быть использована для задач анализа мюонограмм и выявления двумерных областей с Форбуш- эффектами для оценивания динамики МП.

13.2.2.1. Рассмотрен метод и алгоритм усреднённых ФВИМП на основе матриц МГ-наблюдений. Их назначение состоит в определении на их основе характеристик интенсивностей мюонных потоков, которые дают возможность распознать экстремальные процессы в гелиосфере.

Предложено определение для оценки аппаратной функции, основанное на взвешенной сумме входных функций. С использованием данной оценки вычислялась последовательность оценок входных функций. Для входных ФВИМП находились оценки средних и среднеквадратичных отклонений от средних в виде двумерных функций. Производилось вычисление разностей оценок входных функций и оценок средних. Для сформированных оценок производилось определение функций нормированных ФВИМП в виде отношения вычисленных разностей и среднеквадратичных отклонений.

Осуществлялась двумерная фильтрация вычисленной нормированных ФВИМП с целью устранения высокочастотных шумовых составляющих. Находилась среднее значение для двумерной функции среднеквадратичных отклонений. Оценка усреднённых ФВИМП формировалась в виде произведения двумерных отфильтрованных нормированных функций вариаций и функций среднеквадратичных вариаций. Оценка усреднённых ФВИМП оказалась чувствительным инструментом при распознавании событий в гелиосфере.

Рассматривался пример на выходных функциях, сформированных с помощью разработанного алгоритма моделирования. Предполагалось действие модельной входной функции с равномерным распределением интенсивностей мюонных потоков. Экстремальное событие имитировалось с помощью функции понижения в виде прямоугольной области. Были вычислены нормированные ФВИМП, которые были зашумлёнными, и усреднённая ФВИМП, в которой отчётливо виднелась прямоугольная область с Форбуш-понижением, свидетельствующая о распознавании экстремального события.

Реализовывался пример с модельно- экспериментальными наблюдениями, который предназначался для решения задачи выбора коэффициентов взвешенной суммы входных функций при вычислении оценок аппаратной функции. Моделировалось понижение интенсивности, по аналогии с первым примером. Было продемонстрировано, что выбор весовых коэффициентов позволил обеспечить уверенное распознавание внезапных кратковременных понижений (повышений) интенсивностей без появления помеховых ложных наложений.

Примеры с модельными и модельно- экспериментальными позволили сделать вывод о реализованной апробации метода и алгоритма, в форме установления факта их работоспособности.

Применения усреднённых функций вариаций интенсивностей мюонных потоков производились по отношению к экспериментальным часовым наблюдениям, предварительно подвергнутым полосовой фильтрации. Представленные расчёты интерпретировались как результаты диагностики мюонных потоков. Оказалась очевидной изменчивость понижений и повышений значений оценок функций вариаций, которая совершенно не совпадал с возможной периодической суточной изменчивостью. Представленные расчётные кадры дают возможность рассмотрений пространственных и временных вариаций мюонных потоков, свидетельствующих о процессах в гелиосфере.

Пример с экспериментальными наблюдениями свидетельствует об эффективности предложенного метода усреднённых функций вариаций интенсивностей мюонных потоков для задач мюонной диагностики.

13.2.2.2. Рассматривался метод и алгоритм ФИМП на основе МГ-наблюдений и оптимизации аппаратной функции. Назначение ФИМПР состоит в распознавании определении на её основе экстремальных процессов в гелиосфере.

Оценки входных ФИМП определялись косвенно на основе статистической обработки временных рядов выходных функций и учёте гипотезы о равномерном

распределении интенсивностей на ограниченном временном интервале для входных функций. С этой целью разработан алгоритм двухэтапной оптимизации аппаратной функции и применена пространственная фильтрация. Определена многопараметрическая модель аппаратной функции; принята модель входной функции в виде константы. Для указанных моделей сформирован функционал, представляющий собой сумму квадратичных разностей между функциями МГ-наблюдений и произведениями введённых моделей с добавлениями двух штрафных функций, представляющих собой сумму квадратов штрафных функций и квадрата входной функции. При фиксированных величинах штрафных множителей и константе сформированный функционал представляет собой квадратичную форму. минимизация такого функционала реализуется на основе процедур двухэтапных оптимизаций.

Метод и алгоритм вычисления оценок входных ФИМП был протестирован на модельных и экспериментальных наблюдениях. Были сформированы модельные МГ-наблюдения при гипотезе равномерного распределения интенсивности входных мюонных потоков и смоделированы области понижения интенсивностей в виде лунок. В результате применения алгоритма оптимизации аппаратной функции была получена оценка входной функции, которая была в значительной степени зашумлённой. С помощью алгоритма пространственной фильтрации была сформирована оценка ФИМП потоков в окончательном виде с отчётливо видимой лункой понижения.

Для модельно-экспериментальных наблюдений, в которых смоделированы лунки-понижения интенсивностей, был применён разработанный метод и алгоритм. В результате была произведена оценка входной ФИМП с лункой-понижением. Анализ результатов расчётов позволил сделать вывод, что предельно малая распознаваемая величина понижения составляет два–три процента от исходного уровня интенсивности.

Предложенный метод и алгоритм был протестирован на экспериментальных МГ-наблюдениях. Часовые выходные ФИМП подвергались полосовой фильтрации. Полученные кадры 2D-изображений результатов вычислений пространственно отфильтрованных оценок выходных ФИМП интерпретировались как результаты диагностики мюонных потоков. Оказалась видной очевидная изменчивость значений интенсивностей по пространству и времени для понижений и повышений значений ФИМП, которая не совпадает с периодической суточной изменчивостью. Представленные кадры дают возможность рассмотрений пространственных и временных изменений в МП, свидетельствующих о процессах в гелиосфере.

13.2.2.3. Была произведена апробация метода распознавания аномалий в МГ-наблюдениях, базирующегося на системах доверительных интервалов, индикаторных матрицах, функциях аномальности и МГ-матрицах с использованием модельных наблюдений применительно к задачам мюонной диагностики

Рассмотрены основные составляющие метод распознавания аномалий в МГ-наблюдениях с использованием систем доверительных интервалов, индикаторных функций и процедур пространственно-временной фильтрации. Назначение предложенного метода распознавания и соответствующего алгоритма состоит в определении областей аномалий в матрицах МГ-наблюдений, которые потенциально дают возможность реализации мюонной диагностики и распознавания экстремальных процессов в гелиосфере. Апробацию будем интерпретировать как установление факта и степени работоспособности метода.

Разработанный метод предполагает формирование системы эталонного и скользящих временных интервалов, вычисления для каждой ячейки матрицы МГ-наблюдений эталонных и скользящих доверительных интервалов. Принятие решения об аномальности для каждой ячейки производилось на основе критерия пересечения (непересечения) доверительных интервалов и сравнения его с установленным порогом. Для принятия решений об аномальности формировались скользящие двумерные индикаторные функции, состоящие из нулей и единиц (единица соответствовала аномальности).

Двумерные индикаторные функции далее подвергались пространственно-временной фильтрации в форме накопления, укрупнения, скользящего сглаживания-взвешенного суммирования. На основе пространственно-временной фильтрации формировались возможные области аномальностей в матрицах МГ-наблюдений.

Был рассмотрен временной ряд исходных экспериментальных минутных отфильтрованных функций МГ-наблюдений. Была сформирована модельная функция лунка-понижение с различными глубинами. Были вычислены индикаторные функции, которые были подвергнуты пространственной фильтрации. Благодаря пространственной фильтрации оказалось возможным распознавание лунок – понижений с предельной глубиной два-три процента относительно исходного уровня интенсивности.

Эффективность предложенного метода распознавания аномалий в МГ-наблюдениях была рассмотрена на экспериментальных данных годоскопа УРАГАН. Временной ряд исходных экспериментальных минутных отфильтрованных функций наблюдений был сформирован для временного интервала, соответствующего 6.5 суткам. Эталонный интервал принимался равным 20 минутам, согласно априорным данным этот временной интервал был «спокойным» с точки зрения гелиосферных экстремальных процессов.

Вычислялась последовательность 20-ти минутных скользящих интервалов. На сформированной последовательности вычислялись индикаторные функции -кадры 2D - изображений, которые позволили судить об изменчивой по пространству и времени аномальности МГ- наблюдений.

Была произведена пространственная фильтрация, которая позволила детально анализировать пространственную и временную изменчивость -аномальность МП. Выявленные аномальности повторяют изменения функции суммарной интенсивности, что даёт возможность сделать вывод об эффективности метода.

13.2.2.4. Была произведена оценка эффективности методов и алгоритмов предварительной цифровой обработки временных рядов МГ- наблюдений

Полученные результаты, основанные на статистическом моделировании, позволили сделать вывод об эффективности разработанного алгоритма моделирования временных рядов матричных МГ-наблюдений. Полученные расчёты позволили сделать вывод об эффективности разработанных методов и алгоритмов 1D и 2D- фильтрации временных рядов матричных МГ-наблюдений с целью устранения в них периодических возмущений и шумов.

Предложенные 1D и 2D- фильтрации могут быть успешно использованы для задач анализа мюонограмм и выявления двумерных областей с малыми Форбуш- эффектами для оценивания динамики потоков мюонов.

13.2.2.5. Было произведено оценивание эффективности метода усреднённых функций вариаций интенсивностей мюонных потоков, базирующегося на нормированных МГ-матрицах с использованием экспериментальных наблюдений применительно к задачам мюонной диагностики

Математическое и статистическое моделирование применения предложенного метода показало: что выбор сглаживающих коэффициентов позволил обеспечить уверенное обнаружение внезапных кратковременных скачков интенсивностей без появления помеховых ложных наложений; что уверенное распознавание скачков интенсивностей мюонных потоков достигалось на величинах скачков 0.01–0.05 от исходного уровня интенсивности при значениях шумов, соответствующих реально действующим; что относительные погрешности оценок функций вариаций интенсивностей мюонных потоков составили величины порядка 10^{-2} и, что имеются все основания полагать, что погрешности оценивания функций вариаций интенсивностей мюонных потоков для экспериментальных наблюдений могут принять значения, примерно, такого же порядка.

13.2.2.6. Были получены оценки эффективности метода функций интенсивностей мюонных потоков. Математическое и статистическое моделирование предложенных алгоритмов оценивания функций интенсивностей мюонных потоков (ФИМП) показало: . что оценивание значений ФИМП в области без понижений осуществлялось с относительными погрешностями порядка ; что применение пространственной фильтрации обеспечило снижение до 10 раз СКЗ шумовых погрешностей оценок ФИМП и, несмотря на появление систематических погрешностей, уверенное распознавание возникающих лунок-понижений; что процентное отношение оценок математических ожиданий понижений к исходному понижению составило величину, примерно , которая обусловлена действием мультипликативных систематических инструментальных погрешностей; что предельно малая величина понижения, которая может быть распознана и составляет величину от исходного уровня интенсивности.

Предложенный метод оценивания функций интенсивностей мюонных потоков является перспективным для задач мюонной диагностики -распознавания (предсказания) геомагнитных бурь на основе МГ-наблюдений.

13.2.2.7. Было осуществлено оценивание эффективности метода распознавания аномалий в МГ-наблюдениях, базирующегося на системах доверительных интервалов, индикаторных матрицах с использованием экспериментальных наблюдений применительно к задачам мюонной диагностики.

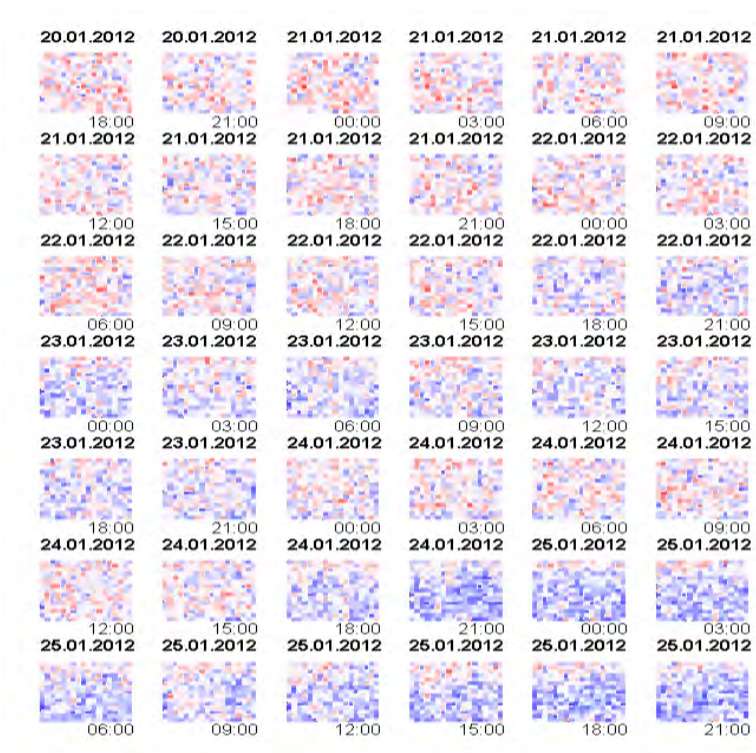


Рисунок 13.1 — Результаты вычисления индикаторных матриц

Эффективность предложенного метода распознавания аномалий в МГ-наблюдениях была оценена на основе экспериментальных МГ-наблюдениях. Временной ряд исходных экспериментальных минутных отфильтрованных функций наблюдений был сформирован для временного интервала, соответствующего 6.5 суткам: от 20.01.2012, 17:40 до 25.01.2012, 16:00. Эталонный интервал принимался равным 20 минутам; согласно априорным данным этот временной интервал был «спокойным» с точки зрения гелиосферных экстремальных процессов. Вычислялась последовательность 20-ти минутных скользящих интервалов. На сформированной последовательности были вычислены индикаторные функции на указанных скользящих интервалах для 6.5 суточного временного интервала. На рис. 13.1 представлены результаты вычислений индикаторных функций – 2D-кадры. С целью удобств визуализации показаны результаты вычислений через каждые 3 часа. Данные рис. 13.1 позволили судить об изменчивой по пространству и времени аномальности МГ-наблюдений. На рис. 13.2 показаны результаты вычислений суммарной интенсивности мюонных потоков по дням.

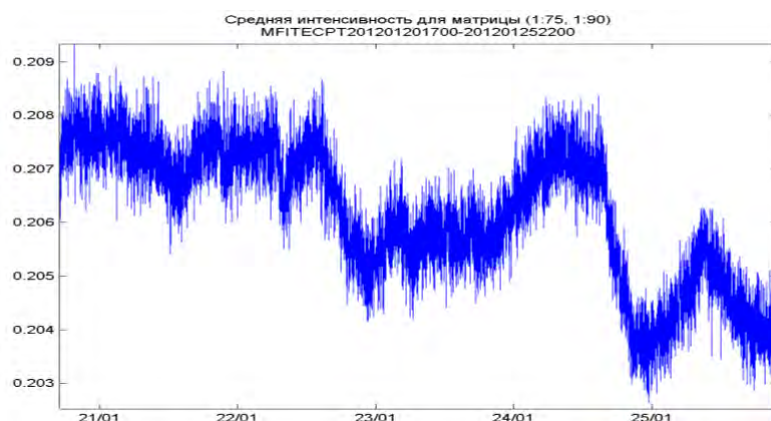


Рисунок 13.2 — Результаты вычисления функции суммарной интенсивности мюонных потоков

Список использованных источников

Борог В. В. и др., (2017). Идентификация геоэффективных возмущений солнечного ветра в потоке мюонов космических лучей. Ядерная физика и инжиниринг. Том. 8. №4. С.380–386. 2017.

Сидоров Р. В. и др., (2019). Метод устранения суточных вариаций потоков мюонов для матричных наблюдений годоскопа УРАГАН «Известия РАН. Серия физическая», Т.83. С.709–711.

- Astapov I. I. et al., (2013) Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 77 (5), 529–531.
- Barbashina N. S. et al., (2008), Prib. Tekh. Eksp. 2, pp. 26–32.
- Getmanov V. G., R. V. Sidorov, R. A. Dabagyan (2015). Measurement Techniques. V. 58. № 9. P. 1029–1036.
- Getmanov V.G et al. (2019) . A method of two-dimensional filtering of modulated matrix data sequences // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1205 /012016. doi: 10.1088/1742-6596/1205/1/012016.
- Dmitrieva A. N. et al., (2011).Correrctions for temperature effect for ground-based muon hodoscopes// Astroparticles Physics 34. 401–411.
- Katkovnik V., K. Egiazarian, J. Astola. (2006). Local Approximation in Signal and Image Processing // SPIE Publications. 576p.
- <http://www.izmiran.ru/services/saf/archive/ru/http://www.spaceweather.com>
- Kovylyaeva A. et al., (2019). Analysis of trajectories of primary particles and muons detected at the Earth's surface with different polarity of the Sun. Journal of Physics: Conf. Series 1181. 012014 doi: 10.1088/1742- 6596/1181/1/012014
- Lim J. S.,(1990). Two -Dimentional Signal and Image Processing. Prentice Hall. 715p.
- Moestl et al.,(2018) Forward modeling of coronal mass ejection flux ropes in the inner heliosphere with 3DCORE // arXiv:1710.00587v2 .
- NEVOD complex, National Research Nuclear University MEPhI (2019).www.nevod.mephi.ru.
- Yashin, I. I. et al.,(2015) Adv. Space Res., vol. 56, no. 12, p. 2693

14. Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации

Номер проекта РНФ: 17-77-20034

Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990123-3

Руководитель: учёный секретарь, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёров

Ответственный исполнитель: учёный секретарь, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёров

14.1. Пополнение базы исходных данных проекта

Общая структура базы данных, созданной в рамках проекта, базируется на подходах, описанных в [Gvishiani *et al.*, 2016]. За отчетный период база исходных данных проекта была пополнена данными наблюдений геомагнитных сетей INTERMAGNET и SuperMAG за 2019 г. Также в базу исходных данных были добавлены данные станции «Харасавей» (KHS), расположенной на Ямале, за период 2013—2019 гг. Для временных рядов, полученных из разных сетей геомагнитных наблюдений, были сформированы непрерывные ряды данных, позволяющие проводить единообразный анализ данных обсерватории или станции, если для нее в разных сетях геомагнитных наблюдений содержится информация за разные или пересекающиеся периоды времени. Для данных, вновь добавленных в созданную базу, был произведен расчет индексов геомагнитной активности: амплитуда, скорость изменения dB/dt , мера аномальности [Agayan *et al.*, 2016]. Также база данных проекта была пополнена уже рассчитанными значениями К-индекса для обсерваторий и станций сетей INTERMAGNET, IMAGE и ААНИИ.

Для оценки качества данных, объединенных в базу данных, выполнено ранжирование источников данных согласно информации об обработке и верификации предоставляемых геомагнитных наблюдений. Оценка источника данных основывалась на следующих критериях: использование автоматических алгоритмов контроля и коррекции качества данных; проведение ручной проверки данных квалифицированными специалистами; наличие документа, описывающего рекомендации по качеству данных; проверка данных независимым специалистом.

Значения критериев для сети INTERMAGNET получено из [St-Louis *et al.*, 2012]. Внешняя проверка данных INTERMAGNET осуществляется в три этапа с привлечением независимых специалистов со всего мира. Требования к качеству данных сети IMAGE

описываются в [Viljanen and Hakkinen, 1997]. В ходе исследований проведена оценка качества источников данных, использованных в базе (IMAGE, INTERMAGNET, SuperMAG, GC RAS, IZMIRAN), согласно перечисленным выше критериям.

По результатам формирования базы геомагнитных данных проекта была подготовлена совместная статья в международный журнал Data Science Journal.

Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617367 от 06.06.2019 / Красноперов Р. И., Пресняков С. В., Добровольский М. Н. «Программа для расчета SME-индекса». Программа реализует расчет SME-индекса геомагнитной активности и его российского регионального варианта SME-R по данным наблюдений сети SuperMAG.

На сформированную в рамках проекта базу данных было получено Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621055 от 19.06.2019 / Красноперов Р. И., Кудин Д. В., Добровольский М. Н. «База данных геомагнитных наблюдений по обсерваториям и станциям России и сопредельных государств».

14.2. Статистическое сравнение вариаций магнитотеллурических данных и магнитных вариаций методами, развитыми на втором этапе исследований.

Выполнено описание региональных геофизических эффектов по территории РФ и сопредельных государств на основе разработанных методов статистического анализа данных магнитных наблюдений на обсерваториях и станциях. Оно проводилось на основании ранее выявленных эффектов поляризации низкочастотных апериодических вариаций магнитного поля и изучения синхронных вариаций электропотенциала на земной поверхности.

Всесторонняя количественная проверка указанного эффекта может основываться лишь на реальных данных магнитотеллурического (МТ) зондирования. Такие данные, как правило, являются коммерческими и потому труднодоступны для стороннего исследователя. Для проведения комплекса предварительных исследований были задействованы открытые наборы данных МТ-зондирования, доступные для зарубежных обсерваторий: «Шамбон Ла Фор» (CLF), Франция; «Какиока» (КАК), «Каноя» (KNY) и «Мамамбецу» (ММВ), Япония.

Первый результат для обсерватории CLF показал, что направление вектора поляризации магнитных вариаций почти горизонтальное, и оно перпендикулярно главному направлению вариаций поверхностного потенциала. Поскольку изменение электропотенциала уместно связывать с токами в проводящих слоях земли, то эта

перпендикулярность еще раз подтверждает локальную горизонтально-слоистую осадочную структуру в районе обсерватории CLF. Поскольку измерения синхронны, то можно рассматривать во времени значения угла между направлениями магнитной и электрической вариации: здесь точная перпендикулярность не обеспечена, но значения углов хорошо описываются одномодальным симметричным распределением с выраженным пиком в аргументе 90 градусов. Таким образом, использование базового свойства электромагнетизма в этом случае позволяет предсказать направление электрических токов в горизонтально-слоистой среде на основании одних только магнитных данных. На первый взгляд, этот факт достаточно понятен и очевидно используется при МТ-зондировании на низких частотах (период 1 мин). В проведенном исследовании для CLF, оба вектора были горизонтальны; в этой связи более интересны данные японских обсерваторий, поскольку там главный вектор магнитных вариаций существенно наклонен к земной поверхности, в то время как данные поверхностного электропотенциала неизбежно двумерные, а значит и их вариации также лежат в горизонтальной плоскости.

Результаты анализа этих данных позволяют утверждать, что плоскость поляризации магнитных вариаций статистически определяет плоскость распространения локальных электрических токов. Иными словами, слои локальных геологических структур не обязательно горизонтальны, но в среднем параллельны плоскости поляризации магнитных вариаций. Если магнитные вариации не соответствуют плоской поляризации, то это свидетельствует о сложной локальной геологической структуре, не сводящейся к плоским слоям. Таким образом, наличие или отсутствие плоскости поляризации в данных локальных магнитных вариаций свидетельствует о наличии или отсутствии плоско-слоистой геологической структуры. Причем наклон слоев можно указать по плоскости поляризации. В соответствии с этой методикой на цифровые карты точек магнитных наблюдений внесена характеристика плоскости поляризации магнитных вариаций: выраженность плоскости поляризации в терминах отношения между собственными числами матрицы и направление собственного вектора, отвечающего наименьшему собственному числу. По этим данным можно предсказать, статистически главное направление вариаций электропотенциала на поверхности Земли и статистически главное направление токов в земной толще. Уточнение геоэлектрических характеристик требует решения задачи МТ-зондирования, для которой плоско-слоистая структура будет служить исходным необходимым для решения некорректной задачи регуляризационным условием.

В рамках данного этапа проекта на основе представленной методики проведен анализ рядов данных за 2014—2017 гг. для следующего набора геомагнитных станций и

обсерваторий: AAA, AMD, ARS, ASB, BEL, BJN, BMT, BOR, BOX, BRW, CHD, CNH, CPS, DIK, GCK, HAN, HOP, HVD, IRT, IVA, IZN, KEV, KHB, KIL, KIV, KLI, KTN, LOZ, LVV, LZH, MAS, MEK, MGD, MMB, MOS, MSR, MUO, NOR, NUR, NVS, OUJ, PAG, PBK, PEL, PET, PTK, RIK, SHU, SOD, SOR, SPG, SUA, T41, TAR, TIK, VIZ, WMQ, YAK. На основе полученных результатов были построены цифровые карты распределения пространственных характеристик, которые были опубликованы в формате картографического сервиса.

Реализован и апробирован метод определения аperiodических вариаций на разных временных масштабах. Для выбранного промежутка в T дней и данных о проекции вектора магнитного поля (для определенности изложим ситуацию 1-мин регистрации данных) рассмотрим ортогональную проекцию всего сигнала длины $T \cdot 1440$ отсчетов на подпространство, порожденное периодическими сигналами с частотами вида $k \cdot T$, $-720 \leq k \leq 720$. Соответствующая проекция — это обычный полосовой фильтр без сглаживания в Фурье-области. Проекция наилучшим образом приближает дневную вариацию на выбранном масштабе T дней. Очевидно, что с при малых T порядка 30—40 дней вклад сезонной изменчивости невелик и потому разность между исходным сигналом и проекцией покажет аperiodические изменения магнитного поля.

Прямая проверка показала, что эти изменения хорошо описываются как случайный шум с наложенными на него редкими сильными воздействиями, отвечающими магнитным бурям разной интенсивности. Частота этих сильных воздействий относительно мала и потому шумовая компонента дает возможность изучения статистическими методами, в частности, возможно сравнивать характерные распределения шумов при сдвиге всех данных (медленные сезонные изменения при таком подходе на статистику шума почти не влияют). Указанный метод позволяет на масштабе времени T оценить квантили распределения и тем самым говорить о статистически экстремальных аperiodических явлениях в записях магнитного поля. Соответствующий алгоритм выделения экстремальных по отношению к заданному масштабу времени T на основании анализа большого объема данных позволяет составить таблицу уровней экстремальности с тем, чтобы использовать эту таблицу далее в анализе сигналов уже реального времени. Соответствующий алгоритм позволяет гибко оценивать изменения магнитной обстановки с учетом знания о масштабах возмущений.

Сезонная вариативность на основе того же метода исследована отдельно путем анализа величин квантилей — то есть критических значений для характеристики магнитного возмущения как экстремального. Таким образом, на каждом масштабе от T

дней и более возникает соответствующая табличная константа, сравнение с которой позволяет указать насколько критическим событием является зарегистрированная магнитная вариация для выбранного масштаба. При этом анализ реальной магнитной записи надо проводить как по каждой компоненте вектора отдельно, так и по общей интенсивности: это дополнительно различает тип экстремальных событий (одна и та же вариация может быть экстремальной сразу во всех трех (XYZ) компонентах магнитного вектора, или лишь в некоторых компонентах или в общей интенсивности магнитного поля).

Для анализа был выбран интервал, соответствующий 24 циклу солнечной активности, который начался в декабре 2008 г. В соответствии с этим, анализировались данные обсерваторий, проводивших регистрацию МПЗ в период всего 11-летнего цикла солнечной активности в 2009—2019 гг. Выполнен анализ данных 12 обсерваторий (8 российских), по которым в базе проекта содержатся наиболее продолжительные ряды измерений (AMD, PBK, TIK, MNK, AAA, BOX, IRT, LVV, MGD, NVS, PET, SOD).

Полученные результаты оформлены в виде цифровой карты. Для перечисленных обсерваторий выбирались минутные данные за период с 2009 по 2019 гг. На подготовительном этапе производилась коррекция скачков, связанных изменением установки прибора или вызванные объединением рядов данных, полученных из разных источников. Так как, для обсерваторий INTERMAGNET окончательные данные за 2019 г. становятся доступны не ранее 1 июля 2020 г., для обсерваторий отправляющих данные в Российско-украинский центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>) были использованы предварительные данные 2019 г., обработанные алгоритмами поиска техногенных выбросов и устранения скачков. Для обсерваторий «Соданкюля» (SOD) использовались квазиокончательные данные за 2019 г. Непрерывные ряды трехкомпонентных минутных вариаций МПЗ обрабатывались методом, описанным выше. Применение метода выполнялось в два этапа: на первом этапе весь диапазон доступных данных использовался для построения модели периодических составляющих, таких как сезонная вариация, суточная вариация, вариация цикл вращения Солнца. На втором этапе построенная на первом этапе модель использовалась для определения экстремальных событий в данных заданного интервала.

В рамках данного этапа исследований также было проведено сравнение свойств вековых геомагнитных вариаций по данным палеоинтенсивностей и палеонаправлений. Была подготовлена совместная статья, поданная в журнал Russian Journal of Earth Sciences.

14.3. Создание статистической модели вариабельности геомагнитного поля для оценки параметров космической погоды, критичных для функционирования технологических систем на территории РФ

Для области аврорального овала характерно наличие высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует сбои и значительно снижает устойчивость систем радиосвязи и навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Это имеет особенное значение для регионов, расположенных в Арктической зоне РФ (АЗРФ).

В рамках настоящего проекта в коллаборации с Уфимским государственным авиационным техническим университет (УГАТУ) Создан веб-сервис для визуализации непрерывного мониторинга и прогноза полярных сияний <http://aurora-forecast.ru/>. Инструментом реализации ГИС системы выбран фреймворк Django. Веб-сервис представляет собой программную оболочку, построенную на базе виртуального глобуса — мультимасштабной цифровой 3D-модели Земли, обеспечивающую в совокупности с методами пространственного анализа визуализацию данных, предоставляемых сервисом NOAA о планетарном распределении интенсивности полярных сияний.

Основой сервиса служат данные модели OVATION-prime (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США, NOAA), дающей прогноз полярных сияний на 30 мин с 5-мин шагом обновления. Разработанная модель может быть использована для прогнозирования ухудшения качества сигналов систем спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС на арктических широтах для заданного региона. Используемая в данном проекте модель аврорального овала OVATION (Oval Variation, Assessment, Tracking, Intensity, and Online Nowcasting) основана на данных более 20 лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). По сравнению с наземными оптическими наблюдениями полярных сияний, наблюдения потоков частиц на низкоорбитальных спутниках не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, доступны как для северного, так и южного полушарий, и более чувствительны, чем наземные или спутниковые оптические наблюдения. Граница аврорально овала можно автоматически рассчитывать по разработанным алгоритмам анализа спутниковых данных [*Sotirelis and Newell, 2000*]. Экваториальная граница в модели OVATION определяется как граница высыпания мягких электронов, а полюсная граница соответствует границе между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями. Рассчитанные границы хорошо

совпадают с положением полярных сияний. Ранний вариант модели OVATION предсказывал суммарную интенсивность потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния.

Усовершенствованная модель аврорального овала OVATION-prime (OP) параметризована на возможные значения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). Эта модель рассчитывает 2D пространственное распределение интенсивности основных типов высыпаний авроральных электронов и ионов [Newell *et al.*, 2009; 2010]. Все типы полярных сияний объединяются для составления карт суммарной мощности сияний. Входными параметрами модели являются данные в реальном времени по солнечному ветру и ММП с межпланетных спутников, поступающие на FTP-сервера NASA.

Опыт работы с существующими сервисами подобного рода позволил выявить ряд характерных и повторяющихся от реализации к реализации недостатков, к которым следует отнести: невозможность динамического масштабирования и добавления дополнительных слоев; малое число отображаемых параметров; отсутствие данных о текущем состоянии космической погоды и базовых инструментов для пространственного анализа визуализированных параметров. Разработка и модернизация веб-сервисов, обеспечивающих эффективный мониторинг и визуализацию аврорального овала ГИС-методами, до сих пор является актуальной задачей, решение которой поможет лучше понять физику процессов в авроральной зоне.

В качестве объектов визуализации в рамках настоящего проекта рассматривалась вероятность наблюдения свечения верхних слоев атмосферы невооруженным глазом. Эмпирическая модель OP позволяет рассчитать зависимость между интенсивностью авроральных высыпаний и вероятностью их наблюдения невооруженным глазом. Объект визуализации авроральной зоны представляет собой структурированный набор пространственных и атрибутивных данных, обработку и графическую интерпретацию которых целесообразно было реализовывать посредством веб-ориентированных ГИС-технологий.

В основе предложенной информационной системы лежит характерная для веб-приложений клиент-серверная архитектура, реализуемая посредством шаблона проектирования MVC (Model-View-Controller) и соответствующего ему компонентного разделения данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики. Реализация предложенных решений выполнена на базе фреймворка Django, представляющего собой фреймворк со множеством встроенных высокоуровневых

возможностей и стандартизированной структурой разрабатываемых приложений. Django использует Python в качестве языка программирования, что расширяет его функциональные возможности в пользу сложной аналитики больших данных, их обработки и визуализации. Разработанный веб-сервис (<http://aurora-forecast.ru>) представляет собой программную оболочку, построенную на базе виртуального глобуса — мультимасштабной цифровой 3D-модели Земли, обеспечивающую в совокупности с методами пространственного анализа визуализацию данных, предоставляемых сервисом NOAA об интенсивности полярных сияний в заданном регионе планеты.

Сервис отображает значения интегральной мощности полярных сияний северной и южной полусфер. При загрузке глобус устанавливается таким образом, что оборачивается меридианом, соответствующим локальной полночи. Имеется инструмент, который отображает координаты курсора, таким образом можно определить положение точки относительно границы аврорального овала. Возможность подключения дополнительных слоев обеспечивает возможность наложения на виртуальный глобус либо всех магнитных станций, либо столиц государств и крупнейших городов РФ.

14.4. Объединение в среде ГИС построенных цифровых тематических карт пространственного распределения геофизических параметров в виде набора сетевых картографических сервисов с возможностью внешнего доступа.

Для организации оперативного широкого доступа к полученным в рамках реализации настоящего проекта был создан и опубликован онлайн картографический сервис, доступный по адресу:

http://gis.gcras.ru:6080/arcgis/rest/services/RSF4/rsf_17_77_20034_stations/MapServer.

Сервис создан с помощью программного пакета ArcGIS и опубликован на ГИС-сервере ГЦ РАН. Данный подход является гибким и удобным. Он не требует от пользователя наличия специализированного программного обеспечения и предоставляет доступ к картографической информации посредством стандартных протоколов обмена картографическими данными (например, KML, WMS и др.). К опубликованному сервису возможен доступ с помощью стандартного бесплатного просмотрщика цифровых карт ArcGIS Map Viewer:

(<http://geoportal.gcras.ru/portal/home/webmap/viewer.html?webmap=802c796e88f9433a9db5746b2ef3e729>).

При необходимости пользователь, располагающий необходимым клиентским ПО для работы с ГИС, может подключать опубликованный сервис в качестве внешнего

источника данных. Помимо карт распределения поляризационных характеристик и экстремальных значений для магнитных станций и обсерваторий в сервис были включены цифровые растровые карты литосферных магнитных аномалий WDMAM version 2 [Dyment *et al.*, 2015], EMAG2 version 2 [Maus *et al.*, 2009] и EMAG2 version 3 [Meyer *et al.*, 2017].

Список использованных источников

Agayan S., Bogoutdinov S., Soloviev A., Sidorov R. (2016), The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications, *Data Science Journal*, 15, doi: 10.5334/dsj-2016-016

Dyment J., Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Thebault E., Catalan M. World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0. — IAGA, CGMW, 2015.

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, doi: 10.5334/dsj-2016-018

Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., et al. (2009), EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 10, No. 8, doi: 10.1029/2009GC002471

Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution) Version 3. — Boulder, 2017, doi: 10.7289/V5H70CVX

Newell P. T., Sotirelis T., Wing S. (2009), Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: the global precipitation budget, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, doi: 10.1029/2009JA014326

Newell P. T., Sotirelis T., Wing S. (2010), Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, doi: 10.1029/2009JA014805

Sotirelis T. P., Newell T. (2000), Boundary-oriented electron precipitation model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, doi: 10.1029/1999JA000269

St-Louis B. J., Sauter E. A., Trigg D. F., Coles. R. L., Regimbald. D. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6. — Edinburgh, 2012.

Viljanen A., Hakkinen L. IMAGE magnetometer network. In: Satellite-Ground Based Coordination Sourcebook (eds. M. Lockwood, M. N. Wild and H. J. Opgenoorth). — ESA, 1997.

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

Номер проекта РНФ: 18-17-00241

Номер госрегистрации: АААА-А18-118091090066-5

Руководитель: акад. А. Д. Гвишиани

Ответственные исполнители: к. ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев, д.т.н. В. И. Кафтан,

д.т.н. В. Н. Татаринов

В 2019 г. были выполнены следующие работы.

1. Продолжены работы по наполнению базы данных ГИС-проекта. Были оцифрованы и помещены в ГИС-проект новые слои данных:

1. Цифровая карта рельефа (по данным радарной съемки SRTM-4).
2. Геологическая карта масштаба 1:200 000 (автор О. А. Морозов.).
3. Неотектоническая схема сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты (автор Р. М. Лобацкая).
4. Карта участка Енисейский масштаба 1:10 000 (автор О. А. Морозов)
5. Карта крупных активных тектонических разломов в районе (ФГУП «ГХК»).
6. Карта моделирования полей напряжений Нижнеканского массива (автор И. Ю. Колесников).
7. Карта аномальных значений магнитного поля района (ВСЕГЕИ).
8. Карта дилатации земной поверхности в северной части Нижнеканского массива (данные ГЦ РАН).
9. Гравиметрическая карта района (ВСЕГЕИ).
10. Карта эпицентров землетрясений в регионе по каталогам Baikal_1962–2010 и Altai_&_Sayan_1962–2009.
11. Результаты моделирования ряда динамических показателей (автор С. М. Агаян).

ГИС-проект был использован при тестировании методики оценки меры геодинамической безопасности структурного тектонического блока земной коры, вмещающего пункт глубинного захоронения РАО (ПГЗРО).

2. С целью проверки разработанных алгоритмов системного анализа выполнены тестовые расчеты на синтетических моделях, а также расчет интегральной меры динамической активности для территории радиусом около 30 км от ПГЗРО по трём показателям, характеризующим цифровую модель рельефа, а также характеристике, определяющей близость к тектоническим нарушениям, на участке «Енисейский» и прилегающей к нему территории [Гвишиани и др., 2019а]. По результатам расчетов

построена карта, отражающая распределение по площади итоговой меры геодинамической безопасности $S_{EF}(w)$. Территория была разделена на 3 категории: а) неустойчивые участки $S_{EF}(w) \leq 0,25$ – это преимущественно зоны разломов и там, где имеются резкие градиенты высот в зоне динамической активности разломов; б) промежуточные участки – переходные зоны, где $S_{EF}(w) \in (0,25; 0,75)$; в) устойчивые участки $S_{EF}(w) \geq 0,75$ – это в основном равнинные участки на левом берегу р. Енисей и зоны в центре крупных структурных тектонических блоков региона [Гвишиани и др., 20196]. Итоговая мера безопасности $S_{EF}(w)$ по 4-м признакам приведена на рис. 15.1. Красный цвет соответствует наиболее устойчивому состоянию, синий – наименее устойчивому.

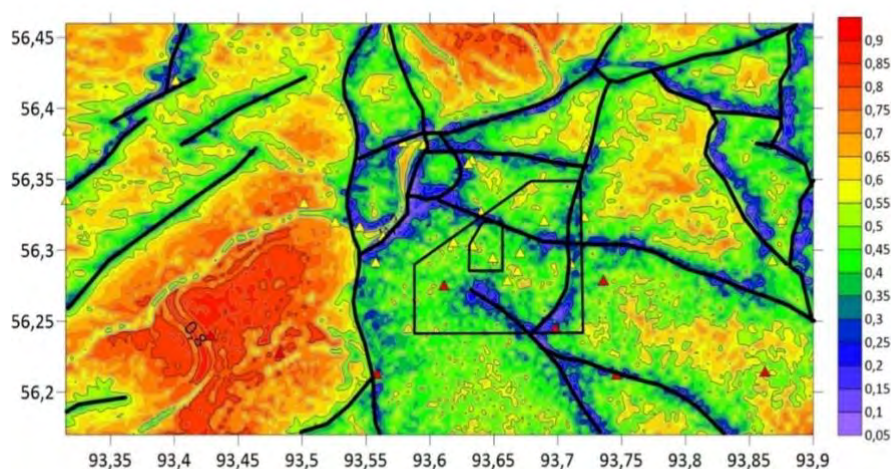


Рисунок 15.1 — Итоговая мера геодинамической безопасности $S_{EF}(w)$ для участка Енисейский и окружающей территории

4. Получены модели напряженно деформированного состояния (НДС) северной части Нижне-Канского массива в виде карт распределения интенсивности напряжений σ_i и соотношения напряжений σ_{yy}/σ_{xx} (рис. 15.2 и 15.3). Из них следует, что в поле заданных тектонических напряжений в пределах района исследований образуются области аномально с высокой интенсивность напряжений ($\sigma_i > 25$ МПа) и области с высокими значениями соотношения σ_{yy}/σ_{xx} . Участки, где отмечаются совпадение этих двух условий $\sigma_i > 25$ МПа и $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} > 3$ являются наиболее опасными с точки зрения возможной потери изоляционных свойств структурных блоков при возможном образовании разрывов. Он может происходить в виде медленных криповых движений или быстрых сейсмических явлений.

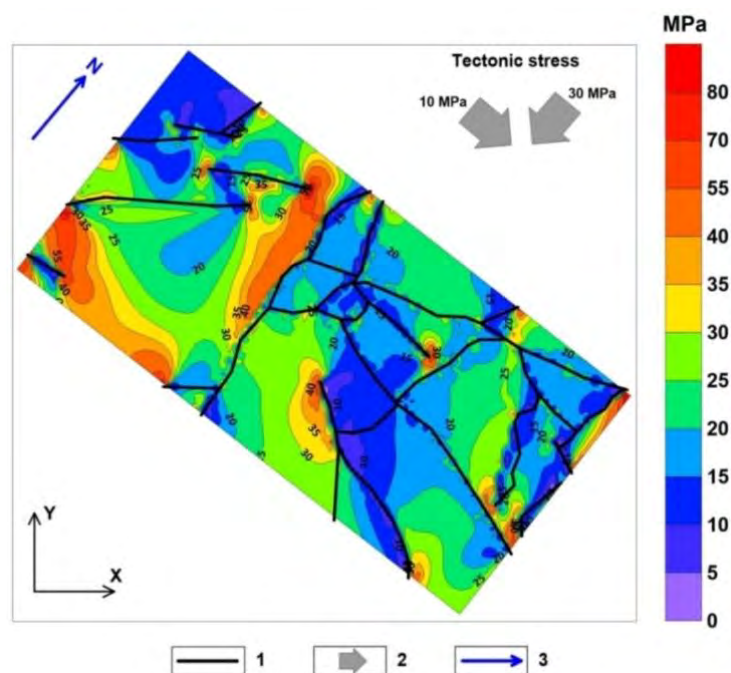


Рисунок 15.2. — Интенсивность напряжений σ_i в районе Нижнеканского массива. 1 – тектонические разломы; 2 – ориентация осей тектонических напряжений сжатия; 3 – направление на север

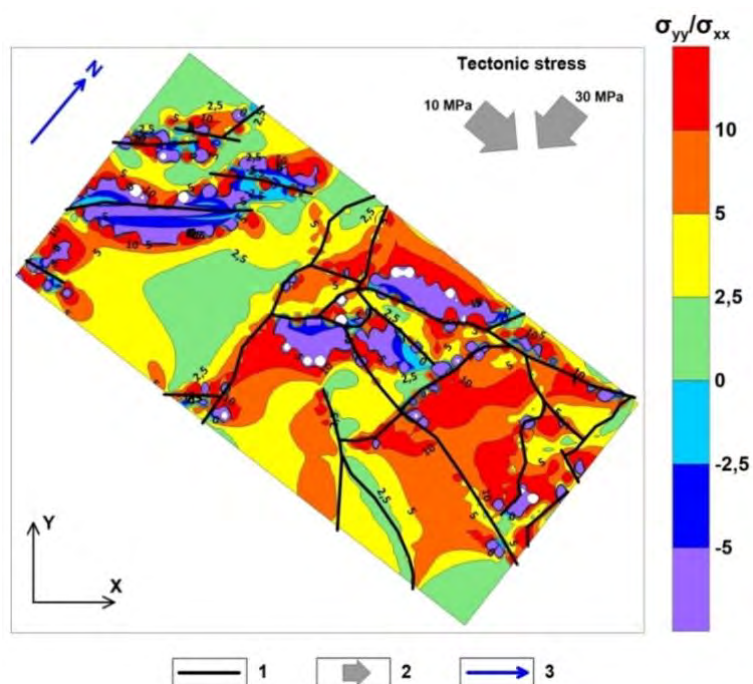


Рисунок 15.3. — Отношение напряжений σ_{yy}/σ_{xx} в районе Нижнеканского массива. 1 – тектонические разломы; 2 – ориентация осей тектонических напряжений сжатия; 3 – направление на север

5. Получены численные расчетные данные по результатам математического моделирования НДС структурно-тектонического блока участка «Енисейский» (размеры 3 x 4 км). Результаты моделирования показывают сильное влияние на напряженное

состояние СТБ внедренного в массив инженерного сооружения, содержащего тепловыделяющие РАО, и вариаций тектонических напряжений по границам блока. Было выявлено, что варьирование фактора величины тектонических напряжений на границах исследуемого структурно-тектонического блока оказывает наибольшее влияние на долговременную устойчивость геологической среды [Tatarinov and Tatarinova, 2019]. В связи с этим в дальнейшем представляется приоритетной задача корректного задания граничных условий в виде полей высокоградиентных тектонических напряжений по результатам инструментальных ГНСС-наблюдений за СДЗК.

6. Разработана методика вычисления среднегодовых скоростей движений и деформаций земной поверхности по результатам ГНСС-определений координат с учетом корреляционных зависимостей [Кафтан и др., 2019б]. Результаты повторных геодезических измерений всегда взаимно коррелированы. Особенно это выражено в ГНСС-измерениях, когда по результатам измерения фазы спутникового радиосигнала определяют одновременно три компоненты вектора приращений координат между смежными пунктами. Стандартное программное обеспечение постобработки ГНСС-измерений позволяет определять не только вектор приращений координат (вектор базовой линии) X , но и его ковариационную матрицу Q . Существующая практика вычисления скоростей изменений пространственных компонент не предусматривает учет корреляционных зависимостей. Методика содержит алгоритм такого учета. Учет корреляционных зависимостей не отразится на значении собственно скорости изменений, но способствует более строгой оценке его точности.

7. Выполнен анализ влияния тектонических разрывов, находящихся во внешнем поле напряжений, на развитие процесса деструкции структурных тектонических блоков. На основе метода аналогий было проведено сопоставление результатов моделирования НДС условно эквивалентных сред для различных иерархических уровней: разрушение плиток облицовки зданий (микроуровень), контуров подземных сооружений (локальный масштаб) и эпицентральных зонах коровых землетрясений (региональный масштаб). Показано, что области низкой интенсивности напряжений являются перспективными с позиции безопасного захоронения РАО. На примере формирования очагов землетрясений 13 марта 1992 года М 6.8 (Турция), 26 декабря 2003 М 6.6 (Иран) и 24 августа 2014 М 6.0 (США) показана возможность прогноза мест образования разрывных нарушений в Нижнеканском массиве, включая участок Енисейский [Morozov at al., 2019]. Методология позволяет прогнозировать положение зон с высокой интенсивностью напряжений, способных

впоследствии инициировать процесс деструкции среды, как на уровне структурного блока, так и в приконтурной части породного массива ПГЗРО.

8. Согласно ГОСТ Р 53606-2009 точность определения местоположения подлежит обязательному контролю с использованием различных методов, комплексное применение которых является гарантией его надежности. В 2019 гг. для ГНСС-наблюдений были закуплены два новых ГНСС-приемника. В публикациях утверждается, что единственным практическим способом надежного метрологического контроля ГНСС-наблюдений является проверка на эталонных полигонах, где расстояния между пунктами наблюдений установлены с высокой точностью.

Контроль точности производится путем сравнения результатов выполненных измерений (абсолютных и относительных координат, высот, длин и азимутов базисных линий) с эталонными, в качестве которых, могут использоваться геодезические построения, созданные с использованием традиционных средств геодезических измерений. Для эталонирования были выбраны 3 типа ГНСС-приемников.

С целью оценки вклада конкретного комплекта ГНСС-аппаратуры в измеренное горизонтальное проложение были выполнены ГНСС измерения на 4-х пунктах эталонного базиса. Продолжительность сеанса наблюдений составила 4 часа. Дискретность регистрации спутникового радиосигнала была равна 10 сек. Маска возвышения ГНСС сигнала была установлена 15° . Измерения выполнялись по сигналам двух радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Количество наблюдаемых спутников ГЛОНАСС во время сеанса варьировало от 4-х до 7-ми, GPS – от 8-ми до 12-ти.

Были получены разности измеренных и эталонных горизонтальных проложений (табл. 15.1).

Обобщенную СКО вклада отдельного комплекта аппаратуры $m_{\text{ап}}$ получаем по стандартной формуле теории ошибок

$$m_{\text{ап}} = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = 2.9 \text{ мм}$$

Оценки вклада каждого комплекта аппаратуры в суммарную ошибку измерений получаем из решения уравнения. Результаты представлены в таблице 15.2.

Общее СКО разности d_{ij} по формуле Гаусса после уравнивания получено равным 3.5 мм. Заметим, что оно удовлетворяет оценкам заявленным фирмами-производителями ГНСС аппаратуры 3–5 мм (см. табл. 15.2). Соответственно для вклада одного комплекта аппаратуры СКО составила 2,5 мм, тогда как до уравнивания соответствующая оценка

составила 2,9 мм. Результаты исследования показали эффективность предлагаемой методики оценки точности и возможность ее применения в качестве метрологической поверки.

Таблица 15.1. – Значения разностей измеренных и эталонных горизонтальных проложений (истинные ошибки).

Измерения	Истинные ошибки (мм)	Результат уточнения $d_{ij}+v_{ij}$
d ₁₂	3.2	5.6
d ₁₃	7.3	5.0
d ₁₄	4.2	4.1
d ₂₃	0.6	0.5
d ₂₄	2.0	-0.4
d ₃₄	-3.4	-1.0
СКО m_d	4.0	3.5

Таблица 15.2 – Результаты оценки вклада каждого комплекта аппаратуры по МНК

Пункт/комплект	Вероятнейшие ошибки (мм)	СКО вероятнейшей ошибки
1	-5.0	2.1
2	0.6	2.1
3	-0.1	2.1
4	-0.9	2.1

9. Выполнена коррекция топологии существующей геодинамической сети наблюдений за современными движениями земной коры с использованием ГНСС-технологии на участке «Енисейский» и прилегающих районах в соответствии с нормативными требованиями Ростехнадзора по обеспечению геодинамической безопасности объектов использования атомной энергии была построена карта развития геодинамической сети для ГНСС-наблюдений.

Для повышения точности вычисления деформаций при расширении ГНСС-сети на карте оптимизированы формы треугольников, образуемых базисными линиями, соединяющими ГНСС-пункты, а также их размеры. Рекомендовано модернизировать наблюдательную ГНСС-сеть за счет установки дополнительных пунктов в местах с их малой плотностью и в центральной части, где планируется строительство ПГЗРО. В тоже время реально существующая структура тектонической блочности в районе не позволяет строго построить наблюдательную сеть из равновеликих треугольников, поэтому деформации конечных элементов реальной сети представляют собой неопоставимые величины. В дальнейшем для учета этого эффекта будут разработаны новые методические подходы масштабируемости обработки ГНСС-данных.

10. Разработан и успешно реализован план полевых экспедиционных ГНСС-наблюдений на 16 пунктах геодинимического полигона в северной части Нижнеканского массива с целью проверки разработанных методических подходов по увеличению точности ГНСС-наблюдений с одновременной регистрацией сигналов GPS и ГЛОНАСС спутников.

В июле 2019 г. была организована экспедиция в район Нижне-Канского массива с целью оценки разработанной в рамках проекта методики повышения точности определения координат пунктов геодинимической сети с одновременным использованием сигналов GPS/ГЛОНАСС спутников. В полевых условиях опробованы 5 комплектов новых ГНСС-приемников, а также новая схема их перемещения.

Полевые наблюдения проводились в течение пяти рабочих дней – с 23 июня по 3 июля 2019 г. Участники экспедиции Дзедобов Б. А., Маневич А. И. и Лосев И. В. Характер проведенных геодезических наблюдений на геодинимическом полигоне следует считать опытно-исследовательским, т.к. при этом был использован весь новый парк приобретенных ГНСС-приемников в количестве 5 штук. На рис. 15.3 показано расположение ГНСС-пунктов, на которых были выполнены наблюдения.

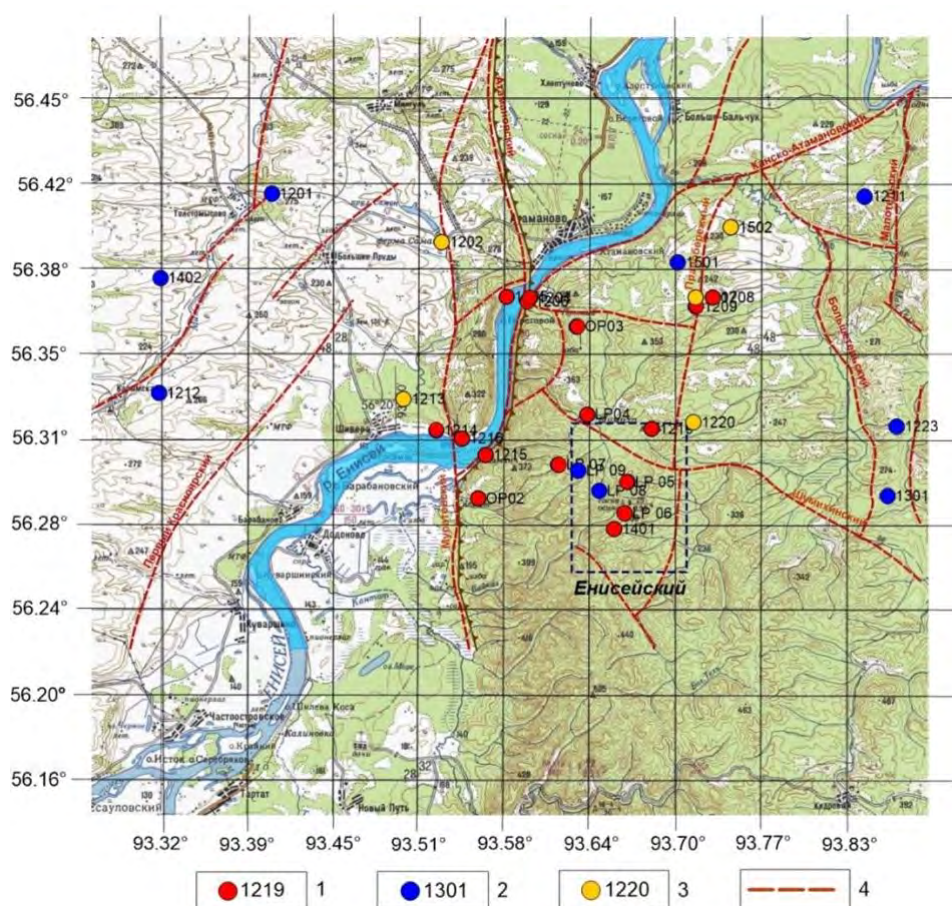


Рисунок 15.3 — Схема ГНСС-измерений, проведенных в 2019 году. 1 – пункты на которых были сделаны измерения в 2019 г.; 2 – пункты ГДП, на которых не удалось сделать измерения в 2019 г.; 3 – пункты, для которых планируется расширить наблюдения в 2020 г.; 3 – крупные тектонические разломы

Список использованных источников

Гвишиани А. Д., Кафтан В. И., Красноперов Р. И., Татаринов В. Н. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. №1. С. 42–60. 2019а. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>.

Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. Исследование систем действительных функций на двумерных сетках с использованием нечетких множеств // Чебышевский сборник. Том 20, № 1. 2019б. С. 94–111. DOI: <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1>.

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

Morozov, V. N., Tatarinov V. N., Manevich A. I. and Losev I. V. Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive waste, Russ. J. Earth. Sci., 19, 2019. Pp. 1–11. ES6001, doi: 10.2205/2019ES000687.

Viktor Tatarinov, Tatiana Tatarinova. Observations by Space Geodesy Methods on Objects of Using Atomic Energy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Volume 221. Issue (2019). doi:10.1088/1755-1315/221/1/012065.

16. Системный анализ влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления Паратетиса

Номер проекта РНФ: 19-77-10075

Номер госрегистрации: АААА-А19-119082190032-6

Руководитель: заместитель директора ГЦ РАН, А. И. Рыбкина

Ответственный исполнитель: заместитель директора ГЦ РАН, А. И. Рыбкина

16.1 Введение

Конкретным научным направлением настоящего проекта РНФ 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 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 $M_r(T)$.

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 региояруса 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.

16.2 Результаты аналитических исследований и литературного обзора по теме влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления в Паратетисе по данным открытых источников и специализированной литературы

Был проведен аналитический обзор о влиянии астрономической цикличности на процессы осадконакопления в Паратетисе. При использовании этого метода точность определения абсолютного возраста пород может составляет от 20 до 400 тыс. лет, что было показано на примере работ, проведенных по данным развития палеобассейна Паратетиса [Hinnov, Ogg, 2007].

Также проведен анализ результатов исследований магнитных свойств минералов и горных пород используются для изучения процессов образования, перемещения, седиментации и постседиментационных изменений магнитных минералов под воздействием окружающей среды. Круговорот железа в природе осуществляется на различных масштабах, включая глобальный [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, Schwetmann, 2003; Malki et al., 2006]. Наиболее распространенными магнитными минералами осадочных пород являются магнетит, маггемит, гематит и гетит. Таким образом, магнитные методы исследования горных пород могут помочь в восстановлении условий осадконакопления. [Thompson, Oldfield, 1986], например, превращение оксидов (маггемит, гематит) и гидрооксидов (гетит, ферригидрит, лепидокрокит) в магнетит путем восстановления ионов трехвалентного железа [Cornell and Schwertmann, 2003; Guyodo et al., 2006]. Преобразование магнетита в грейгит также несет информацию об изменении условий, вызванных преобразованием органического вещества [Roberts et al., 2011].

16.3. Детальное описание полевых работы на опорных разрезах Паратетиса с целью отбора необходимого фактического материала, база данных проведенных измерений магнитной восприимчивости с использованием полевого каппаметра, а также результаты палеомагнитных исследований. Будут получены уникальные данные по магнитной восприимчивости и палеомагнетизму горных пород.

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. В ходе полевых работ было составлено послойное описание разреза с отбором реперных проб, проведены замеры магнитной восприимчивости пород (852 определений) через 20 см вкост 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 тархан-чокракские 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. В ходе работ выявлено, что магнитная восприимчивость (K) пород кувинских слоев (нижний тархан) характеризуется значениями от $0,08$ до $0,15 \times 10^{-3}$ ед. СИ, глин фацально сменяющих «тарханский мергель» терских слоев (средний тархан) составляет $0,10 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Породы аргунских слоев (верхний тархан) отличаются изменчивостью величин K от $0,05$ до $0,19 \times 10^{-3}$ ед. СИ с наличием более высоких значений в низах отложений. Значения K пород тархан-чокракских переходных слоев составляют от $0,02$ до $0,14 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Прослой карбонатных пород, встречающиеся в изучаемом разрезе, имеют более низкие величины K по сравнению с глинами.

В ходе работ выявлено, что магнитная восприимчивость (K) пород кувинских слоев (нижний тархан) характеризуется значениями от $0,08$ до $0,15 \times 10^{-3}$ ед. СИ, глин фацально сменяющих «тарханский мергель» терских слоев (средний тархан) составляет $0,10 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Породы аргунских слоев (верхний тархан) отличаются изменчивостью величин K от $0,05$ до $0,19 \times 10^{-3}$ ед. СИ с наличием более высоких значений в низах отложений. Значения K пород тархан-чокракских переходных слоев составляют от $0,02$ до $0,14 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Прослой карбонатных пород, встречающиеся в изучаемом разрезе, имеют более низкие величины K по сравнению с глинами.

Спектральный анализ замеров магнитной восприимчивости пород тархана позволил выявить три интервала частот с резко выраженными пиковыми значениями. 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.

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 Виноградова Ю. К. по зависимости $M_s(T)$ в магнитном поле 0.7 Тл; 2) на каппаметре Multi-Function Kappabridge (AGICO, Чехия) по $\chi(T)$ на порошкообразных пробах массой ~ 1 г; 3) по зависимости остаточного магнитного момента, созданного в поле 0.2 Тл от температуры. Для подтверждения состава ферромагнитной фракции в изучаемых породах на образцах демонстрационной коллекции № 6 ($H=48.92$ м), 8 ($H=46.22$ м), 12 ($H=41.77$ м) и 21 ($H=17.41$ м) с различных стратиграфических уровней было принято решение провести рентгено-дифрактометрическое исследование на многофункциональном дифрактометре STADI-MP (STOE, Германия) на базе Геофизической обсерватории Борок (Ярославская область).

В результате установлено, что основными магнитными минералами – носителями естественной остаточной намагниченности в данных породах, возможно, являются магнетит и моноклинный пирротин.

Детальное описание разреза и результатов представлены в публикации проекта за 2020 г., а также расширенном отчете.

16.4. Макет ГИС-продукта и тестовый комплект слоев геоданных для мультикомпонентной оценки характера изменчивости условий осадконакопления на изучаемой территории с использованием программного обеспечения ArcGIS.

В рамках первого этапа проекта разработан макет ГИС-продукта, основными составляющими которого являются веб-приложение, вспомогательные тематические карты, а также некоторая дополнительная информация (видео, изображения). Была произведена оценка важности и необходимости включения дополнительного функционала в разрабатываемый продукт. Принято решение о включении средств геообработки и анализа. Объединение в одном продукте веб-приложения, тематических карт и дополнительной информации планируется реализовать в виде карты-истории, благодаря конструктору ArcGIS StoryMaps. В качестве основных источников информации на текущем

этапе были выбраны данные ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>); ресурсы, предоставленные компанией ESRI: ArcGIS Living Atlas of the World (<https://livingatlas.arcgis.com/>) и ArcGIS Hub (<https://hub.arcgis.com/>); информационные ресурсы геологического института ВСЕГЕИ (<https://vsegei.ru/ru/info/>).

Помимо указанных ресурсов, в разрабатываемом ГИС-проекте будет использован атлас литолого-палеогеографические карт Паратетиса масштаба 1: 5000000 [Роров, 2004]. Впервые в рамках данного проекта указанные карты будут оцифрованы и представлены в формате ГИС в разрабатываемом ГИС-продукте.

На текущем этапе работы проведена тестовая оцифровка карты из атласа «Latest Miocene (Late MESSINIAN, Early PONTIAN – Late PANNONIAN)». Результаты получены при помощи программного продукта ArcGIS ArcMap версии 10.6.

16.5. База данных измерений магнитной восприимчивости отложений Паратетиса (не менее десятков тысяч измерений) основанной на данных, полученных авторами проекта в рамках полевых работ 2020 г. и ранее.

За отчетный период были разработаны структура базы данных с учетом требований ГИС-среды, так и имеющихся данных измерений. Произведен анализ существующих решение по хранению и систематизации данных рассматриваемого типа, выделены уникальные уровни. Разработана концепция создания базы данных (БД) с учетом специфики предметной области и применением системного подхода в организации хранения большого объема данных. Создана уникальная организованная БД, структура которой является сложной и многоуровневой и содержит в себе широкий набор данных, полученных в результате полевых и лабораторных работ для комплексной оценки влияния астрономической цикличности на процессы осадконакопления. Проработан имеющийся объем данных и реализована его интеграция в БД: палеомагнитные измерения, результаты литологических исследований и измерений магнитной восприимчивости, добавление соответствующих схематических и графических изображений.

16.6. Прототип программного средства по обработке данных измерений и оценке выявления устойчивых циклов долгопериодических колебаний на базе спектрального анализа.

В рамках проекта предложена принципиально новая методика для поиска возможных периодов исходной функции на основе ДМА (Дискретный математический анализ) – оригинального подхода к анализу дискретных данных, созданного в Геофизическом центре РАН. ДМА – это серия алгоритмов анализа дискретных данных, объединенных общей формальной основой: нечеткие сравнения чисел, мера близости в дискретных пространствах, дискретный предел и др. Идея ДМА состоит в создании дискретных аналогов понятий классического математического анализа: предел, непрерывность, гладкость, связность, монотонность, экстремум и т.д.

Методика была применена к следующим реальным данным:

- Данные измерений магнитной восприимчивости отложений верхнего сармата и низов мзотиса (рис. 2). Суммарная мощность отложений около 45 метров. Замеры осуществлялись при помощи полевого каппаметра КТ-5 (Geophysica, Брно, Чехословакия) вкрест простирания слоев через равные интервалы в 20 см. Для контроля точности измерений в каждой точке было сделано 3 замера, в результате было получено 678 измерений. Для каждой точки по трём измерениям была рассчитана средняя величина магнитной восприимчивости, усредненные результаты варьируют от 0.063 до 0.24×10^{-3} СИ.
- Данные измерений магнитной восприимчивости нижнесарматских и конкских отложений (рис. 3). Замеры осуществлялись при помощи полевого каппаметра КТ-5 (Geophysica, Брно, Чехословакия) вкрест простирания слоев через равные интервалы в 20 см. Для контроля точности измерений в каждой точке было сделано 3 замера, в результате было получено 1 314 измерений. Для каждой точки по трем измерениям была рассчитана средняя величина магнитной восприимчивости, усредненные результаты варьируют от 0.103 до 0.387×10^{-3} СИ.

Наиболее «сильные» периоды в данных измерений магнитной восприимчивости отложений верхнего сармата и низов мзотиса равны 3, 13.6 и 16.6. Менее выраженные периоды наблюдаются в районе 9.4 и 20.4. Можно заключить, что наиболее выраженным периодом в данных измерений магнитной восприимчивости нижнесарматских и конкских отложений является 31.2. Остальные периоды являются значительно менее выраженными.

Из глубокого анализа ряда вычислительных экспериментов сделан вывод о возможности существования периодов, слабо выраженных по сравнению с выделенными,

на отрезке [1.7, 2.5] и на отрезке [2, 5]. Эти периоды могут быть найдены в случае подбора более «мягкой» функции сглаживания показателя «константности» функции.

16.7. Описание математических методов и подходов, актуальных для решения задач, поставленных в рамках проекта. Формулировка основных принципов системного анализа при оценке влияния различных палеогеографических и палеоклиматических факторов на процессы осадконакопления.

Было произведено описание математических методов и подходов, актуальных для решения задач. Были выделены наиболее частые используемые в геологии математические методы: Анализ временных рядов – спектральный анализ (Фурье, спектрограмма, вейвлет-анализ), автокорреляция, кросс-корреляция, сглаживание, фильтрация, поиск экстремумов и др.; Многомерный анализ данных – многомерные распределения, кластерный анализ и др.; Статистические методы – статистические распределения, корреляция, регрессия, хи-квадрат критерий и др. Циклостратиграфия изучает чередование различных пород в разрезах. Задача циклостратиграфии состоит в том, чтобы проанализировать осадочные записи и выявить устойчивые сигналы, которые отражают орбитальное влияние. Важным аспектом анализа временных рядов в циклостратиграфии является преобразование исходной записи из области глубины во временную область с использованием точек калибровки. Как только временные ряды установлены, для обнаружения орбитальных периодичностей могут использоваться математические методы. В этой связи из перечисленных выше групп математических методов практически необходимой для настоящего исследования в рамках проекта РНФ является группа «Анализ временных рядов», а именно методы спектрального анализа.

17. Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса

Номер проекта РФФИ:17-05-01085

Номер госрегистрации: АААА-А17-117040510185-1

Руководитель: заместитель директора ГЦ РАН, А. И. Рыбкина

Ответственный исполнитель: заместитель директора ГЦ РАН, А. И. Рыбкина

Одной из проблем изучения миоцена Восточного Паратетиса, на решение которой был направлен проект, является проведение широких межрегиональных сопоставлений этапов развития Эвксино-Каспия с бассейнами Западного Паратетиса и Средиземноморья. До сих пор остаются остро дискуссионными объём и стратиграфическое положение таких региональных стратиграфических подразделений как тархан, чокрак, мэотис, понт и многих других региоарусов миоцена. Решить эти вопросы с помощью традиционных методов стратиграфии, при нехватке материала, не удавалось. С учетом развития кризисных условий осадконакопления, проведение полноценных палеогеографических построений является весьма затруднительным. Одной из возможностей дальнейшего успешного изучения развития Черноморского региона в неогене является поиск новых подходов, проведение междисциплинарных исследований, что являлось одной из задач проекта, в число которых входят методики восстановления астрономической цикличности, позволяющей рассчитывать более достоверно скорости седиментации, осуществлять датирование отложений и проводить широкие сопоставления.

Междисциплинарные исследования представляли собой синтез литологических, циклостратиграфических и палеомагнитных работ. На основании данных литологических исследований, а именно послойного описания разреза, изучения вещественного и компонентного состава пород, генезиса осадков, производилась оценка полноты геологической записи. Важной частью проекта являлись палеомагнитные исследования, которые также позволили уточнить продолжительность подразделений региоарусной шкалы неогена юга России.

На примере опорных разрезов Таманского и Керченского полуостровов и восточных районов Грузии для пограничных интервалов были получены новые данные по астрономической цикличности с датированием основных этапов резкой смены условий осадконакопления. Результатом исследований явилось уточнение положения понтического яруса в общей стратиграфической шкале, позволяющее проводить сопоставление

формирования понтических отложений с основными этапами Мессинского кризиса солености (МСК), выделяемого в Средиземноморье. По особенностям астрономической цикличности мзотис-понтических (переходных) и понтических толщ, вскрываемых в разрезе Железный Рог Тамани, установлено, что накопление «переходных» слоев началось около 6,3 млн. лет назад и возраст нижней границы понта соответствует 6,1 млн. лет.

Формирование отложений нижней части понта (новороссийских слоев) происходило с 6,1 по 5,6 млн. лет, что по времени отвечает первому этапу МСК. Портаферские слои понта накапливались с 5,6 по 5,45 млн. лет с развитием значительного перерыва в седиментации (около 150–160 тыс. лет), что хорошо согласуется с особенностями осадконакопления второго этапа МСК. Верхняя граница понта (кровля босфорских слоев) датируется 5,2 млн. лет, что в целом отвечает завершению МСК и восстановлению морских условий в Средиземноморском бассейне. Было установлено положение дискуссионной границы мзотиса и сармата, которая датируется 7,6 млн лет что делает возможным проводить сопоставление мессиния общей стратиграфической шкалы с регионарусами верхнего миоцена Восточного Паратетиса (Rostovtseva, Rybkina, 2017). На основании комплекса детальных исследований конкских-нижнесарматских отложений ранее не изученного разреза вблизи поселка Уджарма, было уточнено стратиграфическое положение конкского регионаруса. Предполагалось, что конкские отложения накапливались с 13,8–13,4 до 13,0–12,1 млн лет (Невесская и др., 2004; Palcu et al., 2017; Попов и др., 2013). Согласно полученным результатам, возраст границы конка-сармат отвечает рубежу 12,256 млн. лет.

17.1 Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта

Были изучены средне-верхнемиоценовые отложения Восточного Паратетиса на примере опорных разрезов Таманского и Керченского полуостровов и восточных районов Грузии. Согласно методологии проведения циклостратиграфических исследований, были произведены измерения магнитной восприимчивости и определены в строении толщ признаки устойчивых долгопериодических колебания инсоляции. В ходе проведенных исследований были получены новые данные, позволяющие проводить сопоставление формирования понтических отложений с основными этапами Мессинского кризиса солености, выделяемого в Средиземноморье. Используя статистические методы, включающие построение Lomb-Scargle и REDFIT периодограмм, в изучаемых отложениях выявлены циклы, связанные с изменчивостью орбитальных параметров Земли (прецессией и изменением наклона земной оси) (Rybkina, Rostovtseva, 2017; Rostovtseva, Rybkina 2017). По особенностям астрономической цикличности мзотис-понтических (переходных) и

понтических толщ, вскрываемых в разрезе Железный Рог Тамани, установлено, что накопление «переходных» слоев началось около 6,3 млн. лет назад и возраст нижней границы понта соответствует 6,1 млн. лет.

Формирование отложений нижней части понта (новороссийских слоев) происходило с 6,1 по 5,6 млн. лет, что по времени отвечает первому этапу МСК. Портаферские слои понта накапливались с 5,6 по 5,45 млн. лет с развитием значительного перерыва в седиментации, что хорошо согласуется с особенностями осадконакопления второго этапа МСК. Длительность внутripонтического перерыва составляет ~ 150–160 тыс. лет, что в свою очередь вносит значительные корректировки в представления о возрасте верхнего понта. Выводы о наличии перерыва были сделаны по результатам комплексного анализа как литологического строения данных отложений, так и методами циклостратиграфии. Учитывая маломощность накоплений портаферских слоев (около 6 метров) и наличие признаков переотложения осадочного материала, а также результаты обработки данных магнитной восприимчивости пород, позволяющих выявлять астрономическую цикличность толщ, доказывающаяся прерывистость осадконакопления в понтическое время (Rostovtseva, Rybkina, 2017). Верхняя граница понта (кровля босфорских слоев) датируется 5,2 млн. лет, что в целом отвечает завершению МСК и восстановлению морских условий в Средиземноморском бассейне. Полученные данные хорошо согласуются с результатами микропалеонтологических исследований (Radionova et al., 2012).

В рамках решения спорного вопроса о положении границы мэотиса и сармата, впервые были проведены циклостратиграфические исследования сармат-мэотических переходных слоев разреза мыса Панагия (Тамань), сочетающиеся с петромагнитными и палеомагнитными исследованиями, направленными на получение недостающих данных по магнитостратиграфии верхнемиоценовых толщ Восточного Паратетиса. Был проведен комплекс петромагнитных и палеомагнитных исследований состава ферромагнитной фракции и магнитной анизотропии для обоснования надежности полученных результатов. Палеомагнитное изучение показало, что породы в кровле верхнего сармата разреза мыс Панагия намагничены прямо и обратно. Породы низов нижнего мэотиса намагничены прямо, обратно и снова прямо. Сопоставление с магнитохронологической шкалой приводит к выводу о соответствии изученной части разреза хронам C4n, C3Br и C3Bn. Полученные результаты согласуются с данными биостратиграфических и радиометрических исследований. По результатам построения REDFIT и Lomb-Scargle (Paillard et al. 1996) периодограмм был выявлен устойчивый цикл 3.11-3.49 м, который фиксируется по всему

разрезу и вероятно отвечает прецессионным колебаниям. Диаграммы Wavelet выявили цикличность в 6 м, что согласуется с данными, ранее полученными по разрезу Попов Камень (Таманский п-ов). Эти циклы в ~3 и ~6 метров отвечают различным периодам астрономической цикличности и отвечают скоростям осадконакопления около ~12 см/тыс. лет, что согласуется с современными представлениями. Это также коррелируется с данными полученными ранее о нижней границе мзотиса 7.6 млн. лет (Trubikhin 1989, Trubikhin & Pilipenko 2011, Radionova et al. 2012, Popov et al. 2013, Rybkina et al., 2015, Palcu et al., 2018).

В рамках дискуссионного вопроса о стратиграфическом положении конкского региояруса, были проведены комплексные циклостратиграфические, литологические и палеомагнитные исследования конкских отложений разреза Уджарма (Грузия) (см. Приложение №1), опробованные в рамках полевых работ в 2018г (см. Приложение). Изучаемый разрез был вскрыт в результате строительства дороги Тбилиси-Телави и ранее никем не был изучен. В бортовой части дороги вскрываются отложения конкского и нижней части сарматского региоярусов общей мощностью порядка 88 метров.

В комплекс литологических исследований входило изучение вещественного состава отложений и изучение пород в шлифах. В валовых пробах изучаемых глинистых отложений миоцена Черноморского региона рентгенофазовым анализом установлено присутствие 18 разновидностей минеральных фаз. В составе отмечаются монтмориллонит (10–38%), гидрослюда (иллит) (1–24%), смешанослойные минералы (0–6%), каолинит (0–4%), хлорит (1–10%), кварц (15–30%), калиевый полевой шпат (КПШ) (0–12%), альбит (3–44%), апатит (0–4%), роговая обманка (0–2%), кальцит (0–30%), доломит (0–4%), сидерит (0–4%), гипс (0–16%), пирит (0–6%), марказит (0–7%), ярозит (0–3%), гётит (0–5%). В составе тонкодисперсной фракции рентгенофазовым анализом выявлено наличие 7 разновидностей минеральных фаз (рис. 1). В составе отмечаются монтмориллонит (42–65%), гидрослюда (иллит) (4–28%), смешанослойные минералы типа слюда–сметтит (0–6%), каолинит (2–9%), хлорит (2–10%), кварц (11–35%), альбит (0–7%). В целом, отмечается достаточно однотипный состав изучаемых глинистых отложений с заметным преобладанием содержания монтмориллонита и кварца.

При исследовании отложений нижнего сармата и конки разреза Уджарма в шлифах было установлено наличие трёх основных типов осадочных пород: глинистых, обломочных и карбонатных отложений.

Глинистые породы в целом преобладают в составе рассматриваемых отложений. По особенностям вещественного состава и текстурным признакам среди них можно выделить три основных литологических типа: глины известковые с редкими тонкими линзовидными скоплениями алевритовой обломочной примеси (1); глины с разной степенью карбонатности с частыми тонкими (мм) линзовидными прослоями песчано-алевритового и алеврито-песчаного материала (2); глины разной степенью карбонатности алеврито-песчаные с беспорядочным расположением обломочной составляющей (3). Глины с линзовидными прослоями обломочного материала имеют наибольшее распространение в изучаемых толщах.

Обломочные породы представлены в основном песчаными образованиями. Среди песчаников выделяются разновидности: разномелкозернистые с наличием обломков до 1,5 мм с кальцитовым цементом; мелко-среднезернистые, средне-мелкозернистые, мелкозернистые и тонко-мелкозернистые с кальцитовым цементом; средне-мелкозернистые и тонко-мелкозернистые с глинистым цементом.

Песчаники с обломками от тонкой до среднезернистой размерности с кальцитовым цементом среди изучаемых обломочных пород преобладают. Обломочные зерна угловатые и слабоокатанные. Песчаники отличаются в основном средней и хорошей отсортированностью.

Карбонатные породы среди рассматриваемых отложений развиты незначительно и диагностированы при описании 3 шлифов. В ходе исследований выявлено наличие микробинальных известняков, сложенных микритовым карбонатом и образующих мелкие бугорчатые узловатые выделения. Установлено проявление вторичной карбонатизации по единичному прослою глин с обилием алевритовой обломочной примеси.

Нижнесарматские и конкские отложения разреза Уджарма впервые исследованы методами циклостратиграфии, применение которых позволило получить новые данные, способствующие уточнению геохронологии верхнемиоценовых толщ Восточного Паратетиса. В конкских отложениях выявлен цикл длиной от 2,3 м, сопоставимый с циклом прецессии (~24 000 лет). Сопоставление полученного распределения Гаусса средней и верхней части конкских отложений с кривой изменения инсоляции Земли [Laskar et al., 2004] с учетом имеющихся возрастных датировок позволило установить возраст граница конка-сармат, соответствующий рубежу 12,256 млн. лет.

17.2 Методы и подходы, использованные при реализации Проекта.

Работы в рамках проекта представляли собой междисциплинарные исследования, а именно комплекс литологических, циклостратиграфических и палеомагнитных работ. Оценка полноты осадочной записи осуществлялась на основании результатов литологических исследований (Ростовцева, 2012): анализа послойного строения разрезов, вещественного и компонентного состава пород, генезиса осадков и др. Важной составляющей являлись палеомагнитные исследования. Определение астрономических циклов проводилось по измерениям скалярных магнитных параметров пород (таких как, магнитная восприимчивость) с последующим применением программного обеспечения PAST (Schulz and Mudelsee, 2002), позволяющего проводить спектральный анализ первичных данных с построением Lomb-Scargle и REDFIT периодограмм, а также Wavelet распределений. Построение периодограмм позволяет выявить наличие повторяющихся циклов и их длину в метрах. Длительность циклов рассчитывалась по соотношению мощности отложений и времени их накопления с учетом всех особенностей литологического строения (сочетания терригенного и биогенного осадконакопления, наличия или отсутствия перерывов, фацальной принадлежности отложений и т.д.). Полученные циклы были сопоставлены с долгопериодическими колебаниями прецессии земной оси (19, 22, 24 тыс. лет), угла наклона земной оси к плоскости эклиптики (41 тыс. лет) и эксцентриситета (100 и 400 тыс. лет). По астрономической цикличности, записанной в отложениях, отчетливо прослеживается изменчивость скорости седиментации во времени. Полученная с использованием разложения Гаусса рядов первичных данных цикличность была сопоставлена с кривой глобальных изменений инсоляции Земли в прошлом (Laskar et al., 2004) в программном обеспечении AnalySeries. В результате применения этой методики было проведено датирование границ регионов миоцена, что являлось одной из основных целей проекта. Интерпретация данных спектрального анализа опиралась на палеомагнитные определения с учетом имеющихся датировок границ хронов прямой и обратной полярности в общей стратиграфической шкале. В ходе исследований проводились измерения следующих магнитных параметров: естественная остаточная намагниченность NRM , магнитная восприимчивость k , безгистерезисная остаточная намагниченность ARM , остаточная намагниченность насыщения J_{rs} , остаточная коэрцитивная сила B_{cr} . Для определения ферромагнитного минерала-носителя естественной остаточной намагниченности применялся один или несколько термомагнитных анализов образцов ($J_{rs}(T)$, $J_s(T)$, $k(T)$), где J_s – намагниченность

насыщения, T – температура. Также проводилось определение доменного состояния ферромагнитных зерен.

17.3 Сопоставление результатов, полученных при реализации с мировым уровнем.

Одной из проблем изучения миоцена Восточного Причерноморья, на решение которой был направлен проект, является проведение широких межрегиональных сопоставлений этапов развития Эвксино-Каспия с бассейнами Западного Паратетиса и Средиземноморья. Остро дискуссионными являлись и до сих пор остаются объём и стратиграфическое положение таких региональных стратиграфических подразделений как тархан, чокрак, конка, мзотис, понт и многих других региональных подразделений миоцена.

Решить эти вопросы с помощью традиционных методов стратиграфии, при недостатке материала, не удавалось. С учетом развития кризисных условий осадконакопления, проведение полноценных палеогеографических построений является весьма затруднительным. Одной из возможностей дальнейшего успешного изучения развития Черноморского региона в неогене является проведение комплексных междисциплинарных исследований, в число которых входят методики восстановления астрономической цикличности, позволяющей рассчитывать более достоверно скорости седиментации, осуществлять датирование отложений и проводить широкие сопоставления. Определение астрономической цикличности толщ проводится по изменчивости скалярных магнитных параметров (магнитной восприимчивости пород) и/или изотопного состава отложений (часто по составу известковых раковин планктонных и бентосных фораминифер). Применение подобных высокоточных методов с использованием программ статистической обработки (REDFIT и AnalySeries) и построением периодограмм позволяет более достоверно рассчитывать скорости седиментации, а также получать определения возраста пород с точностью от 20 до 400 тыс. лет для мезозойских и кайнозойских отложений (Hinnov, Ogg, 2007).

Внедрение методов циклостратиграфии в синтезе с литологическими и геохронологическими исследованиями дают возможность восстановления истории геологического развития различных регионов. За рубежом за последние 10 лет методы циклостратиграфии получили распространение в анализе отложений Западного Паратетиса и Средиземноморья (Roveri, Manzi, 2006; Husing et al., 2009; Lier et al., 2009; Kern et al., 2012, 2013). Исследования проводятся как по данным изотопии, так и магнитной восприимчивости пород. Подобные работы в Черноморском регионе Восточного Паратетиса проводятся только авторами проекта, в ходе которых были получены

уникальные данные по магнитной восприимчивости и палеомагнетизму горных пород среднего и верхнего миоцена.

18. Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы S_q с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий

Номер гранта РФФИ: 18-55-05006

Номер госрегистрации: АААА-А18-118030290123-2

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

Ответственный исполнитель: директор ГЦ РАН чл.-корр. А. А. Соловьев

18.1. Оценка точности моделей ГМПЗ

Был предложен новый подход к выделению сигналов главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) по данным магнитных обсерваторий. Основой соответствующих алгоритмов служит мера аномальности (МА) [Soloviev *et al.*, 2016], построенная на принципах дискретного математического анализа (ДМА). Разработанный метод был применен к анализу данных сорока девяти средне- и низкоширотных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ за 2011–2015 гг. По данным за выделенные временные интервалы для каждой обсерватории были получены временные ряды компонент главного магнитного поля и их вековых вариаций. Полученные данные сравнивались с прогнозными значениями, полученными согласно наиболее точным моделям главного магнитного поля Земли SIFM [Olsen *et al.*, 2015], CHAOS-6 [Finlay *et al.*, 2016] и EMM-2015 (<https://ngdc.noaa.gov/geomag/EMM/>). Оценка точности моделей производилась с использованием набора статистических показателей: коэффициента линейной корреляции Пирсона, коэффициентов ранговых корреляций Спирмена и Кендалла, средних и средних медианных значений выборок и среднего расхождения между данными, полученными предложенным методом из прямых обсерваторских наблюдений, и модельными данными.

Для количественной оценки схожести полученных результатов в данном случае было оправдано применение ранговой статистики, поскольку для каждой обсерватории используется сравнительно небольшая выборка (54 значения за промежуток 4.5 года с шагом 1/12 года). Вместе с тем, при сравнении пар вариаций компонент, полученных предложенным методом и построенных по каждой из моделей, коэффициенты ранговой

корреляции как по Спирмену, так и по Кендаллу оказались одинаковыми для всех моделей. Несмотря на то, что при вычислении коэффициента линейной корреляции Пирсона были получены различные для разных пар выборок значения, они оказались близкими друг к другу и не достаточными для того, чтобы делать выводы о точности той или иной модели. Таким образом, все три указанных показателя оказались неинформативными. Также, был проведен корреляционно-регрессионный анализ выборок. Исходя из того, что данные, полученные из прямых обсерваторских наблюдений, заведомо более точные, чем рассчитанные по моделям СГА, расчет модельных выборок производился через обсерваторские по уравнению линейной регрессии. Далее, рассчитывалась величина доверительного интервала, получаемая через среднеквадратическое отклонение полученной выборки и коэффициент Стьюдента. Все модельные данные попали в соответствующие доверительные интервалы, что свидетельствует о том, что все модельные выборки оказались статистически значимыми. Самыми же значимыми и физически обоснованными параметрами оценки точности модели являются близость модельной кривой к обсерваторской и постоянство соответствующего сдвига во времени. Постоянство сдвига свидетельствует о корректном разделении вклада изменчивого главного поля и квазипостоянного литосферного поля, а близость свидетельствует о степени учета литосферного поля в соответствующей модели. Кроме того, разница модельных и реально наблюдаемых значений компонент поля в каждый отдельный момент времени обусловлена недостаточным пространственным разрешением моделей СГА. Величина средней разницы между значениями компонент поля по модельным данным и по данным, полученным при помощи предлагаемого метода, является наименьшей для модели ЕММ-2015 как по средним значениям, так и по максимальным и минимальным. Таким образом, значения ГМПЗ согласно модели ЕММ-2015 наиболее близки к значениям, получаемым из прямых обсерваторских наблюдений. Анализ также показал отсутствие в модели выбросов и сохранение вклада квазипостоянного литосферного поля.

Следует отметить, что, оценивая лишь сами значения компонент поля, достаточно проблематично сделать вывод о точности моделей CHAOS-6 и SIFM. В ряде случаев данные, полученные по модели CHAOS-6, лежат ближе к обсерваторским кривым, а в ряде случаев – данные по модели SIFM. Для определения более точной модели сравнивались первые производные компонент магнитного поля по времени. Показано, что с точки зрения аппроксимации векового хода ГМПЗ более точной следует считать модель CHAOS-6 [Соловьев, Смирнов, 2018].

18.2. Количественные оценки динамических параметров низкоширотной ионосферной токовой системы Sq по данным геомагнитных обсерваторий

Точный выбор магнитно-спокойных дней в каждом месяце необходим при выделении и изучении месячных и сезонных Sq-вариаций трех ортогональных компонент магнитного поля (X , Y , Z). Большинство подходов к этой задаче основано на выборе низких значений планетарного индекса K_p (напр., [Bello et al., 2014; Owolabi et al., 2014; Vichare et al., 2016]. В [Soloviev et al., 2019] исследовались динамические параметры суточной вариации Sq за минимум солнечного цикла 23/24 в 2008 г. Для обнаружения магнитно-спокойных дней на каждой обсерватории применялся алгоритм МА. Глобальное распределение Sq-амплитуд трех ортогональных компонент магнитного поля анализировалось с использованием данных 75 обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ и 46 станций сети SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>) (рис. 18.1). Исследования показали сильную широтную зависимость амплитуд $Sq(X)$, которая аппроксимируется полиномиальной кривой шестого порядка. Амплитуды $Sq(Y)$ также предполагают широтную зависимость, в то время как $Sq(Z)$ не зависят от широты.

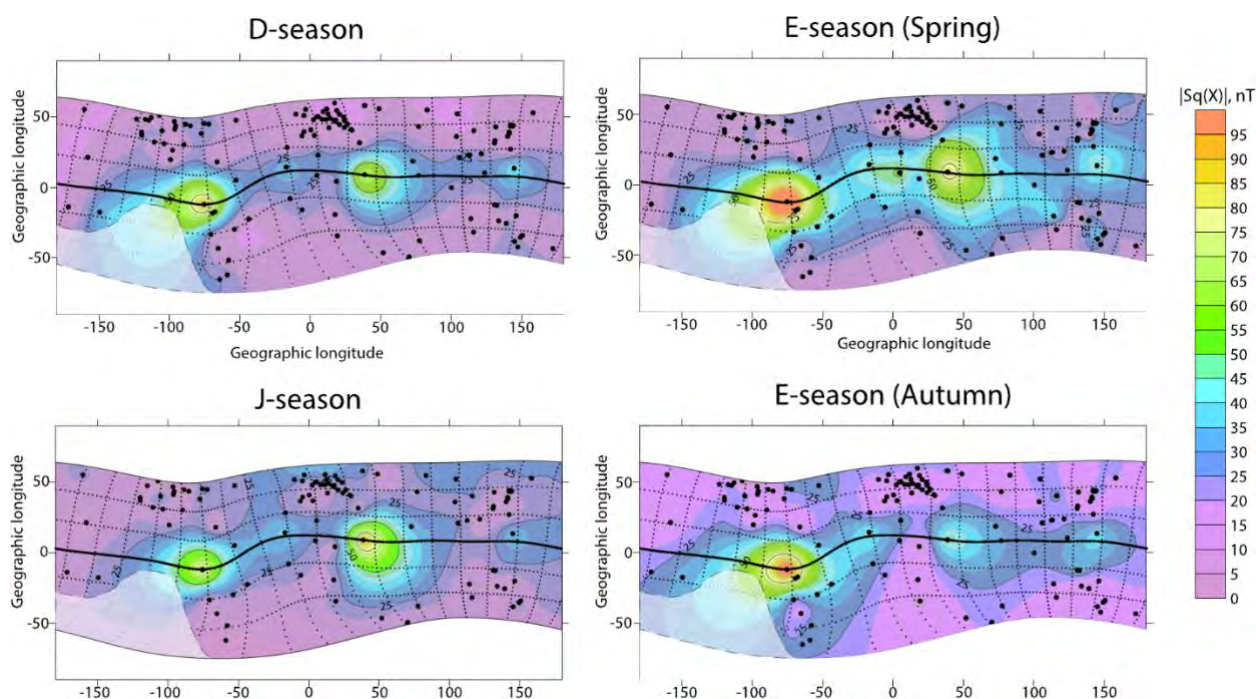


Рисунок 18.1 – Глобальное сезонное распределение амплитуд $Sq(X)$ в 2008 г.: жирная черная линия показывает геомагнитный экватор за 2008 г., черные точки – положение магнитных станций и обсерваторий, пунктир – геомагнитные параллели и меридианы, зона без покрытия данными в южно-тихоокеанском секторе затенена

По магнитно-спокойным данным, выбранным с использованием МА, было продемонстрировано, что в экваториальной области амплитуды $Sq(X)$ сильно зависят от экваториального электроджета (ЭЭД), достигая максимума в периоды равноденствия в

регионе Южно-Атлантической магнитной аномалии (рис. 18.2). $Sq(Y)$ демонстрирует четкую зависимость от солнечной активности и количества солнечного освещения, достигая больших значений в летнем полушарии и меньших – в зимнем.

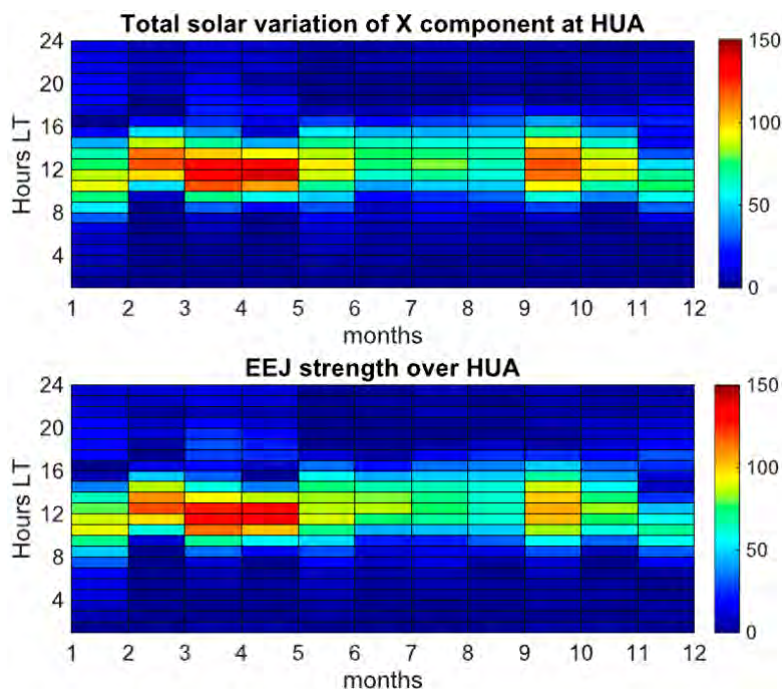


Рисунок 18.2 – Полная амплитуда суточной X-вариации на обсерватории HUA (Перу) и интенсивность ЭЭД над HUA в зависимости от месяца и локального времени в 2008 г.

Была реконструирована эквивалентная токовая система Sq в E-слое низкоширотной ионосферы с использованием данных станций и обсерваторий с Австралийского материка и узкого европейско-африканского широтного сегмента. Была показана сильная зависимость токовой системы Sq от солнечной активности: токовые вихри в зимнем полушарии распадаются, не показывая следов образования токовых петель, в то время как их формирование становится очевидным в летнем полушарии (рис. 18.3, 18.4). Таким образом, метод МА может быть полезен для изучения геомагнитных вариаций ионосферного происхождения.

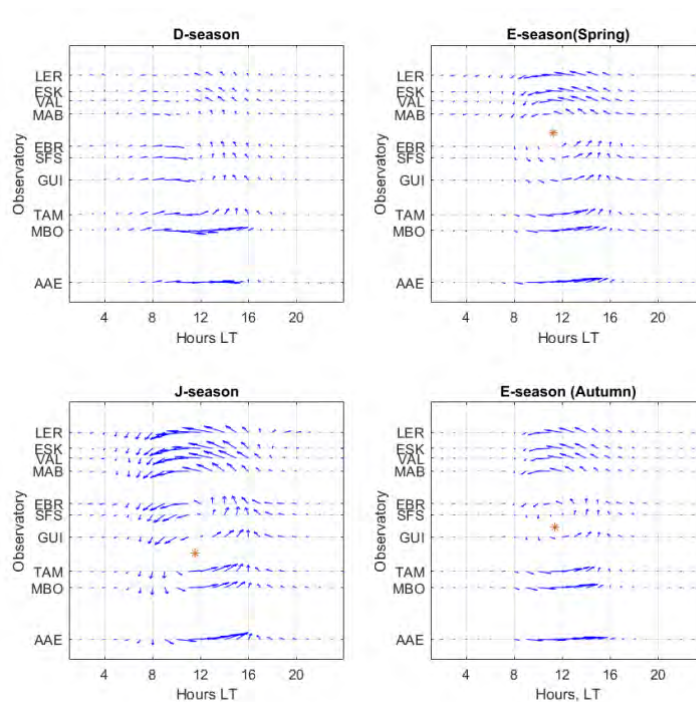


Рисунок 18.3 – Сезонные токовые структуры Sq над европейско-африканским сектором (северный вихрь Sq) в 2008 г., вычисленный фокус показан красным

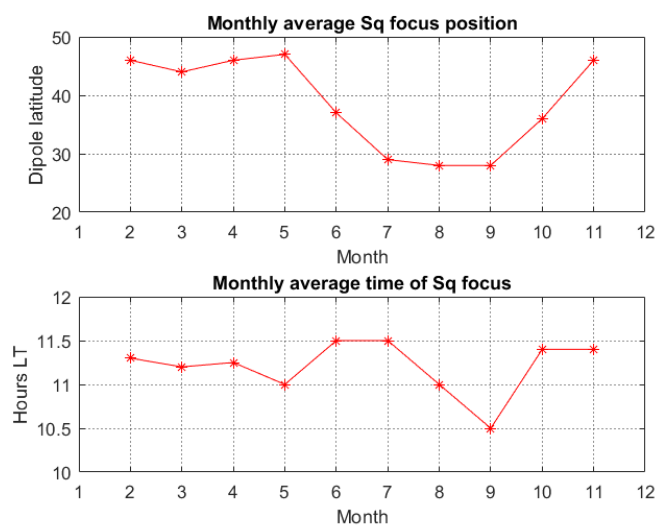


Рисунок 18.4 – Изменение геомагнитной широты (сверху) и локального времени (снизу) фокуса токовой петли Sq в северном полушарии в 2008 г.

18.3. Проведение полевой магнитной съемки и настройка магнитометрической аппаратуры

На территории обсерватории «Гюлагарак» (Армения) [Гвишиани и др., 2018; Пилипенко и др., 2019] была выполнена полевая магнитоградиентометрическая съемка участка местности площадью ~35,5 тыс. кв. м (96×370 м) с шагом 10×10 м. По ее итогам построены карты аномальной составляющей полного вектора магнитного поля (рис. 18.5)

и его вертикального градиента. Результаты свидетельствуют о наличии магнитных аномалий природного характера. После детального анализа данных общей съемки и проведения серии съемок более высокого пространственного разрешения были определены места строительства обсерваторских павильонов и их приборных постаментов. Ввиду наличия намагниченных горных пород павильоны были возведены на высоких сваях над поверхностью земли.

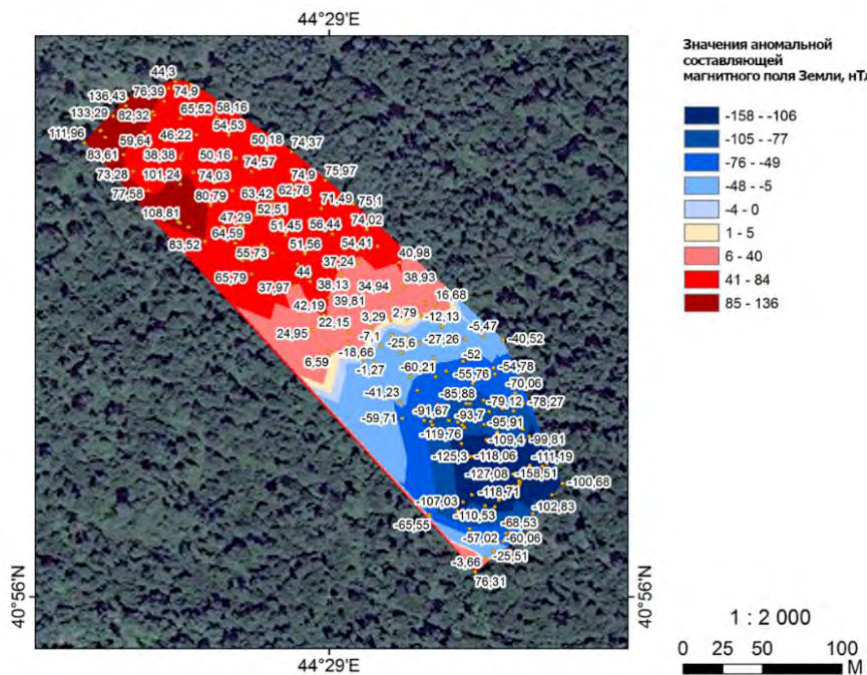


Рисунок 18.5 — Карта магнитных аномалий по результатам полевой магнитной съемки на территории обсерватории

Также была выполнена настройка магнитометрической аппаратуры — скалярного магнитометра POS-1 (производства Лаборатории квантовой магнитометрии УрФУ, Россия) в обсерваторском исполнении. Сенсор магнитометра был размещен в абсолютном павильоне на специально предназначенном для него постаменте. Электронный блок магнитометра размещен в тамбуре павильона. Электропитание магнитометра осуществляется от аккумулятора 12В. В техническом павильоне обсерватории была установлена система сбора данных магнитометра POS-1 и настроена передача данных в ГЦ РАН. Данные загружаются в БД межрегионального Центра геомагнитных данных. Внешний доступ к данным осуществляется через веб-сайт Центра (<http://geomag.gcras.ru/>).

Список использованных источников

А. Д. Гвишиани, А. А. Соловьёв, Р. В. Сидоров, Р. И. Краснощёв, А. А. Груднев, Д. В. Кудин, Дж. К. Карапетян и А. О. Симонян. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье // Вестник ОНЗ РАН, том 10, NZ4001, 2018, doi: 10.2205/2018NZ000357.

В. А. Пилипенко, Р. И. Красноперов, А. А. Соловьёв. Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России // Вестник ОНЗ РАН, т. 11, NZ1103, <https://doi.org/10.2205/2019NZ000362>, 2019

А. А. Соловьёв, А. Г. Смирнов. Оценка точности современных моделей главного магнитного поля Земли с использованием ДМА-методов распознавания пониженной геомагнитной активности по данным геомагнитных обсерваторий // Физика Земли. 2018. № 6. С. 72–86. doi: 10.1134/S0002333718060108

Bello, O. R., Rabiou, A. B., Yumoto, K., Yizengaw, E., 2014. Mean solar quiet daily variations in the earth's magnetic field along East African longitudes. Adv. Space Res. 54 (3), 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.058>, ISSN 0273-1177

Finlay, C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner- Clausen L. Recent geomagnetic secular variation from SWARM and ground observatories as estimated in CHAOS-6 geomagnetic field model // Earth, Planets and Space. 2016. Vol: 68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>

Owolabi, T. P., Rabiou, A. B., Olayanju, Gbenga, Bolaji, O., 2014. Seasonal variation of worldwide solar quiet of the horizontal magnetic field intensity. Appl. Phys. Res. 6. <https://doi.org/10.5539/apr.v6n2p82>

Olsen N., Hulot G., Lesur V., Finlay C. C., Beggan C., Chulliat A., Friis-Christensen E., Sabaka T. J., Floberghagen r., Haagmans R., Kotsiaros S., Luhr H., Toffner-Clausen L., Vigneron P. The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field // Geophys. Res. Lett., 2015, Vol. 42, doi:10.1002/2014GL062659

Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S., Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // Annals of Geophysics. 2016. Vol. 59 (6). DOI: 10.4401/ag-7116.

Soloviev, A., Smirnov, A., Gvishiani, A., Karapetyan, J., Simonyan, A. (2019), Quantification of Sq parameters in 2008 based on geomagnetic observatory data, Advances in Space Research, Vol. 64, Iss. 11, 2019, pp. 2305–2320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.038>

Vichare, G., Bhaskar, A., Ramesh, D. S., 2016. Are the equatorial electrojet and the Sq coupled systems? Transfer entropy approach. Adv. Space Res. 57 (9), 1859–1870. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.020>

19. Международная деятельность ГЦ РАН

В 2019 г. Геофизический центр РАН (ГЦ РАН) вел активную международную деятельность в кооперации с зарубежными коллегами и институтами-партнерами.

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав руководящих органов ряда 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) и российским национальным делегатом в Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA) IUGG.

Научный руководитель ГЦ РАН академик А. Д. Гвишиани является членом Коллегии экспертов Европейского научного фонда (“ESF College of Expert Reviewers”). Он исполнял должность представителя IUGG в Международном комитете по данным для науки и технологий при Международном совете по науке (ISC Committee on Data for Science and Technology — CODATA). Также в 2019 г. А. Д. Гвишиани был назначен председателем Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики.

Заместитель директора по развитию, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина занимает должность вице-президента CODATA. Также она была избрана председателем рабочей группы по принципам обмена и управления данными GEO и новым представителем IUGG в CODATA.

Главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований, д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова была членом исполнительного комитета (ИК) Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) и избрана представителем IUGG в Научном комитете по солнечно-земной физике (SCOSTEP).

В 2019 г. продолжилась работа по совершенствованию магнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, поддерживаемых ГЦ РАН. Развивается научное сотрудничество между ГЦ РАН и Институтом ионосферы (г. Алма-Ата, Республика Казахстан). В феврале 2019 года установлен канал обмена данными между обсерваторией «Алма-Ата» и сервером Российско-украинского центра геомагнитных данных. Данные передаются в оперативном режиме. Стороны приступают к обмену историческими данными по линии Мировых центров данных, функционирующих в ГЦ РАН.

В 2019 г. проводилась работа по развертыванию новой совместной геомагнитной обсерватории «Гюлагарак» (IAGA-код: GLK), область Лори, Армения, развиваемую

совместно ГЦ РАН и Институтом геофизики и инженерной сейсмологии (ИГИС) НАН РА им. академика А. Назарова. Строительство ведет армянская сторона, а оснащение магнитной обсерватории в соответствии с международными стандартами выполняет ГЦ РАН. В 2019 г. основные строительные работы были завершены. Первые абсолютные измерения были начаты в ноябре 2019 г.

В ноябре 2019 г. прошла встреча директора ГЦ РАН чл.-корр. РАН А. А. Соловьева и ученого секретаря ГЦ РАН к.ф.-м.н. Р. И. Красноперова с Президентом Национальной академии наук Республики Армения (НАН РА) академиком Р. М. Мартirosяном и академиком-секретарем Отделения химии и наук о Земле НАН РА академиком Л. А. Тавадяном в здании Президиума НАН РА (Ереван, Армения). В рамках встречи состоялся визит на геомагнитную обсерваторию «Гюлагарак». Президента и академика-секретаря НАН РА ознакомили с научной инфраструктурой обсерватории и принципами проведения высокоточных наблюдений магнитного поля Земли.

В марте 2019 г. ГЦ РАН с официальным визитом посетила делегация из Центра геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси. В ходе встречи обсуждались пути совместных исследований в области мониторинга магнитного поля Земли. В частности, обсуждалось доведение магнитной обсерватории "Плещеницы" до стандарта ИНТЕРМАГНЕТ и её включение в сеть под управлением ГЦ РАН, аэромагнитная съемка территории России и Беларуси, обмен историческими и современными геофизическими данными по профилям Мировых центров данных ГЦ РАН.

В мае 2019 г. состоялся ответный визит: делегация ГЦ РАН с официальным визитом посетила Национальную академию наук Беларуси. В состав делегации вошли: директор ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев, научный руководитель, заместитель академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН академик РАН А. Д. Гвишиани и заведующий лабораторией геофизических данных к. ф.-м. н. Б. А. Дзедобоев. В ходе встречи обсуждались вопросы, касающиеся оснащения обсерватории «Плещеницы» комплектом современного магнитометрического оборудования, проведения аэромагнитной съемки Республики Беларусь и прилегающей территории Российской Федерации, изготовления феррозондового векторного магнитометра на базе ИФ НАНБ, совместного участия в научных проектах Союзного государства и подачи заявок на совместные конкурсы РФФИ–БРФФИ.

15 мая 2019 г. в ГЦ РАН состоялся визит руководителя группы информационно-программной инженерии Департамента информационных систем Венского технологического университета (TU-Wien), г. Вена, Австрия, адъюнкт-профессора, доктора

Андреаса Раубера. Целью визита было согласование вопросов научного сотрудничества ГЦ РАН с Венским технологическим университетом.

29 июля 2019 г. сотрудники Геофизического центра РАН – заместитель директора по развитию А. И. Рыбкина и младший научный сотрудник лаборатории инновационных проектов А. Е. Куйумджу – посетили с рабочим визитом компанию по производству проекторов Snowwhite Projection Display Technology Co. (г. Шэньчжэнь, Китай) для обсуждения научно-производственного сотрудничества. ГЦ РАН является единственной организацией в России, которая активно использует проекционное оборудование для визуализации своих научных достижений. Институт также разрабатывает уникальное программное обеспечение, что открывает новые возможности для создания демонстрационно-образовательных моделей. Результатом переговоров с представителями Snowwhite Projection Display Technology Co. стали обмен опытом в разработке презентаций, улучшение качества оборудования и дальнейшее развитие проекта сферической визуализации на российском и китайском рынках.

2 августа 2019 г. ГЦ РАН посетила делегация ученых Института прогноза землетрясения Китайской Администрации по землетрясениям (IEFCEA). Цель визита – рассмотрение перспектив участия ГЦ в создании Китайского сейсмического экспериментального полигона сейсмически нестабильного региона на юго-западе КНР.

В 2019 г. лабораторией геофизических данных ГЦ РАН совместно с лабораторией электронных публикаций продолжилась работа по проекту "База данных по наукам о Земле" — ESDB (Earth Science DataBase), целью которого является создание современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier). Главной целью проекта является повышение значимости и доступности геофизических данных для научных исследований, облегчение процесса их поиска, идентификации и публикации, а также развитие культуры цитирования данных.

Важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах среди которых стоит отметить следующие:

- 26–27 марта 2019 г. в Вене, Австрия прошла региональная конференция AAPF (American Association of Petroleum Geologists). Тема конференции «Paratethys Petroleum Systems: Between Central Europe and the Caspian Region». С устным докладом выступила заместитель директора ГЦ РАН А. И. Рыбкина.
- 24 апреля 2019 г. в ГЦ РАН состоялся научный семинар, на котором выступил

с докладом «Структура и динамика верхней мантии Ближнего Востока» д. ф.-м. н. М. К. Кабан (GFZ, Потсдам, Германия).

- 22–30 мая 2019 г. в Архангельске проходил научный саммит «Неделя арктической науки», ежегодно проводимый Международным арктическим научным комитетом. Директор ГЦ РАН чл.-корр. А. А. Соловьев выступил на саммите с пленарным докладом “Geomagnetic field dynamics in the Arctic region: sources, observations and models”.

- 30 мая 2019 г. ГЦ РАН совместно с Музеем Мирового океана (г. Калининград) принял участие в Международном фестивале «Интермузей». Сотрудники ГЦ представили интерактивный стенд со сферическим проекционным экраном под управлением ПО ORBUS, на котором посетители получили возможность самостоятельно изучить глобальные процессы нашей планеты посредством специально разработанного интерфейса.

- 08 июня 2019 г. ученый секретарь ГЦ РАН Р. И. Красноперов принял участие в работе Петербургского международного экономического форума 2019 года. Частью программы ПМЭФ’19 был Международный молодежный экономический форум, на которой молодые люди имеют возможность обсудить ключевые экономические и политические вопросы с ведущими мировыми экспертами. Программа форума включала в себя ряд тематических панельных сессий, посвященных актуальным вопросам, стоящим перед сообществом молодых ученых в России.

- 8–19 июля 2019 г. в Монреале, Канада, прошла 27 Генеральная ассамблея IUGG. Ассамблея была посвящена 100-летию юбилею IUGG. Национальным делегатом от РФ был чл.-корр. РАН А. А. Соловьёв. Также от ГЦ РАН в работе Ассамблеи приняли участие: ученый секретарь ГЦ РАН Р. И. Красноперов, г.н.с. Р. Ю. Лукьянова и г.н.с. В. А. Пилипенко.

- 29 июля 2019 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже прошла памятная конференция “International Cooperation in Earth and Space Sciences”, посвященная 100-летию Международного геодезического и геофизического союза (IUGG). Российскую делегацию возглавлял научный руководитель ГЦ РАН, председатель Национального геофизического комитета РАН (НГК РАН) академик РАН А. Д. Гвишиани. Его заместителем был ученый секретарь ГЦ РАН и по совместительству секретарь НГК РАН Р. И. Красноперов.

- 22–23 августа 2019 г. в Академгородке СО РАН в Новосибирском государственном университете проходит первое заседание нового состава Международного академического совета НГУ. Сегодня совет включает в себя крупных учёных из ведущих европейских стран, США, Японии и России. В новый состав совета вошёл и научный руководитель ГЦ РАН академик РАН А. Д. Гвишиани.

- 17–18 сентября 2019 г. в Пекине китайским национальным комитетом CODATA был проведён международный семинар "Open Research Data Policy and Practice". В семинаре участвовали представители Национального российского комитета CODATA: геофизик, научный руководитель ГЦ РАН академик А. Д. Гвишиани и геолог, вице-президент CODATA, заместитель директора по развитию ГЦ РАН к. г-м. н. А. И. Рыбкина.
- 9–20 сентября 2019 г. научный сотрудник лаборатории инновационных проектов ГЦ РАН А. А. Одинцова принимала участие в международном научно-практическом семинаре по Большим данным (CAS & CODATA Joint International Training Workshop on Scientific Big Data and Machine Learning), который проходил в Компьютерном центре Китайской академии наук (Пекин, КНР). Организаторами мероприятия выступили Международный комитет по данным CODATA и Китайская академия наук CAS.
- 2–10 ноября 2019 г. Заместитель директора по развитию ГЦ РАН А. И. Рыбкина принимала участие в международном саммите Группы земных наблюдений (GEO) в качестве председателя делегации CODATA. Мероприятие проходило г. Канберра, Австралия и традиционно собрало ведущих специалистов, представителей министерств и ученых в области изучения Земли из космоса. А. И. Рыбкиной были сделаны два устных доклада на тематических научных сессиях по темам "Наука о данных и новые решения в области изучения Земли и космоса" и "Данные для нашей планеты: принципы FAIR и развитие междисциплинарных исследований в науках о Земле".

20. Деятельность Национального геофизического комитета РАН

20.1. Введение

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.

В 2019 г. Постановлением Бюро Отделения наук о Земле РАН (№ 13000/1-2 от 19 февраля 2019 г.) был утвержден новый состав Бюро Комитета и его Аппарат на период 2019—2023 гг. Председателем Национального геофизического комитета РАН был утвержден академик РАН А. Д. Гвишиани, заместителями председателя утверждены — д.ф.-м.н. Е. Г. Морозов и к.ф.-м.н. Ю. С. Любовцева. В должности ученого секретаря утвержден к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов (ГЦ РАН).

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.

20.2. 27-я Генеральная ассамблея Международного геодезического и геофизического союза

8—19 июля 2019 г. в Монреале, Канада, состоялась юбилейная 27-я Генеральная ассамблея Международного геодезического и геофизического союза (<http://www.iugg2019montreal.com/>) (рис. 20.1).



Рисунок 20.1 — Эмблема 27-й Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза (IUGG)

Это уникальное научное мероприятие, которое проходит раз в четыре года, собрало ведущих ученых и специалистов в области наук о Земле со всего мира. IUGG является одним из 40 научных союзов, входящих в Международный совет по науке (ISC). Данная ассамблея является юбилейной, поскольку в этом году отмечается 100-летие со дня основания IUGG, состоявшегося 28 июля 1919 г. в Брюсселе. В работе Ассамблеи приняли участие почти 4 000 делегатов из 94 стран мира. Со стороны России в научной программе Ассамблеи приняли участие 75 делегатов, представивших около 120 устных и стендовых докладов.

В рамках Ассамблеи 9, 12 и 16 июля состоялись заседания Совета IUGG. Россию на указанных заседаниях в качестве национального делегата представлял чл.-корр. РАН А. А. Соловьев. В рамках заседаний Совета IUGG были представлены отчеты президентов восьми ассоциаций Союза. Генеральный секретарь IUGG А. Исмаил-Заде (Германия/Россия) представил доклад о работе комитетов Международного научного совета (ISC) за прошедшие четыре года. Среди прочих был представлен отчет Комитета по данным для науки и техники (CODATA), подготовленный представителем IUGG в CODATA, председателем НГК РАН академиком А. Д. Гвишиани и представителем Комиссии по данным и информации (UCDI) в IUGG А. И. Рыбкиной. На заседании также был представлен отчет Научного комитета по солнечно-земной физике (SCOSTEP), подготовленный представителем IUGG в SCOSTEP, председателем Секции геомагнетизма и аэронавтики НГК РАН В. Д. Кузнецовым.

Важным вопросом, решавшимся на заседаниях Совета IUGG, был выбор места проведения 28-й Генеральной Ассамблеи в 2023 г. Делегаты тайным голосованием выбрали Берлин в качестве места проведения следующей ассамблеи. Состоялись выборы в Бюро, финансовый комитет и комиссии IUGG на срок 2019—2023 гг. Среди утвержденных представителей IUGG есть российские ученые. Представителем IUGG в Комитете по данным для науки и техники (CODATA) утверждена А. И. Рыбкина (ГЦ РАН), представителем IUGG в Научном комитете по солнечно-земной физике (SCOSTEP) — Р. Ю. Лукьянова (ГЦ РАН). А. Исмаил-Заде (ИТПЗ РАН) утвержден представителем IUGG в комиссию ЮНЕСКО по наукам и Земле и снижению природных рисков.

Также в ходе Ассамблеи были представлены места проведения научных ассамблей ассоциаций IUGG в 2021 г.:

- IAVCEI, Роторуа, Новая Зеландия, 15—19 февраля 2021 г. (<http://www.iavcei2021.org/>)
- IAHNS, Монпелье, Франция, 28 июня — 02 июля 2021 г. (<http://www.im2e.org/index.asp>)
- IAG, Пекин, Китай, 28 июня — 03 июля 2021 г. (<https://www.iag-aig.org/events/19>)

- IAMAS—IACS—IAPSO, Пусан, Республика Корея, 18—23 июля 2021 г. (<http://baso-21.org/>)
- IAGA—IASPEI, Хайдарабад, Индия, 22—27 августа 2021 г. (<http://iaga-iaspei-india2021.in/>)

В соответствии с принятым порядком перед очередной Генеральной ассамблеей IUGG секции НГК РАН представляют четырехлетние национальные отчеты (доклады), в которых излагаются основные научные результаты, полученные за эти годы в России. В 2019 г. четырехлетние национальные отчеты были подготовлены следующими секциями: Секция геодезии [*Savinykh and Kaftan*, 2019]; Секция геомагнетизма и аэрономии [*Agayan et al.*, 2019]; Секция метеорологии и атмосферных наук [*Mokhov and Krivolutsky*, 2019]; Секция физических наук об океане [*Badulin et al.*, 2019]; Секция сейсмологии и физики недр Земли [*Gliko and Zavyalov*, 2019].

Все отчеты доступны в разделе «Документы» на сайте НГК РАН (<http://ngc.gcras.ru/documents.html>). За исключением отчета Секции метеорологии и атмосферных наук остальные отчеты были сверстаны и опубликованы силами редакции электронного журнала «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» (<http://ebooks.wdcb.ru/doi/2019IUGG-RU-abs.html>). Опубликованные отчеты также доступны широкой публике на официальном сайте IUGG в соответствующем разделе: <http://www.iugg.org/members/nationalreports/>. По случаю Ассамблеи была выпущена памятная открытка с QR-кодом для доступа к национальному отчету (рис. 20.2).

20.3. Празднование 100-летия IUGG в ЮНЕСКО

29 июля 2019 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже прошла памятная конференция “International Cooperation in Earth and Space Sciences”. Конференция была посвящена 100-летию IUGG, основанного 28 июля 1919 г. в Брюсселе. Почетным гостем конференции был Его Светлость принц Монако Альберт II, который был удостоен звания Почетного члена IUGG за «выдающийся вклад и поддержку исследований климата, водных ресурсов, биоразнообразия и океана».

В рамках научной программы конференции были представлены доклады, затрагивающие вопросы того, как наука может реагировать на потребности общества и решать его актуальные проблемы.

20.4. Обзор работы секций НГК РАН

Секция криосферных наук

В 2019 г. Секцией криосферных наук продолжалась координация исследований российских ученых в рамках международных проектах «Климат и криосфера» (CliC), Глобальные измерения наземного льда из космоса (GLIMS), Глобальное оледенение (GlobGlacier), Международная служба мониторинга ледников (WGMS) и др.

Российские ученые участвовали в проектах под эгидой Ассоциации криосферных наук: Проекте по оценке объемов ледников, 2014—2019 гг. (С. С. Кутузов, И. И. Лаврентьев, Д. Петраков); Проекте GLIMS (Глобальные измерения наземного льда из космоса) (Г. А. Носенко, Т. Е. Хромова); Проекте Randolph Inventory (Мировой Каталог ледников) (Г. А. Носенко, Т. Е. Хромова, С. С. Кутузов, И. И. Лаврентьев); Программе WGMS (Мировая служба мониторинга ледников) (Г. А. Носенко, В. В. Поповнин, О. В. Рототаева).

На период до 2024 гг. вице-президентом IACS избран заведующий отделом гляциологии ИГ РАН к.г.н. С. С. Кутузов. Национальным представителем от России в IACS является академик В. М. Котляков. Членами рабочей группы IACS по оценке объемов ледников на период до 2019 гг. являются С. С. Кутузов, И. И. Лаврентьев, Д. Петраков. Т. В. Павлова входит в состав научного совета проекта «Криосфера и климат». Академик В. П. Мельников является координатором с российской стороны проекта «Мерзлота в Арктике» в рабочей группе по чистой энергетике Президентской комиссии США—Россия. Д. С. Дроздов — член исполнительного комитета Международной ассоциации по мерзлотоведению, А. Г. Скворцов и А. М. Царев — члены Европейской ассоциации геоученых и инженеров, М. О. Лейбман — секретарь криосферной секции по вопросам мерзлоты в Европейском союзе наук о Земле.

В рамках научной программы 27-й Генеральной ассамблеи IUGG Ассоциация IACS стала организатором и со организатором 30 симпозиумов, посвященных проблемам криосферы, в работе которых приняли участие российские ученые.

Секция геомагнетизма и аэрономии

В 2019 г. Секцией геомагнетизма и аэрономии представлена модель ИЗМИРАН главного магнитного поля Земли и его векового хода на 01.01.2020. Модель была передана специальной группе подразделения V подразделения IAGA, отвечающего за геомагнитные модели (IAGA Working Group V-MOD: Geomagnetic Field Modeling <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/>) в качестве кандидата для включения в международную модель IGRF-13 на период 2020—2025 гг.

Представители Секции геомагнетизма и аэрономии приняли активное участие в мероприятиях 27-й Генеральной ассамблеи IUGG. В рамках программы Ассамблеи прошел ряд заседаний, на которых Россию в качестве национального делегата IAGA представлял чл.-корр. РАН А. А. Соловьев. В ходе заседаний представители пяти подразделений (Divisions) IAGA сделали доклады о результатах работы. Председатели междисциплинарных комиссий IAGA — Комиссии по образованию и популяризации науки (ICEO) и Комиссии по истории (IDC) — выступили с сообщениями о своей работе. Доклад Комиссии по истории сделал председатель комиссии А. А. Соловьев. На заседании рабочей группы V подразделения IAGA, отвечающей за геомагнитные наблюдения (IAGA Working Group V-OBS: Geomagnetic Observation <http://www.bgs.ac.uk/iaga/vobs/home.html>) А. А. Соловьев сделал сообщение о подготовке XIX IAGA Workshop, который планируется провести в октябре 2020 г. на базе геомагнитной обсерватории «Казань» Казанского (Приволжского) федерального университета (<https://kpfu.ru/geology-oil/iaga>).

15 июля 2019 г. прошла церемония награждения Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии — IAGA Award Ceremony. Премию IAGA для молодых ученых получили Томас Гоне (Великобритания), Депака Кумар-Каран (Индия) и наши соотечественники Ксения Тлатова (ГАС ГАО РАН) и Евгений Широков (ИПФ РАН).

14 июля 2019 г. состоялось заседание Междисциплинарной комиссии по истории (ICH). Председатель комиссии А. А. Соловьев представил доклад о деятельности в области сохранения и распространения исторических данных по наукам о Земле, которую поддерживает Комиссия. В частности, были освещены работы, проводимые в ГЦ РАН в этой области. Отдельно был отмечен проект по оцифровке и анализу данных первых советских спутниковых миссий, направленных на изучение магнитного поля Земли. Успешно оцифрованы и переведены в формат электронных таблиц данные спутников Космос-49 (1964 г.) и Космос-321 (1970 г.). Результаты предварительного анализа этих данных были представлены на специальной научной сессии, организованной комиссией и посвященной значительным достижениям в области геомагнетизма за 100-летнюю историю IUGG. А. А. Соловьев выступил с предложением инициировать новый проект по созданию тематического Атласа магнитного поля Земли. Предыдущая версия Атласа была издана ГЦ РАН совместно с Росгидрометом в 2012 г.

Сопредседатель комиссии Дж. Мэйби (США) выступил с сообщением о работе с историческими данными, проводимой в Национальном управлении океанических и атмосферных исследований США (NOAA). В заключении заседания прошли выборы

председателя и сопредседателя Комиссии. Открытым голосованием А. А. Соловьев и Дж. Мэйби сохранили должности председателя и сопредседателя Комиссии. Следующее заседание комиссии состоится в рамках предстоящей научной ассамблеи в Хайдарабаде в 2021 г.

Секция физических наук об океане

В рамках программы 27-й Генеральной ассамблеи IUGG заместитель председателя НГК РАН Е. Г. Морозов принял активное участие в процедуре выборов исполнительного комитета IAPSO. Будучи в должности «Предшественствующего президента» (Past President) Е. Г. Морозов, был назначен председателем номинационного комитета. Состоялись выборы нового президента, двух вице-президентов и 6 членов исполкома.

Важным направлением деятельности представителей Секции физических наук об океане является сотрудничество со странами БРИКС в области океанских и полярных наук и технологий. Вторая встреча Рабочей группы БРИКС по сотрудничеству в океанской и полярной зонах исследований состоялась 1—2 августа 2019 г. в Москве, в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Решение о проведении этой встречи в Москве было принято на первой встрече Рабочей группы в г. Бразилиа (Бразилия) в июле 2018 г. Во встрече Рабочей группы приняли участие 33 делегата из всех стран — членов БРИКС: Бразилии (4 участника), России (18 участников), Индии (2 участника), Китая (5 участников) и ЮАР (4 участника).

Секция вулканологии и химии недр Земли

В Секции вулканологии и химии недр Земли НГК РАН состоит 25 ученых и специалистов, в том числе: 4 академика РАН, 2 члена-корреспондента РАН, 12 докторов и 6 кандидатов наук. Председатель секции — д.г.-м.н. А. Ю. Озеров, заместитель председателя — к.г.н. Я. Д. Муравьев, ученые секретари — д.г.-м.н. Д. В. Коваленко и к.г.-м.н. Т. Г. Чурикова. Члены Секции представляют следующие институты РАН, работающие по тематике IAVCEI: ИВиС ДВО РАН, ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН, ГЕОХИ РАН, ИГГ УрО РАН, ИМГиГ ДВО РАН, ИЗК СО РАН, ДВГИ ДВО РАН, НИГТЦ ДВО РАН

Участие членов Секции IAVCEI в наиболее значимых мероприятиях под эгидой IUGG в 2019 (за исключением Генеральной ассамблеи IUGG).

1. Генеральная Ассамблея EGU 2019 — ежегодное междисциплинарная научная Ассамблея, объединяющая профессионалов в области наук о Земле, а также в области планетологии и смежных научных дисциплинах. В 2019 году в ней приняли участие 16 273 человек из 113 стран мира. С российской стороны в Ассамблее приняли участие 329 человек, преимущественно из институтов РАН. Из других стран принимали участие: США — 1068 человека, Китай — 1.194 человек, Европа — 10 558, из других стран — 3 124 человека. Максимальное количество специалистов прибыло из Германии — 2587 человек.

2. 10 российских ученых приняли участие в работе международной конференции им. Гольдшмидта (Goldschmidt Conference 2019), которая прошла 18—23 августа 2019 г. в Барселоне, Испания (<https://goldschmidt.info/2019/>). Это крупнейшая ежегодная международная конференция по геохимии и смежным темам, организованная Европейской ассоциацией геохимии и Геохимическим обществом.

3. 9—13 декабря 2019 г. В Сан-Франциско, США, состоялось ежегодное совещание Американского Геофизического Союза (AGU Fall meeting 2019), в котором приняли участие многие российские вулканологи и члены российской секции вулканологии и химии недр Земли НГК РАН. В AGU Fall meeting 2019 приняли участие более чем 20 000 ученых и специалистов из 113 стран мира. Российские ученые, в том числе вулканологи, представили более 300 устных и стендовых докладов.

20.5 Представители России в Международном геодезическом и геофизическом союзе и его ассоциациях в 2019—2022 гг.

Национальный геофизический комитет РАН:

Председатель:	ГВИШИАНИ Алексей Джерменович, академик
Заместитель председателя:	МОРОЗОВ Евгений Георгиевич
Заместитель председателя:	ЛЮБОВЦЕВА Юлия Сергеевна
Ученый секретарь:	КРАСНОПЕРОВ Роман Игоревич

Национальные представители России в ассоциациях IUGG

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

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

ЗАВЬЯЛОВ Петр Олегович, чл.-корр. РАН
председатель Секции физических наук об
океане
национальный представитель в IAPSO
Институт океанологии
им. П. П. Ширшова РАН
КОТЛЯКОВ Владимир Михайлович,
академик
председатель Секции криосферных наук
национальный представитель в IACS
Институт географии РАН

МОХОВ Игорь Иванович, академик
председатель Секции метеорологии и
атмосферных наук
национальный представитель в IAMAS
Институт физики атмосферы
им. А. М. Обухова РАН
ОЗЕРОВ Алексей Юрьевич, д.г.-м.н.
председатель Секции вулканологии и
химии недр Земли
национальный представитель в IAVCEI
Институт вулканологии и сейсмологии
ДВО РАН

САВИНЫХ Виктор Петрович, академик
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 использованных источников

Savinykh V. P., Kaftan V. I. National Report for the IAG of the IUGG 2015—2018. — М., 2019, doi: 10.2205/2019 IUGG-RU-IAG

Agayan S., Anciz E., Ayunov D. et al. National Report for the IAGA of the IUGG 2015—2018. — М., 2019, doi: 10.2205/2019 IUGG-RU-IAGA

Mokhov I. I., Krivolutsky A. A. Russian National Report: Meteorology and Atmospheric Sciences: 2015—2018: for the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal, Canada, July 8—18, 2019). — М., 2019, doi: 10.29003/m662.978-5-317-06182-1

Badulin S., Byshev V., Demidova T. et al. National Report for the IAPSO of the IUGG 2015—2018. — М., 2019, doi: 10.2205/2019IUGG-RU-IAPSO

Gliko A. O., Zavyalov, A. D. National Report for the IASPEI of the IUGG 2015—2018. — М., 2019, doi: 10.2205/2019IUGG-RU-IASPEI

Список основных научных публикаций за 2019 г.

Монографии

1. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьёв А.А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. – М.: Наука, 2019. 186 с.
2. Frappart F., Andersen O., Lebedev S., Ramillien G. Satellite Altimetry for Earth Sciences. (2019)., <https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-681-3>

Статьи в журналах

1. Агаян С.М., Ш. Р. Богоутдинов, Д. А. Камаев, М. Н. Добровольский. Стохастические тренды на основе нечеткой математики. Чебышевский сборник. 2019
2. Добровольский Н.Н., Добровольский М.Н., Добровольский Н.М. (2019) Об одном обобщенном эйлеровом произведении, задающем мероморфную функцию на всей комплексной плоскости. Чебышевский сборник. 20(2): 148-160, <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-2-156-168>
3. Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринова Т.А. (2019) Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований. Радиоактивные отходы. 1. 77-89
4. Хинзман Л., Бургесс Х., Канкаанпаа П., Павленко В., Янг Х. (2019) Расширение знаний и понимания арктики: стратегический план 2018–2023 гг. Арктический вестник. 72-79
5. Шевякова О.П., Лебедев С.А. (2019) Сезонная и межгодовая изменчивость уровня Краснодарского водохранилища по данным спутниковой альтиметрии. Вестник ТвГУ, Серия «География и геоэкология». 3. 73-85
6. Agayan S.M., Bogoutdinov S.R., Ivanchenko O.V., Kamaev D.A. (2019). Regression derivatives and their application for registration of a tsunami wave arrival by sea-level records. Computational Technologies, 24(1), 28-41 (in Russian), <http://www.ict.nsc.ru/jct/annotation/1899?l=eng>
7. Agayan, S. M., Soloviev, A. A., Bogoutdinov, S. R., & Nikolova, Y. I. (2019). Regression Derivatives and Their Application to the Study of Geomagnetic Jerks. Geomagnetism and Aeronomy, 59(3), 359–367., <https://doi.org/10.1134/S0016793219030022>
8. Agayan, S., Anciz, E., Ayunov, D., Babakhanov, I., Baishev, D., Belinskaia, A., et al. (2019, May 28). National Report for the IAGA of the IUGG 2015–2018. (A. A. Soloviev, R. I. Krasnoperov, & E. O. Kedrov, Eds.), Geoinformatics Research Papers. Geophysical Center RAS., <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAGA>
9. Aleshin, I. M., Ivanov, S. D., Kholodkov, K. I., Perederin, F. V., Osika, V. I., & Pavlov, E. I. (2019). Remote Real-Time Structure Health Monitoring with MINI-SMIK. Seismic Instruments, 55(5), 589–595., <https://doi.org/10.3103/S0747923919050013>
10. Astapov I.I., A.D. Gvishiani, V.G. Getmanov, A.N. Dmitrieva, M.N. Dobrovolsky, A.A. Kovylyayeva, R.V. Sidorov, A.A. Soloviev, V.E. Chinkin, I.I. Yashin (2019) Elimination of Diurnal, Annual, and Solar Variations in the Matrix Observations of the URAGAN Muon Hodoscope. Physics of Atomic Nuclei, 82(6): 8864-8868, <https://doi.org/10.1134/S1063778819660050>
11. Astapov I.I., E.Yu. Butirskiy, V.E. Chinkin, A.N. Dmitrieva, M.N. Dobrovolsky, V.G. Getmanov, A.D. Gvishiani, A.A. Kovylyayeva, R.V. Sidorov, A.A. Soloviev, I.I. Yashin

- (2019) Study of Cross-Correlation between Information Matrixes of Observation of the URAGAN Hodoscope and Dst Index. *Physics of Atomic Nuclei*, 82(6): 869-873, <https://doi.org/10.1134/S1063778819660062>
12. Baranov, S. V., Gvishiani, A. D., Narteau, C., & Shebalin, P. N. (2019). Epidemic type aftershock sequence exponential productivity. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(6), 1–8., <https://doi.org/10.2205/2019ES000695>
 13. Belakhovsky, V., Pilipenko, V., Engebretson, M., Sakharov, Y., & Selivanov, V. (2019). Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 9, A18., <https://doi.org/10.1051/swsc/2019015>
 14. Chinkin V. E., Astapov I. I., Gvishiani A. D., Getmanov V. G., Dmitrieva A. N., Dobrovolsky M. N., Kovylyaeva A. A., Sidorov R. V., Soloviev A. A., Yashin I. I. (2019) Method for the Identification of Heliospheric Anomalies Based on the Functions of the Characteristic Deviations for the Observation Matrices of the Muon Hodoscope *Physics of Atomic Nuclei*, <https://doi.org/10.1134/S106377881966013X>
 15. Dobrovolsky, M. N., Astapov, I. I., Barbashina, N. S., Gvishiani, A. D., Getmanov, V. G., Dmitrieva, A. N., et al. (2019). A Way of Detecting Local Muon-Flux Anisotropies with the Matrix-Form Data of the URAGAN Hodoscope. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 83(5), 647–649., <https://doi.org/10.3103/S1062873819050125>
 16. Dzeboev, B. A., Gvishiani, A. D., Belov, I. O., Agayan, S. M., Tatarinov, V. N., & Barykina, Y. V. (2019). Strong-Earthquake-Prone Areas Recognition Based on an Algorithm with a Single Pure Training Class: I. Altai–Sayan–Baikal Region, $M \geq 6.0$. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(4), 563–575., <https://doi.org/10.1134/S1069351319040050>
 17. Dzeboev, B. A., Soloviev, A. A., Dzeranov, B. V., Karapetyan, J. K., & Sergeeva, N. A. (2019). 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*, 19(6), 1–12., <https://doi.org/10.2205/2019ES000691>
 18. Getmanov V. G., Gvishiani A. D., Peregoudov D. V., Yashin I. I., Soloviev A. A., Dobrovolsky M. N., Sidorov R. V. (2019). Early diagnostics of geomagnetic storms based on observations of space monitoring systems. *Solar-Terrestrial Physics*, 5(1), 43–50., <https://doi.org/10.12737/stp-51201906>
 19. Getmanov, V. G., Astapov, I. I., Barbashina, N. S., Gvishiani, A. D., Dmitrieva, A. N., Dobrovolsky, M. N., et al. (2019). A method of two-dimensional filtering of modulated matrix data sequences. *Journal of Physics: Conference Series*, 1205, 12016., <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1205/1/012016>
 20. Getmanov, V. G., Gvishiani, A. D., & Sidorov, R. V. (2019). The combined processing of geomagnetic intensity vector projections and absolute magnitude measurements. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 8(2), 209–215. (исправлено - doi:10.5194/gi-8-209-2019-corrigendum), <https://doi.org/10.5194/gi-8-209-2019>
 21. Getmanov, V. G., Peregudov, D. M., Shutenko, V. V., & Yashin, I. I. (2019). Method for Estimating the Instrumental Function of the Uragan Muon Hodoscope Based on Monte-Carlo Simulations. *Measurement Techniques*, 62(2), 147–153., <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01599-w>
 22. Gvishiani, A. D., Kaftan, V. I., Krasnoperov, R. I., Tatarinov, V. N., & Vavilin, E. V. (2019). Geoinformatics and Systems Analysis in Geophysics and Geodynamics. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(1), 33–49., <https://doi.org/10.1134/S1069351319010038>

23. Gvishiani, A. D., Kedrov, E. O., Lyubovtseva, Y. S., & Savinova, D. (2019). The history of the research of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2009. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 11(1), 1–25, <https://doi.org/10.2205/2018NZ000358>
24. Gvishiani, A. D., Kedrov, E. O., Lyubovtseva, Y. S., & Savinova, D. (2019). The history of the research of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2012. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 11(1), 1–33, <https://doi.org/10.2205/2019NZ000359>
25. Ishkov, V., Sergeyeva, N., Zabarinskaya, L., Nisilevich, M., Kedrov, E., & Krylova, T. (2019). Data on Solar Activity for Science. Balkan, Black sea and Caspian sea Regional Network for Space Weather Studies., <https://doi.org/10.31401/SunGeo.2019.01.01>
26. Ivanov, S. D., & Aleshin, I. M. (2019). Development of Continuous Deformation Monitoring Systems Using Elements of Discrete-Event Simulation. *Seismic Instruments*, 55(2), 229–234., <https://doi.org/10.3103/S0747923919020087>
27. Kaban, M. K., Krasnoperov, R. I., Soloviev, A. A., & Nikolova, Y. I. (2019). The integrative density model of the crust and upper mantle of Eurasia: representation in GIS environment. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(6), 1–15., <https://doi.org/10.2205/2019ES000692>
28. Kaftan, V. I., & Rodkin, M. V. (2019). Earth's Surface Deformation on Mount Etna: GPS Measurements, Interpretation, Relationship to the Mode of Volcanism. *Journal of Volcanology and Seismology*, 13(1), 7–16., <https://doi.org/10.1134/S0742046319010032>
29. Kaftan, V. I., Gvishiani, A. D., Morozov, V. N., Tatarinov, V. N., et al. (2019). Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth's crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposal. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 16(1), 83–94.
30. Kaftan, V., & Mäkinen, J. (2019). Fennoscandian uplift study as an example of Russian-Finnish cooperation in Arctic geodesy (Advisory). *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(5), 1–8., <https://doi.org/10.2205/2019ES000675>
31. Kaftan, V., & Melnikov, A. (2019). Migration of Earth Surface Deformation as a Large Earthquake Trigger. In *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences* (pp. 71–78). Springer International Publishing., https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_8
32. Kamnev, E. N., Morozov, V. N., Tatarinov, V. N., Kaftan, V. I., et al. (2018). Geodynamic aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk Massif). *Eurasian Mining*, 11–14., <https://doi.org/10.17580/em.2018.02.03>
33. Khokhlov, A., Krasnoperov, R., Nikolov, B., Nikolova, J., Dobrovolsky, M., Petrov, V., et al. (2019). On the directions and structure of the short-term magnetic variations. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(2), 1–8., <https://doi.org/10.2205/2019ES000656>
34. Klyuev, P. V., & Lebedev, S. A. (2019). CLIMATIC VARIABILITY OF THE RYBINSK RESERVOIR ICE REGIME BASED ON THE NADIR-ORIENTED MICROWAVE RADIOMETER. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, (56), 145–156.
35. Kolesnikov, I. Y., & Tatarinov, V. N. (2019). Stability of geological medium under bending loads and concentrated energy impulses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 9, 149–159., <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-149-159>
36. Kossobokov, V. G., & Nekrasova, A. K. (2018). Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in New Zealand. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1), 1–23., <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2071-y>

37. Kostianoy A., Lebedev S., Soloviev D., Yalcin T. On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea. *Ecologica Montenegrina*. 2019, <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.7>
38. Kostianoy, A. G., Ginzburg, A. I., Lavrova, O. Y., Lebedev, S. A., Mityagina, M. I., Sheremet, N. A., & Soloviev, D. M. (2018). Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions. In *Remote Sensing of the Asian Seas* (pp. 505–521). Springer International Publishing., https://doi.org/10.1007/978-3-319-94067-0_28
39. Kozyreva, O. V., Pilipenko, V. A., Soloviev, A. A., & Engebretson, M. J. (2019). Virtual magnetograms -- a tool for the study of geomagnetic response to the solar wind/IMF driving. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(2), 1–15., <https://doi.org/10.2205/2019ES000654>
40. Kuverova, V. V., Adamson, S. O., Berlin, A. A., Bychkov, V. L., Dmitriev, A. V., Dyakov, Y. A., et al. (2019). Chemical physics of D and E layers of the ionosphere. *Advances in Space Research.*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.041>
41. Lebedev S., Kostianoy A. Interannual Variability of Water Exchange Anomalies Between the Northern, Middle and Southern Caspian Based on Satellite Altimetry Data. *Ecologica Montenegrina*. 2019, <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.10>
42. Lebedev S., Kostianoy A., Popov S. (2019) Satellite Altimetry of Sea Level and Ice Cover in the Barents Sea. *Ecologica Montenegrina*. 25. 26-35, <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.3>
43. Lebedev S., Sorokin A., Kluev P., Kravchenko P. (2019) Validation of Wind Speed Calculated on Satellite Altimetry Data by Measurements on Weather Stations Located Along the White Sea Coast. *Ecologica Montenegrina*. 25. 36-43., <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.4>
44. Lebedev, S. A. (2019). Investigation of background concentration of dissolved oil hydrocarbons in the Baltic Sea resulted from illegal discharges of oil containing waste from ships based on numerical simulation and remote sensing data. In 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC)., <https://doi.org/10.1109/BALTIC.2018.8634853>
45. Lebedev, S. A., & Kravchenko, P. N. (2019). The Complex Monitoring System of the Black Sea Marine Environment State. *Post-Soviet Issues*, 6(3), 269–278
46. Lebedev, S. A., Bogoutdinov, S. R., Nekhoroshev, S. A., & Kravchenko, P. N. (2019). Identification of the Baltic and White Seas ice cover based on satellite altimetry and radiometry. In 2018 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). IEEE., <https://doi.org/10.1109/BALTIC.2018.8634847>
47. Lushnikov A. A., Sh. R. Bogoutdinov (2019), An introduction to geophysical distributions, *Russ. J. Earth Sci.*, 19, ES6010, <https://doi.org/10.2205/2019ES000697>
48. Lyubovtseva, Y. S., Gvishiani, A. D., Kedrov, E. O., & Kovshova, A. E. (2019). The history of the research of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 11(1), 1–24, <https://doi.org/10.2205/2019NZ000360>
49. Manevich, A. I., Kolikov, K. S., & Egorova, E. A. (2019). Geoecological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(4), 1–8., <https://doi.org/10.2205/2019es000663>
50. Manevich, A. I., Tatarinov, V. N., & Kolikov, K. S. (2019). Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect. *Eurasian Mining*, 19–22., <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.04>
51. Morozov, V. N., Tatarinov, V. N., Manevich, A. I., & Losev, I. V. (2019). Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the

- disposal of radioactive waste. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(6), 1–11, <https://doi.org/10.2205/2019ES000687>
52. Morozov, V., Tatarinov, V., & Manevich, A. (2019). Modelling of stress-strain state in epicentral zone of strong earthquake. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 1, 187., <https://doi.org/10.17770/etr2019vol1.4119>
 53. Ohanyan M.V., Simonyan A.O., Karapetyan J.K., Soloviev A.A., Gvishiani A.D., Sidorov R.V. (2019) Features of occurrence of the geomagnetic field seasonal variations in the northern part of Armenia, 20(4), 40-51, <https://doi.org/10.21455/gr2019.4-3>
 54. Rostovtseva, Y. V., Rybkina, A. I., & Sokolova, A. Y. (2019). The Depositional Setting of the Konkian Sediments of the Taman Peninsula. *Moscow University Geology Bulletin*, 74(1), 50–55., <https://doi.org/10.3103/S0145875219010101>
 55. Savinykh, V. P., & Kaftan, V. I. (Eds.). (2019). National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018. *Geoinformatics Research Papers. Geophysical Center RAS.*, <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>
 56. Sergeyeva, N. A., Zabarinskaya, L. P., Ishkov, V. N., & Krylova, T. A. (2019). Solar Activity Observations at the World Data Center for Solar–Terrestrial Physics. *Cosmic Research*, 57(1), 10–13., <https://doi.org/10.1134/S0010952519010106>
 57. Sidorov, R. V., Astapov, I. I., Barbashina, N. S., Gvishiani, A. D., Getmanov, V. G., Dmitrieva, A. N., et al. (2019). Method for Eliminating Diurnal Variations in Muon Fluxes for Matrix Observations of the Uragan Hodoscope. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 83(5), 650–652., <https://doi.org/10.3103/S1062873819050332>
 58. Sidorov, R., Soloviev, A., Gvishiani, A., Getmanov, V., Manda, M., Petrukhin, A., et al. (2019). A combined analysis of geomagnetic data and cosmic ray secondaries for the September 2017 space weather event studies. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(4), 1–10., <https://doi.org/10.2205/2019ES000671>
 59. Sokolova, E. Y., Kozyreva, O. V., Pilipenko, V. A., Sakharov, Y. A., & Epishkin, D. V. (2019). Space-Weather-Driven Geomagnetic- and Telluric-Field Variability in Northwestern Russia in Correlation with Geoelectrical Structure and Currents Induced in Electric-Power Grids. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(11), 1639–1658., <https://doi.org/10.1134/S000143381911015X>
 60. Soloviev, A., Smirnov, A., Gvishiani, A., Karapetyan, J., & Simonyan, A. (2019). Quantification of Sq parameters in 2008 based on geomagnetic observatory data. *Advances in Space Research*, 64(11), 2305–2320., <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.038>
 61. Tatarinov, V. N., Aleshin, I. M., & Tatarinova, T. A. (2019). Experience of Space Geodesy Observations at Nuclear Facilities. *Seismic Instruments*, 55(6), 676–687., <https://doi.org/10.3103/S0747923919060094>
 62. Tatarinov, V. N., Morozov, V. N., & Batugin, A. S. (2019). An underground research laboratory: new opportunities in the study of the stress-strain state and dynamics of rock mass destruction. *Russian Journal of Earth Sciences*, 19(2), 1–13., <https://doi.org/10.2205/2019ES000659>
 63. Tatarinov, V. N., Morozov, V. N., Manevich, A. I., Tatarinova, T. A., et al. (2019). UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY: TO THE PROGRAM OF GEOMECHANICAL RESEARCH. *Radioactive Waste*, (2), 101–118.

64. Vorobev A.V., Sakharov Ya.A., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. (2019). Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents. *Solar-Terrestrial Physics*, 5(1), 35–42., <https://doi.org/10.12737/stp-51201905>
65. Ustinov, A. V., & Kaftan, V. I. (2019). Technology of Geodetic Monitoring of Hydropower Structures During Compensation Grouting. *Power Technology and Engineering*, 53(2), 129–134, <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01049-1>

Тезисы докладов

1. Агошков В.И., Фомин В.В., Лебедев С.А., Лезина Н.Р., Пармузин Е.И., Шелопут Т.О., Шутяев В.П., Захарова Н.Б., Информационно-вычислительная система ассимиляции данных "ИВМ РАН – Черное море" и ее интеграция с аппаратно-программным комплексом ЦКП "ИКИ-Мониторинг", Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», 2019 г.
2. Гвишиани А. Д. Большие Данные Арктики // Доклад на экспертном совещании Оборон данных в процессах освоения Арктической зоны: перспективы, стандарты, решения. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации, 24 октября 2019 г.
3. Гвишиани А. Д. Системный анализ в изучении природных экстремальных событий и их триггерных эффектов // Тезисы докладов V-ой Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». 4–7 июня 2019 г. ИДГ РАН. С. 49–50.
4. Гвишиани А. Д. Системный анализ в мониторинге стихийных бедствий // 59-е чтение им. В. И. Вернадского. Приглашенный доклад. ГЕОХИ РАН, 12 марта 2019 г.
5. Гвишиани А. Д., Арктика – полигон системного анализа Больших Данных // Доклад на IV Международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». 17 октября 2019 г.
6. Гвишиани А. Д., Системный анализ Больших Данных // Доклад на Международном Косыгинском форуме 16 октября 2019 г.
7. Гвишиани А. Д., Системный анализ в изучении Арктики // Доклад на V Международной Конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии, горной промышленности и экономики ITES&MP-2019». 15 октября 2019 г.
8. Дзедобоев Б. А., Гвишиани А. Д., Королькова А. А. Алгоритм с единственным классом обучения в распознавании сейсмоопасных зон // Тезисы докладов V-ой Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах». 4–7 июня 2019 г. ИДГ РАН. С. 63–64.
9. Лебедев С.А., Костяной А.Г., Идентификация положения кромки льда в Баренцевом море по данным спутниковой альтиметрии и межгодовая изменчивость ее положения, Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», 2019 г.
10. Лебедев С.А., Костяной А.Г., Оценка климатической изменчивости водообмена между частями Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии., Семнадцатая

Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», 2019 г.

11. Лебедев С.А., Кравченко П.Н., Ключев П.В., Сорокин А.С., Климатическая изменчивость скорости приводного ветра, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии, на акватории Белого моря, Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», 2019 г.
12. Маневич А. И. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Лосев И. В. Геодинамическое районирование на основе системного анализа горно-геологических данных для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов // Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 8–14 апреля 2019 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. С. 96.
13. Маневич А.И., Анализ скоростей деформаций земной коры с учетом масштабного эффекта, Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019 г.
14. Маневич А.И., Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Лосев И.В., Геодинамическое районирование на основе системного анализа горно-геологических данных для геоэкологически безопасной подземной изоляции РАО, XXVIII Всероссийская молодежная конференция "Строение литосферы и геодинамика", 2019 г.
15. Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Татаринова Т.А., Моделирование напряженно-деформированного состояния в районах сильных коровых землетрясений на примере Северо-Анатолийского разлома, Материалы IV Международная научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных геоинформационных технологий». Майкоп., 2019 г.
16. Николова Ю. В., Соловьев А. А. База данных по результатам оценок сейсмической опасности регионов Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 22-23 апреля 2019 г. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019. С. 62
17. Николова Ю.И., База данных по результатам оценок сейсмической опасности регионов Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье, Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019, 62 с.
18. Николова Ю.И., Study of the directional variations of the Earth's Magnetic Field according to data from observatories and variometers networks, Сборник тезисов докладов международной конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии и горной промышленности и экономики ITES&MP-2019», 2019 г.
19. Одинцова А.А., Рыбкина А.И., ROSA GIS project: database and web service, Сборник тезисов докладов международной конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии и горной промышленности и экономики ITES&MP-2019», 2019.
20. Самохина О.О., Рыбкина А.И., Пресняков С.В., A digital demonstration complex with a spherical screen under ORBUS 2.0 software: new projection technologies for earth sciences

popularization, Сборник тезисов докладов международной конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии и горной промышленности и экономики ITES&MP-2019», 2019 г.

21. Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Нисилевич М.В., Geomagnetic data in the world data center for solar-terrestrial Physics, Сборник тезисов докладов международной конференции «Информационные технологии для наук о Земле и приложения для геологии и горной промышленности и экономики ITES&MP-2019», 2019 г.
22. Сергеева Н.А., Ишков В.Н., Забаринская Л.П., Базы данных Мировых центров данных для исследования воздействия солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство, Тезисы докладов на четырнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 2019, 299 с.
23. Соловьев А. А. Математические методы обработки потоков геомагнитных измерений наземного и спутникового базирования для расширения знаний о магнитном поле Земли (приглашенный) // Научный совет по проблемам геохимии ОНЗ РАН (19 сентября 2019 г.)
24. Соловьев А. А. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье (пленарный) // VII Международная конференция «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии» (РСО-А, г. Владикавказ, 30 сентября – 2 октября 2019 г.)
25. Чинкин В. Е., Соловьев А. А. Оценка масштабов конвективных вихрей в ионосфере в плоском приближении // Десятая Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике» (29-31 января 2019 г., г. Москва). Труды Десятой Всероссийской конференции. В 3-х частях. Москва МГТУ им. Баумана Н. Э., 2019. С. 60-63
26. Чинкин В.Е., Оценка центров и масштабов конвективных вихрей в ионосфере, Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа Конференции. 2019 г.
27. Чинкин В.Е., Соловьев А.А., Обработка сигналов магнитных станций с целью оценки параметров вихревых возмущений магнитного поля земли в плоском приближении, Физическое образование в вузах, 2019, 303-305 с.
28. Dzeboev B., Gvishiani A., Agayan S., Belov I., Krasnoperov R. Variational EPA method for identification of earthquake-prone areas // 27th IUGG General Assembly. July 8–18, 2019.
29. Dzeboev B., Gvishiani A., Soloviev A., Sergeeva N., Kedrov E., Zabarinskaya L., Krylova T., Smirnov A., Nisilevich M., Kuyumcu A., Obraztsov The A. World Data Centers in Moscow give insight on the further use of historical geophysical data sets // AGU Fall Meeting. 9 – 13 December 2019.
<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/536220>
30. Dzeboev B., Gvishiani A., Vavilin E., Krasnoperov R. Algorithmic system FCAZ and earthquake-prone areas // 27th IUGG General Assembly. July 8–18, 2019.
31. Dzeboev B., Gvishiani A., Vavilin E., Krasnoperov R., Algorithmic system FCAZ and earthquake-prone areas, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019 г.
32. Dzeboev B., Gvishiani A., Vavilin E., Krasnoperov R., Variational EPA method for identification of earthquake-prone area, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019 г.

33. Dzeboev B., Sergeeva N., Krylova T., Zabarinskaya L., Nisilevich M., Kuyumcu A., Obraztsov A., Krasnoperov R., Long time-series of geomagnetic data in the World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019 г.
34. Getmanov V., Astapov I., Chinkin V., Dmitrieva A., Dobrovolsky M., Gvishiani A., Kovylyayeva A., Petrukhin A., Sidorov R., Soloviev A., Yashin I., Revealing Lagged Correlation between the Muon Flux Intensity Measurements and the Dst Index, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019 г.
35. Getmanov V., Chinkin V., Gvishiani A., Krasnoperov R., Soloviev A., Filtering the Systematic Errors in Estimating the Geomagnetic Field Intensity Vector Projections for the INTERMAGNET Observatories, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019 г.
36. Gvishiani A. Magnetic observations perspectives in the Northern Eurasian region // Institute of Earthquake Forecasting China Earthquake Administration, CEA. September 20, Beijing, China.
37. Gvishiani A. Systems Analysis as Next-generation Mathematical Platform For Data-driven Science // CODATA 2019: Towards next-generation data-driven science: policies, practices and platforms. Beijing, China. 19–20 September 2019.
38. Gvishiani A., Agayan S., Manevich A. Systems analysis – a part of mathematics of planet Earth // 27th IUGG General Assembly. July 8–18, 2019.
39. Krasnoperov R., Khokhlov A., Nikolova J., Dobrovolsky M., Kudin D., Nikolov B., Analysis of Directions and Structure of Magnetic Variations from Geomagnetic Observatory and Station Measurements, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
40. Lebedev S., Bogoutdinov Sh., Kluev P., Kravchenko P., Identification of the Rybinsk Reservoir Ice Cover and Investigation of its Interannual Variability Based on Satellite Altimetry and Radiometry, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
41. Lebedev S., Bogoutdinov Sh., Kravchenko P., Kluev P., Identification of the White Seas Ice Cover Based on Satellite Altimetry and Radiometry, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
42. Lebedev S., Kostianoy A., Kravchenko P., Kostianaia E., Interannual Variability of Water Exchange Between Parts of the Caspian Sea Based on Satellite Altimetry Data, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
43. Lebedev S., Kostianoy A., Soloviev D., Kostianaia E., Bedanokov M., Investigation of Relationship Between River Runoff and River Plume in the Black Sea Coastal Zone Based on Remote Sensing Data, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
44. Lukianova R., Peregudov D., Dzeboev B., Soloviev A., Early soviet satellite magnetic field measurements and their application for the global geomagnetic field modeling, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
45. Lukianova R., Swarm field-aligned currents during the severe magnetic storms of March 2015 and September 2017, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.

46. Odintsova A., Rybkina A., Samokhina O., Krasnoperov R., ROSA GIS Project as a Tool for Evaluation of Petroleum Industry Establishment, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
47. Soloviev A. Geomagnetic field dynamics in the Arctic region: sources, observations and models (plenary) // Arctic Science Summit Week 2019, 22-30 May 2019, Arkhangelsk, Russia, 2019
48. Soloviev A., Kedrov E., Nisilevich M., Sergeyeva N., Zabarinskaya L., Earth Science Database Project for Promoting Data Use and Citation, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
49. Soloviev A., Krasnoperov R., Grudnev A., Khokhlov A., Kudin D., Sidorov R., Vavilin E., Recent Achievements in Development of the Magnetic Observatory Network in Russia and Cross-Border Cooperation, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.
50. Soloviev A., Smirnov A., Bogoutdinov S., Agayan S., Mathematical Tools for Estimating Geomagnetic Field Dynamics Based on Extensive Observatory Data Processing, XXVII IUGG General Assembly. July 8–18, 2019. Montreal, Canada. Abstract Proceedings, 2019.

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

Патенты

1. Патент на полезную модель №192582
«Цифровое демонстрационное устройство»
Авторы: А. Д. Гвишиани, А. И. Рыбкина, О. О. Самохина, А. Г. Пешков
Дата гос. Регистрации в Реестре российских полезных моделей: 23 сентября 2019 г.

Программы для ЭВМ

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614385
«ORBUS touch 1.0»
Авторы: С. В. Пресняков, О. О. Самохина, А. И. Рыбкина
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25 апреля 2019 г.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019614386
«ORBUS 2.0»
Авторы: С. В. Пресняков, О. О. Самохина, А. И. Рыбкина
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25 апреля 2019 г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617367
«Программа для расчета SME-индекса»
Авторы: Р. И. Краснопёров, С. В. Пресняков, М. Н. Добровольский
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 06 июня 2019 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617368
«Программа расчета распределения скоростей деформаций земной коры SEtools 1.0»
Авторы: А. И. Маневич, И. В. Лосев
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 06 июня 2019 г.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619515

«Сотрудник_ГЦ 2.0»

Авторы: Э. О. Кедров, А. А. Одинцова, А. И. Рыбкина

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 18 июля 2019 г.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619516
«Веб-ориентированная геоинформационная система многокритериальной оценки сейсмической опасности»

Авторы: Ю. И. Николова, А. А. Соловьев, Р. И. Красноперов, Б. А. Дзедобоев

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 18 июля 2019 г.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019619517
«Toolbox «Многокритериальная оценка сейсмической опасности» для работы в среде ArcGIS»

Авторы: А. А. Соловьев, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, В. Г. Кособоков, А. К.

Некрасова, А. И. Горшков, Ю. И. Николова, Б. А. Дзедобоев, Б. П. Николов

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 18 июля 2019 г.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019660986
«Программа для определения динамических параметров вихревых токовых структур в полярной ионосфере по наземным геомагнитным данным»

Авторы: В. Е. Чинкин, А. А. Соловьев

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 16 августа 2019 г.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019661165
«Барьер-3»

Авторы: Б. А. Дзедобоев, А. Д. Гвишиани, И. О. Белов, С. М. Агаян

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 21 августа 2019 г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019661177
«Программа расчета аппаратных функций системы стриммерных детекторов на основе метода статистических испытаний»

Авторы: Д. В. Перегудов, В. Г. Гетманов

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 21 августа 2019 г.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662925
«FL_SLAM_2D»

Авторы: В. Г. Гетманов, Р. В. Сидоров

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 07 октября 2019 г.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662928
«Программа вычисления функции аномальности для минутных матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН»

Авторы: В. Г. Гетманов, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, М. Н. Добровольский, Р. В. Сидоров, В. Е. Чинкин

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 07 октября 2019 г.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662920
«Программа вычисления функции аномальности для часовых матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН »

Авторы: В. Г. Гетманов, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, М. Н. Добровольский, Р. В. Сидоров, В. Е. Чинкин

Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 07 октября 2019 г.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662991
«Программа вычисления взаимно-корреляционных связей функции аномальности матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН и Dst-индекса »

Авторы: В. Г. Гетманов, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, М. Н. Добровольский, Р. В. Сидоров, В. Е. Чинкин
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 08 октября 2019 г.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662990
«Программа полосовой фильтрации матричных наблюдений мюонного годоскопа УРАГАН»

Авторы: В. Г. Гетманов, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, М. Н. Добровольский, Р. В. Сидоров, В. Е. Чинкин
Дата гос. Регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 08 октября 2019 г.

Базы данных

17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019620673
«База сферических визуализаций: Магнитное поле Земли»
Авторы: Ю. И. Николова, А. А. Соловьев
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 25 апреля 2019 г.

18. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019620674
«База сферических визуализаций: движения палеотектонических реконструкций за период 1000–520 Ма»
Авторы: А. А. Одинцова, Ю. И. Николова
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 25 апреля 2019 г.

19. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621055
«База данных геомагнитных наблюдений по обсерваториям и станциям России и сопредельных государств»
Авторы: Р. И. Краснощёров, Д. В. Кудин, М. Н. Добровольский
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 19 июня 2019 г.

20. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621311
«Геомагнетизм – минутные значения элементов магнитного поля Земли»
Авторы: Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская, М. В. Нисилевич, Д. В. Кудин
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 17 июля 2019 г.

21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621466
«ГИС-ориентированная база данных для многокритериальной оценки сейсмической опасности»
Авторы: А. А. Соловьев, А. А. Соловьев, А. Д. Гвишиани, В. Г. Кособоков, А. К. Некрасова, А. И. Горшков, Ю. И. Николова, Б. А. Дзедобоев, Б. П. Николов
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 16 августа 2019 г.

22. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621722
«База сферических визуализаций: ROSA 1.0»
Авторы: А. А. Одинцова, Ю. И. Николова
Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных: 08 октября 2019 г.