

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геофизический центр
Российской академии наук

О Т Ч Е Т

О выполнении государственного задания
на 2017 год

Москва
2018

GEOPHYSICAL CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS
FOR 2017

Results of the State Task

Moscow

2018



The present edition contains information about the work of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS) in 2017. The full list of GC RAS employees' publications in 2017 is also included. The edition is intended for specialists in the field of geophysics and related geosciences.

Editors in chief:

A. A. Soloviev, Corr. Member of RAS, Dr., Deputy Director of Research

T. A. Tatarinova, Scientific Secretary of GC RAS

Editorial board:

A. D. Gvishiani, Academician RAS

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

D. D. Savinova

Approved for publishing on 25.09.2018

Layout Production:

E. O. Kedrov, D. D. Savinova

Soloviev, A. A., T. A. Tatarinova, Eds. (2017), Report of Geophysical Center of RAS for 2017: Results of the State Task, *Geoinf. Res. Papers*, Vol. 5, BS6002, <https://doi.org/10.2205/2018BS047>

<https://doi.org/10.2205/2018BS047>

<http://ebooks.wdcb.ru/2018/2018BS047/2018BS047.pdf>



В настоящем издании содержатся сведения о выполнении государственного задания на 2017 год Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Геофизический центр Российской академии наук, а также список публикаций и РИД.

Ответственные редакторы:

А. А. Соловьев, чл.-корр. РАН, заместитель директора по науке ГЦ РАН

Т. А. Татарина, ученый секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

А. Д. Гвишиани, академик РАН, директор ГЦ РАН

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Д. Д. Савинова

Утверждено к печати 25.09.2018 г., тираж 10 экз.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров, Д. Д. Савинова

Соловьев, А. А., Т. А. Татарина, Ред. (2018), Отчет о выполнении государственного задания на 2017 год., Исследования по геоинформатике, BS6002, <https://doi.org/10.2205/2017BS047>

Отчет о выполнении государственного задания на 2017 год

М.: ГЦ РАН, 2018, 166 с., 76 ил.

<https://doi.org/10.2205/2018BS047>

<http://ebooks.wdcb.ru/2018/2018BS047/2018BS047.pdf>

СОДЕРЖАНИЕ

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2017 году	7
2. Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных	13
3. Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов.....	26
4. Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях.....	35
5. Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли	41
6. Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России (этап 2017 года)	46
7. Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию (этап 2017 года).....	51
8. Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе	57
9. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием данных геомагнитного спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем (этап 2017 года).....	63
10. Новые математические методы в геофизических исследованиях	69
11. Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий (этап 2017 года)	77
12. Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли (этап 2017 года).....	82
13. Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений (этап 2017 года)	92
14. Грант РФФИ №15-05-07436 "Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа"	99

15. Грант РФФИ №16-35-00603 мол_а "Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений"	103
16. РФФИ 17-05-01085 а "Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса".....	109
17. Грант Президента РФ МК-4555.2016.5 для молодых ученых "Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа".....	115
18. Проект РНФ №15-17-30020 "Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье".....	122
19. Проект РНФ №16-17-00121 "Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы"	134
20. Проект РНФ № 17-17-01215 "Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа"	141
21. Международная деятельность ГЦ РАН в 2017 году	154
Список научных публикаций и свидетельств о регистрации результатов интеллектуальной деятельности за 2017 г.	158

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2017 году

Научная деятельность подразделений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН) в 2017 году была сосредоточена на выполнении государственного задания ГЦ РАН №007-00119-16-02, утвержденного 11.11.2016 года, которое включало в себя работы по четырем темам НИР и 8-и проектам Программ Президиума и ОНЗ РАН. Кроме этого выполнялись работы по четырем проектам РНФ, трем грантам РФФИ, одному гранту Президента РФ.

Эти работы проводились по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ "Рациональное природопользование", разделам перечня критических технологий РФ:

- 19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения;

- 21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

- 20. Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи;

и направлениям Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.:

- Раздел I. "Математические науки":

Подраздел 3. "Математическое моделирование".

- Раздел IX. "Науки о Земле":

Подраздел 135. "Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов";

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 рамках фундаментальных исследований лаборатории ГЦ РАН выполняли научные исследования по следующим темам НИР:

1. "Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных". Руководители: в.н.с., к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева; зав. лаб., к.ф.-м.н. Э. О. Кедров; зав. сектором, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина (№ АААА-А17-117012610076-8; 0145-2016-0005).

2. "Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов". Руководитель: зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринев (№ АААА-А17-117012610082-9; 0145-2016-0004).

3. "Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников (№ 115012960029; 0145-2014-0015).

4. "Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова (№ 115021010261; 0145-2014-0014).

А также по проектам Программ Президиума и Отделения наук о Земле РАН:

1. "Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России (этап 2017 года)" программы Президиума РАН I.4П "Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (№ АААА-А17-117012610079-9; 0145-2016-0006).

2. "Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за XX век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию (этап 2017 года)" программы Президиума РАН I.28П "Исследование исторического процесса развития науки и техники в России: место в мировом научном сообществе, социальные и структурные трансформации". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (№ АААА-А17-117012610085-0; 0145-2016-0011).

3. "Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе (этап 2017 года)" программы Президиума РАН I.32П "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (№ АААА-А17-117012610084-3; 0145-2016-0013).

4. "Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием данных геомагнитного спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем (этап 2017 года)" программы Президиума РАН I.33П "Фундаментальные проблемы математического моделирования". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (№ АААА-А17-117012610083-6; 0145-2016-0012).

5. "Новые математические методы моделирования геофизических процессов (этап 2017 года)" программы Президиума РАН I.33П "Фундаментальные проблемы математического моделирования". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (№ АААА-А17-117012610078-2; 0145-2016-0008).

6. "Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий (этап 2017 года)" программы ОНЗ РАН III.8 "Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В. Г. Гетманов (№ АААА-А17-117012610077-5; 0145-2016-0007).

7. "Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли (этап 2017 года)" программы ОНЗ РАН III.8 "Интеллектуальный анализ геофизических данных,

геоинформатика и математическая геофизика". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В. Г. Гетманов (№ АААА-А17-117012610080-5; 0145-2016-0009).

8. "Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений (этап 2017 года)" программы ОНЗ РАН III.8 "Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В. Г. Гетманов (№ АААА-А17-117012610081-2; 0145-2016-0010).

Перечень научных исследований за счет средств от приносящей доход деятельности в 2017 году включал в себя:

1. Грант РФФИ №15-05-07436 "Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа". Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.

2. Грант РФФИ №16-35-00603 мол_а "Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений". Руководитель: зав. лаб., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобев.

3. Грант РФФИ №17-05-01085 "Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса" Руководитель: зав. лаб., к.г.-м.н. А. И. Рыбкина.

4. Грант Президента РФ для молодых ученых МК-4555.2016.5 "Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа". Руководитель: зав. лаб., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобев.

5. Проект РНФ №15-17-30020 "Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье". Руководитель: г.н.с., чл.-корр. РАН Ал. А. Соловьев.

6. Проект РНФ №16-17-00121 "Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы". Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В. А. Пилипенко.

7. Проект РНФ №17-77-20034 "Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации". Руководитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов.

8. Проект РНФ №17-17-01215 "Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа". Руководитель: зам. директора по науке, чл.-корр. РАН Ан. А. Соловьев.

Важнейшими результатами научных исследований 2017 года, утвержденными на заседании Ученого совета ГЦ РАН №46 от 08.12.2017г., стали следующие:

1.1 Алгоритм последовательного распознавания мест возможного возникновения землетрясений

Директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани; в.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев;
г.н.с., д.ф.-м.н. С. М. Агаян; м.н.с. И. О. Белов

Создан принципиально новый алгоритм системного анализа и распознавания образов SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning), позволяющий осуществлять распознавание мест возможного возникновения землетрясений для нескольких магнитудных порогов в одном и том же сейсмоопасном регионе. Это удалось сделать за счет итерационного сужения множества объектов распознавания, путем последовательного неоднократного применения алгоритма кластеризации DPS и расширительного алгоритма E²ХТ.

Первый из них строит расстояния между объектами на базе нечетких множеств. Это позволяет провести нетривиальное выделение сгущений эпицентров землетрясений. Второй алгоритм E²ХТ осуществляет однозначное и воспроизводимое отображение построенных кластеров нулевой меры в 2D зоны на реальной поверхности Земли. Последние являются искомыми высокосейсмичными зонами.

Зоны возможного возникновения землетрясений для некоторого магнитудного порога распознаются внутри зон уже распознанных как опасные для меньшей пороговой магнитуды на базе сейсмологических параметров. Воспроизводимость исследования обеспечивается тем, что на всех этапах алгоритм распознавания остается неизменным. Алгоритм успешно апробирован в регионе Прибайкалье – Забайкалье.

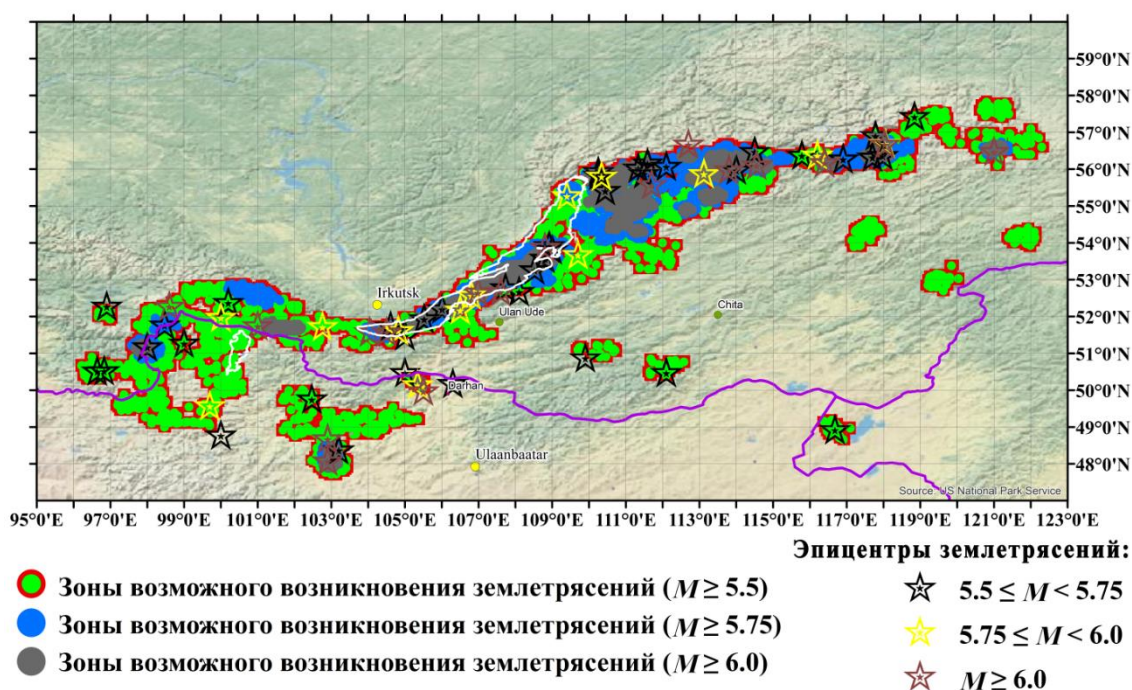


Рисунок 1.1 – Зоны возможного возникновения землетрясений в регионе Прибайкалье – Забайкалье

Данный результат был назван одним из основных в докладе Президента РАН, академика Александра Михайловича Сергеева "О состоянии фундаментальных наук в Российской Федерации и важнейших научных достижениях, полученных российскими учеными в 2017 году" Общему собранию членов Российской академии наук.

1.2. Распознавание всплесков векового ускорения главного магнитного поля на границе ядро – мантия по данным магнитных обсерваторий

Зам. дир. по науке, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев;
в.н.с., к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов;
г.н.с., д.ф.-м.н. С. М. Агаян

До настоящего времени изучение вековых вариаций главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) на границе ядро – мантия было возможно только с использованием моделей, построенных по высокоточным спутниковым измерениям начиная с 2000 г. В частности, были обнаружены т.н. всплески векового ускорения (ВУ) ГМПЗ 2006, 2009 и 2012 гг. Разработанный метод позволил впервые проводить аналогичный анализ с использованием более продолжительных данных магнитных обсерваторий. Помимо ранее обнаруженных всплесков были детектированы новые 1996, 1999, 2002 и 2014 гг. Полученные результаты указывают на существование 6-летней квазипериодичности всплесков ВУ одинаковой полярности, что подтверждает предположение о волновой природе процесса. Также подтверждена взаимосвязь обнаруженных всплесков с геомагнитными джерками. Всплески и джерки являются прямым проявлением динамических процессов в жидком ядре.

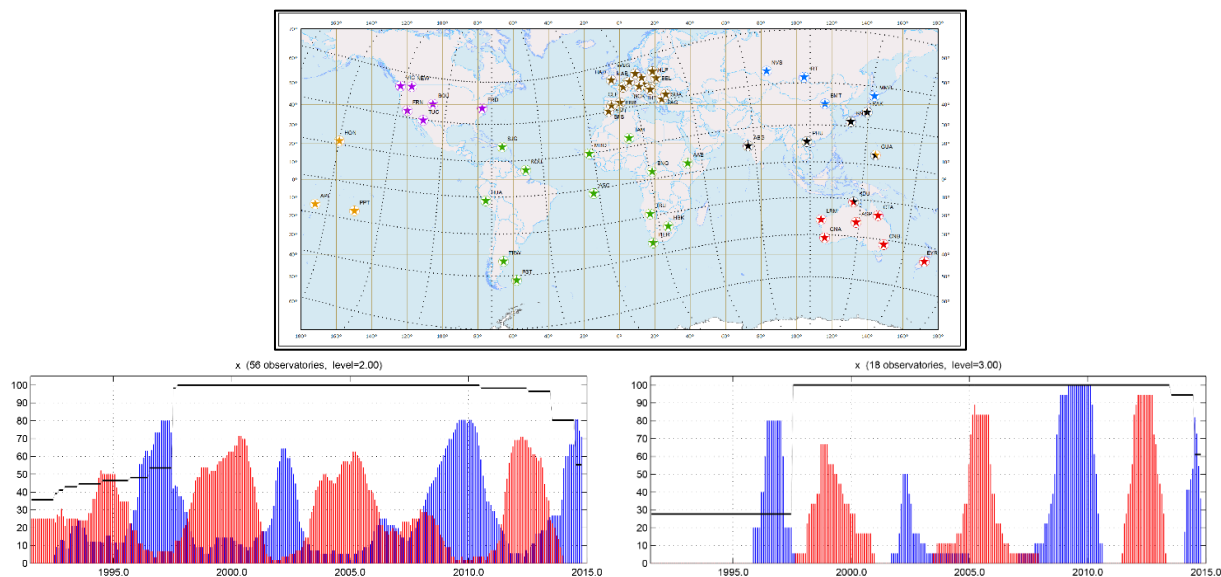


Рисунок 1.2 – Вверху: карта обсерваторий, данные которых использовались для распознавания глобальных и региональных всплесков ВУ. Снизу: характеристические функции (ХФ) для записи $d^2X/\text{год}^2$ по данным всего множества обсерваторий при пороге $A=2 \text{ нТл/год}^2$ (слева) и европейских обсерваторий при пороге $A=3 \text{ нТл/год}^2$ (справа). Синие и красные столбики отражают ежемесячный процент обсерваторий, для которых $d^2B/dt^2 < -A$ (отрицательные всплески ВУ) и $d^2B/dt^2 > A$ (положительные всплески ВУ) соответственно. Пики ХФ свидетельствуют о всплесках ВУ в районе 1996, 1999, 2002, 2006, 2009, 2012 и 2014 гг.

1.3. Реконструкция скорости солнечного ветра по высокоширотным геомагнитным данным

г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

На основе анализа геомагнитной активности, обусловленной магнитосферными суббурями, реконструированы среднегодовые и среднемесячные значения скорости солнечного ветра (СВ) за столетний период. На основе данных, сгруппированных по сезонам, получено соотношение между появлением высокоскоростных потоков СВ и широтным положением корональных дыр (КД) на солнечном диске. Показано, что пику современного векового максимума солнечной активности в 1950-х непосредственно предшествовал пик полярных КД, а завершению векового максимума – пик низкоширотных КД. Полярные КД связаны с усилением полоидального магнитного поля Солнца, а увеличение числа солнечных пятен – с усилением тороидального поля в 22-летнем магнитном цикле Солнца. Результат является экспериментальным подтверждением теории солнечного динамо.

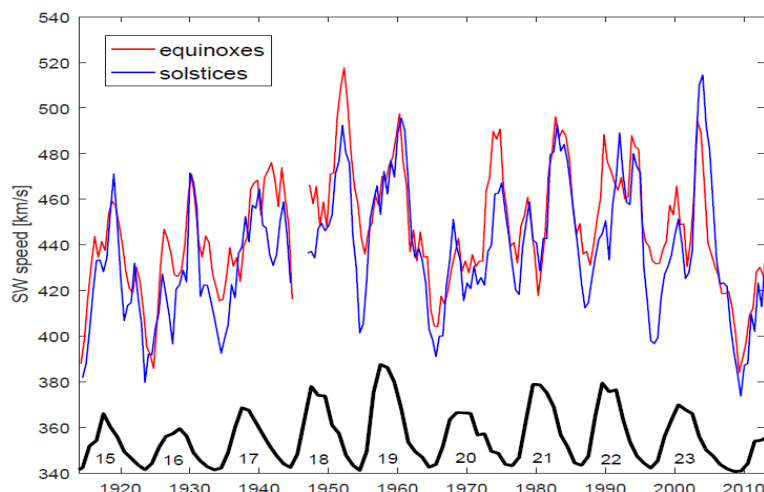


Рисунок 1.3 – Среднемесячные значения скорости солнечного ветра, реконструированные по геомагнитной активности для равноденствий (красный) и солнцестояний (синий), и число солнечных пятен (черный и номера солнечных циклов).

2. Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0005

Номер госрегистрации: AAA-A17-117012610076-8

Руководители: в.н.с., к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева;

зав. лаб., к.ф.-м.н. Э. О. Кедров;

зав. лаб., к.г.-м.н. А. И. Рыбкина

НИР направлена на усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных и информации, находящихся в Мировых центрах данных, базе электронных публикаций и базе данных спутниковой альтиметрии, с целью информационного обеспечения научных исследований в области наук о Земле.

2.1. Увеличение информационных ресурсов, применение новых информационных технологий и совершенствование управления данными в Мировых центрах данных по СЗФ и ФТЗ

Мировые центры данных, являясь регулярными членами Мировой системы данных (МСД) и следуя политике МСД в отношении данных и положениям "Стратегического плана 2014–2018" [<http://www.icsu-wds.org/organization/strategic-plan>] МСД, решают задачи увеличения объемов качественных информационных ресурсов, долговременного хранения данных и предоставления данных международному научному сообществу.

В 2017 г. продолжалось выполнение **проекта "Сохранение старых данных"** – преобразование данных из аналоговой формы в электронный вид, с целью увеличения информационных ресурсов в электронном виде, обеспечения свободного on-line доступа к ним и более эффективного использования. Преобразование осуществляется путем сканирования бумажных документов и создания документов в формате PDF. По дисциплине "Ионосферные явления" переведены в электронный вид данные пяти ионосферных станций (46 500 документов) – результаты вертикального зондирования ионосферы (таблицы и графики часовых значений параметров ионосферы), измерения поглощения, ионосферных ветров, атмосферных радишумов, параметров профилей электронной плотности ионосферы. Все электронные документы прошли процедуры проверки и редактирования. Для данных в PDF формате составлены каталог и метаданные, сформировано хранилище данных. Данные опубликованы на веб-сайте МЦД по СЗФ в свободном доступе http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/.

Проведена работа по переводу в электронный вид (PDF формат) исторического издания "Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г." под редакцией Н. В. Кондорской и Н. В. Шебалина. Созданная электронная версия каталога размещена на веб-сайте МЦД по ФТЗ http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_strong_USSR.ru.html.

Сбор, анализ, хранение и распространение данных являются основными функциями МЦД. В 2017 г. дополнены массивы среднечасовых и минутных значений компонент геомагнитного поля ряда обсерваторий вновь поступившими данными. Получены определения *K*-индекса обсерватории "Воейково" в виде бумажных документов, которые переведены в электронные документы в формате PDF и в текстовые файлы в кодах ASCII. Дополнены массивы значений *K*-индекса обсерваторий "Новосибирск", "Магадан" и "Москва". Данные размещены на веб-сайте Центра. Дополнены ряды всех индексов геомагнитной активности.

Коллекция из трех каталогов магнитных пульсаций дополнена новым каталогом, полученным из Геофизической обсерватории "Борок": "Каталог геомагнитных пульсаций типа Pc1 по данным наблюдений антарктической обсерватории "Мирный", 1979–1989 гг.", автор Э. Т. Матвеева. Проведены анализ, проверка качества данных и формирование всех четырех каталогов в едином формате. Составлены новые описания данных и форматов на русском и английском языках. Данные опубликованы на веб-сайте.

Получены данные ионосферной станции "Москва" (ИЗМИРАН) за период XI.2016–X.2017 гг. Проведен анализ, переформатирование, сформированы годовые файлы для каждого из 18 ионосферных параметров. Данные за период 2008–2017 гг. находятся в свободном доступе на веб-сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/.

Дополнен Каталог солнечных вспышечных событий XXIV цикла солнечной активности данными за 2016–2017 гг. Проведена коррекция каталога. Дополнены разделы "Солнечные пятна", "Секторная структура межпланетного магнитного поля", "Поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см". На веб-сайте МЦД по СЗФ регулярно представляются недельные прогнозы солнечной активности из ИЗМИРАН.

Полученные из ГС РАН "Сейсмологический каталог" и "Сейсмологический бюллетень" (ежедекадные) за период XII.2015–II.2017 гг. после проверки и переформатирования с использованием специальных программ опубликованы на веб-сайте http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_OBN.ru.html
http://www.wdcb.ru/sep/seismology/bul_OBN.ru.html

Продолжалось формирование каталогов землетрясений сейсмических регионов Северной Евразии в виде текстовых файлов в кодах ASCII на основании данных, опубликованных в ежегодниках "Землетрясения в СССР" и "Землетрясения Северной Евразии". Дополнены данными за 2010 г. каталоги регионов "Крым", "Карпаты", "Алтай и Саяны" и "Прибайкалье и Забайкалье", сформирован каталог региона "Приморье" 1962–2010 гг. и дополнен данными за 2008–2010 гг. каталог региона "Якутия". В общей сложности около 20 000 событий.

Расширена база геопространственных данных ГИС. Подготовлены и оформлены цифровые тематические карты в среде ГИС на основе дополненных каталогов землетрясений для регионов "Алтай и Саяны", "Прибайкалье и Забайкалье" и вновь сформированных каталогов для сейсмических регионов "Приморье" и "Якутия". Подготовленные слои добавлены в картографический веб-сервис "Геофизика" (<http://gis.gcras.ru:6080/arcgis/rest/services/gisr/geophysics/MapServer>).

1. Проведена инвентаризация данных по разделу "Космические лучи". На веб-сайте опубликованы данные по наземным возрастаниям GLE, данные наблюдений

Мировой сети нейтронных мониторов за период с 1953 г. по настоящий момент, данные некоторых мюонных телескопов. Составлен список станций космических лучей, подготовлен каталог наличия данных. Реорганизованы веб-страницы раздела: обращение к каждому виду данных организовано по прямым ссылкам, для каждого вида данных создана отдельная интернет-страница, подготовлены и размещены на страницах новые описания данных и форматов (рис. 2.1)

http://www.wdcb.ru/stp/cosmic_rays/cosmic_rays.ru.html.



Рисунок 2.1 – Главная страница раздела "Космические лучи"

В 2017 г. проведен комплекс работ по усовершенствованию реляционной MySQL базы геомагнитных данных и веб-формы доступа к ней, позволяющей удаленному пользователю выбирать из БД данные по ряду условий. Изменен пользовательский картографический интерфейс и внешний интерфейс формы запроса данных: Переработана внутренняя оболочка веб-формы, изменены программные модули и структура таблиц для повышения скорости выборки из БД. Дополнена БД, сформированная в 2016 г. Веб-форма доступна для работы <http://www.wdcb.ru/stp/geomagnetism/rantest/www/newmain.php>

2.2. Развитие направления по созданию современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI "База данных по наукам о Земле". Разработка приложения, обеспечивающего интерфейс для получения конечных XML-файлов

С 2014 г. в ГЦ РАН выполняется проект – "База данных по наукам о Земле" – ESDB ("Earth Science DataBase") – создание современной системы регистрации и публикации геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI, зарегистрированного в системе CrossRef, предоставляющего возможность цитирования данных в научных публикациях. Создан веб-сайт центрального репозитория

(<http://esdb.wdcb.ru/>). Формируется база метаданных, включающая полные описания самих данных, информацию об авторах и производителях данных, организациях-поставщиках и хранителях (публикаторах) данных и другую информацию, которая может быть полезной потребителям. Объектами регистрации являются базы данных и наборы данных. Каждому объекту ставится в соответствие XML описание согласно принятой в CrossRef XML схеме, включающее регистрационные данные и актуальный URL адрес страницы отклика, находящейся на веб-сайте центрального репозитория.

В 2017 г. в "Базе данных по наукам о Земле" было зарегистрировано 5 каталогов солнечных протонных событий (таб. 2.1) в качестве наборов данных, которые дополнили базу данных, зарегистрированную ранее. Для каждого набора данных создана страница отклика. Со страниц отклика можно по указанным адресам для "загрузки" данных перейти непосредственно к наборам данных, опубликованным на веб-сайте МЦД по СЗФ http://www.wdcb.ru/stp/online_data.ru.html#ref113_r.

Таблица 2.1 – Каталоги солнечных протонных событий, зарегистрированные в 2017 г.

Название каталога	Цифровой идентификатор DOI
Каталог солнечных протонных событий 1970–1979 гг.	https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-002
Каталог энергетических спектров солнечных протонных событий 1970–1979 гг.	https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-003
Солнечные протонные события. Каталог 1980–1986 гг. Временные профили интенсивности и энергетические спектры протонов	https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-004
Солнечные протонные события. Каталог 1980–1986 гг. Данные наблюдений частиц и электромагнитных излучений.	https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-005
Каталог солнечных протонных событий 1987–1996 гг.	https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-P-006

Зарегистрирована база данных нового волнового индекса – ULF-индекса, характеризующего уровень изменчивости геомагнитного поля в диапазоне частот 2–7 мГц. БД индекса ULF постоянно обновляемая и свободно доступна через веб-сайт <http://ulf.gcras.ru> для дальнейшей проверки и статистических исследований. БД содержит ежемесячные графики 3-х наборов индексов ULF вместе с ключевыми параметрами космической погоды. Идентификатор DOI (<https://doi.org/10.2205/ULF-index>) присвоен базе данных, включающей 26 годовых наборов данных за период 1991–2016 гг. Каждому годовому набору данных присвоен свой DOI. Для базы данных и для каждого из наборов данных подготовлены описания, составлены метаданные и созданы страницы отклика, находящиеся на веб-сайте центрального репозитория (<http://esdb.wdcb.ru/>).

Разработано и находится в стадии тестирования онлайн приложение для автоматизации процесса регистрации данных для последующего опубликования. Данное приложение существенно ускоряет ввод метаданных для регистрируемых баз данных

и/или наборов данных. Это интерактивная форма для заполнения XML-файла, необходимого для регистрации данных.

С целью распространения информации о работе по присвоению DOI данным и привлечения производителей данных к этому процессу были представлены доклады на Международной научно-практической конференции "Global Challenges and Data-Driven Science" (8–13.10.2017 г., Санкт-Петербург) [Sergeeva *et al.*, 2017], на Генеральной ассамблее EGU2017 (23–28.04.2017 г., Вена) [Sergeeva, Zabarinskaya, 2017] и на Совместной научной ассамблее международных ассоциаций: физических наук об океане, метеорологии и атмосферных наук и геомагнетизма и аэрономии Международного геодезического и геофизического союза, которая состоялась в г. Кейптауне, ЮАР (27.08–1.09.2017 г.) [Soloviev *et al.*, 2017].

2.3. Редакционно-издательская подготовка материалов для публикации в изданиях ГЦ РАН. Разработка нового веб-сайта электронного журнала "Russian Journal of Earth Sciences"

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

Журнал "Russian Journal of Earth Sciences" (RJES) публикует оригинальные научно-исследовательские работы по всем направлениям геологии, геофизики и геохимии, включая геоинформатику, экологию, физику атмосферы и океана. Журнал публикуется на английском языке. Статьи, представленные для публикации, подвергаются стандартному процессу "слепого" рецензирования и экспертной оценки, все статьи подвергаются редакционной обработке. Онлайн-версия журнала является первичной (version of record). Стиль журнала полностью совместим со стандартными научными изданиями, и для того, чтобы получить печатную версию журнала, достаточно распечатать PDF-версию на принтере. Статьи 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.

RJES индексируется системой Web of Science (Emerging Sources Citation Index), Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) (импакт-фактор 0,760), входит в перечень ВАК и зарегистрирован в системе CrossRef (каждая опубликованная в журнале статья имеет идентификатор DOI).

Научно-информационный журнал "Вестник ОНЗ РАН" (новая серия) издается в формате электронного мультимедийного журнала с сентября 2009 г. Новости в нем обновляются ежемесячно. Журнал зарегистрирован и индексируется в РИНЦ и CrossRef. Наряду с официальными документами, в журнале публикуются материалы о наиболее значимых и интересных событиях в жизни Отделения наук о Земле РАН и его институтов, таких как международные и российские научные конференции, заключения договоров и

важнейших научных соглашений по тематике ОНЗ РАН, развитие новых научных и научно-технических проектов, материалы о международном сотрудничестве институтов.

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

По итогам 2017 г. опубликовано:

- в 17 выпуске журнала "Russian Journal of Earth Sciences" – 6 номеров (22 статьи);
- в "Вестник ОНЗ РАН" – 210 новостных сообщений, 1 научная статья;
- в "Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН" – 1 отчет, 1 инструкция, 1 тезисы конференции (172 с.), 1 спецвыпуск (18 статей).

Создана и введена в эксплуатацию новая версия веб-сайта журнала "Russian Journal of Earth Sciences" с более удобным и интуитивно понятным интерфейсом, который приведен в соответствие с Международными требованиями к отображению контента научного журнала. Данные требования предъявляют такие базы данных научной периодики, как SCOPUS, Web of Science, DOAJ, Google Scholar и др., по которым вычисляются наукометрические показатели журнала и авторов, печатающихся в нем.

Журнал RJES издается на английском языке, тем не менее вебсайт журнала поддерживает английский и русский языки. На веб-сайте журнала можно найти всю необходимую информацию (рис. 2.2), такую как, профиль журнала, список редакционной коллегии, публикационную этику, принятую издателем, идентификационные данные журнала (номер свидетельства в Роскомнадзор, ISSN и др.), рекомендации авторам по оформлению статей для представления в журнал.



Рисунок 2.2 – Веб-страница журнала RJES с одной из последних опубликованных статей

Все статьи, принятые к публикации в RJES, переводятся в формат LaTeX, после чего транслируются к форматам PDF, HTML5, EPUB3 с использованием стилевых файлов, разработанных для этой цели в ГЦ РАН. Авторы могут скачать последнюю версию стилевого файла `elxpaper.sty`, включенного в состав одноименного программного пакета ELXpaper, для подготовки рукописи в формате LaTeX2_ε. На веб-сайте представлено содержание текущего и прошлых томов и номеров в виде древовидной структуры (рис. 2.3). Так же можно ознакомиться с перечнем статей, которые приняты редакционной коллегией и находятся на той или иной стадии подготовки статьи к опубликованию. Наряду с обычным поиском появился инструмент авторского поиска и поиска по ключевым словам. Для каждого автора можно в открывающемся окне увидеть список DOI его статей, опубликованных в журнале. При наведении курсора на строку с DOI появляется название статьи.

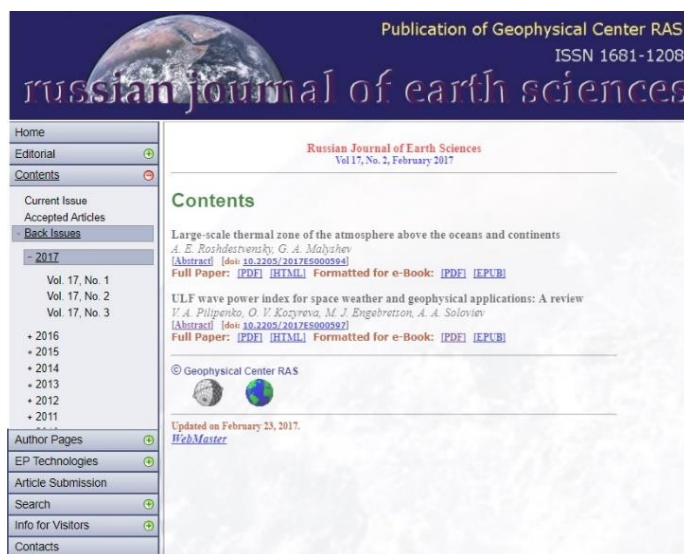


Рисунок 2.3 – Веб-страница журнала RJES с содержанием номеров в виде древовидной структуры

2.4. Разработка новых методов и сервисов визуализации геофизических данных с использованием технологий сферической визуализации

В 2017 г. работа была направлена на создание новых методов и сервисов визуализации геофизических данных с использованием технологий сферической визуализации.

В качестве исходных данных для тестирования методов визуализации были взяты палеотектонические реконструкции, так как они являются одним из основных инструментов изучения тектонических движений. Осуществлена разработка динамического контента, отражающего движение литосферных плит (как континентальных, так и океанических) в неопротерозойское время, с использованием сферических технологий визуализации и ГИС. Для моделирования движения тектонических плит за период 1000–520 Ма использованы данные ресурса "EarthByte" [<https://www.earthbyte.org/global-plate-models>]. Данные были экспортированы с шагом 1 Ма. Созданный ГИС-проект состоит из 481 слоя. База данных может быть представлена в

двух вариантах в зависимости от способа классификации полигональных объектов – по регионам, к которым относятся плиты (рис. 2.4), либо по названиям плит.

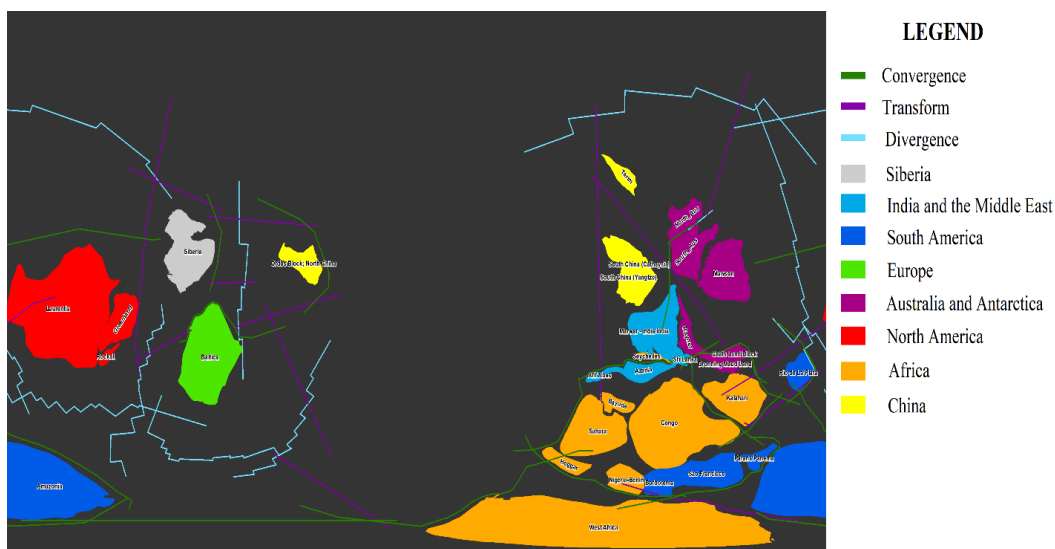


Рисунок 2.4 – Классификация по регионам, к которым относятся плиты

Программное обеспечение "Орбус" позволяет все изображения конвертировать в сферические, зациклив их в одну динамическую презентацию. Экспорт слоев может происходить как напрямую из ГИС-проекта, так и погрузкой папки со слоями непосредственно в базу данных ПО вручную. В данном случае был выбран второй вариант, так как необходима дополнительная визуальная обработка изображений непосредственно во встроенном редакторе Orbus. На сферические изображения дополнительно добавлено общее название созданной модели. Также задана частота смены слайдов для имитации анимации и зациклена вся презентация. Таким образом, конечным продуктом применения разработанных методов и сервисов визуализации является визуально репрезентативный фрагмент динамического движения палеореконструкций за период 1000–520 Ма.

Аналогично всем предыдущим визуализациям, презентация движения палеореконструкций может быть транслирована непосредственно на цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном либо загружена на веб-сервис для общего доступа.

2.5. Изучение влияния физических полей различной природы на геодинамические процессы с целью создания нового подхода к прогнозированию природных катастроф

В результате наземных измерений тепловых и быстрых нейтронов, проводившихся в ИЗМИРАН (Москва), и тепловых нейтронов, проводившихся на пункте комплексных наблюдений КФ ГС РАН (вблизи г. Петропавловск-Камчатский) в 2017 г. были зарегистрированы потоки нейтронов, связанные с сильными землетрясениями и природными стихийными событиями. Всплески потоков нейтронов регистрируются не только на приборном комплексе с гелиевыми счетчиками, т. е. с энергией несколько МэВ, но и на нейтронных мониторах, пороговая энергия которых равна 20–30 МэВ.

В 2017 г. такие потоки нейтронов зафиксированы при сильных землетрясениях в Мексике 7 сентября (магнитуда 8,1) и 19 сентября (магнитуда 7,1), при урагане "Харви" в Мексиканском заливе в августе и 1 сентября в результате схода селя близ поселка Эльбрус.

Всплески частиц на нейтронных мониторах (НМ) регистрируются не только от землетрясений, но и от других природных стихийных событий. В августе 2017 г. на южное побережье американского штата Техас обрушился ураган "Харви", сформировавшийся в Мексиканском заливе, вызвавший катастрофические наводнения в юго-восточной части штата. Это сильнейший ураган в Мексиканском заливе после урагана "Катрина" в 2005 г. "Харви" явился восьмым штормом, третьим ураганом и первым мощным ураганом в Атлантическом сезоне ураганов 2017 г. Национальная метеорологическая служба США отметила, что "Харви" является ураганом опасной четвёртой категории и тропическим штормом.

На рисунке 2.5 показаны всплески интенсивности потоков нейтронов, зарегистрированных нейтронным монитором МХСО в Мексике в августе 2017 г. Из рисунка видно, что интенсивность всплесков потоков частиц достигала примерно 10000% и на протяжении нескольких суток данные отсутствовали. Отсутствие данных, видимо, связано с такими высокими потоками, которые не могли быть зарегистрированы прибором.

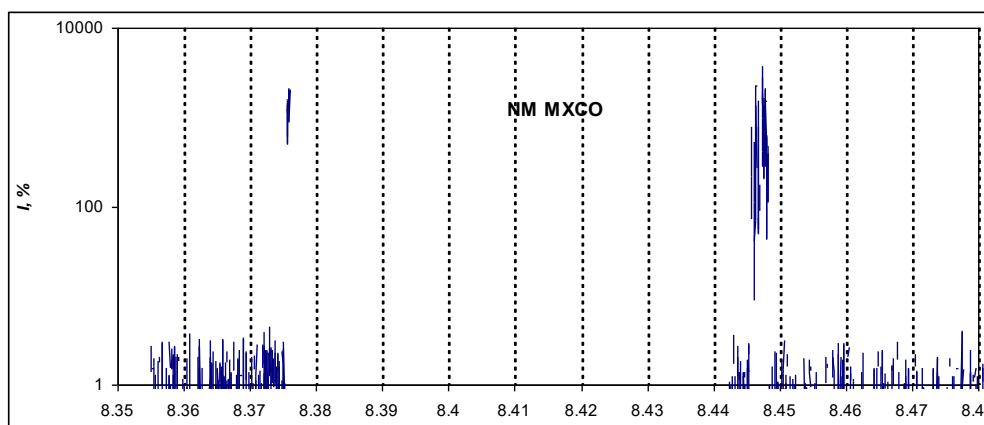


Рисунок 2.5 – Временные вариации 12–15 августа 2017 г. интенсивности потоков частиц, регистрируемых на НМ МХСО, Мексика, неисправленные на давление

Потоки нейтронов регистрируются и в менее значимых стихийных событиях. В ночь на 1 сентября 2017 г. в Кабардино-Балкарии в районе населенного пункта *Эльбрус* в результате обильных осадков произошел сход *селя*. В результате этого более 500 человек оказались заблокированными, включая туристов из других стран. Сход мощного селевого потока вызвал всплески интенсивности потоков нейтронов. На рисунке 2.6 показаны всплески интенсивности потоков нейтронов, зарегистрированных НМ ВКСН (Баксан, Эльбрус) 31 августа 2017 г.

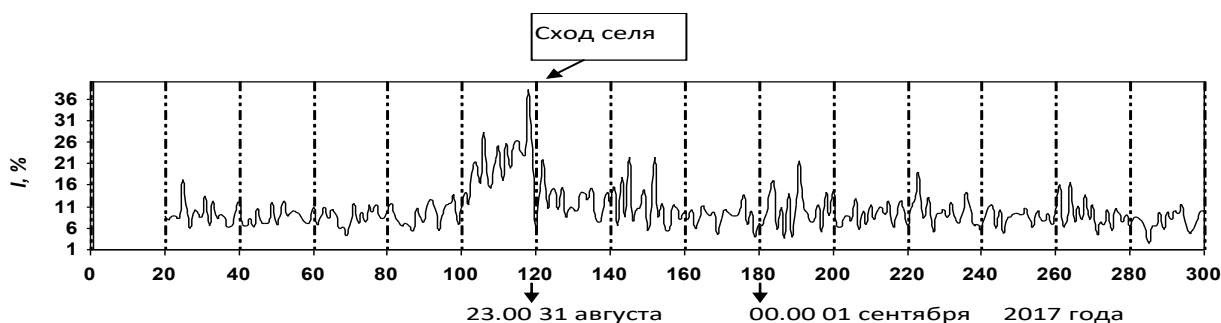


Рисунок 2.6 – Временные вариации 30 августа–1 сентября 2017 г. интенсивности потоков частиц, регистрируемых на НМ BKSН (Баксан, Эльбрус). На горизонтальной оси – время в минутах

Из рисунка видно, что непосредственно перед селевым потоком наблюдалось возрастание потоков частиц.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Повышенные потоки нейтронов происходят не только перед землетрясениями и вулканическими извержениями, но и при других природных стихийных событиях. То есть потоки частиц являются характеристикой общего состояния Земли.

2.6. Выбор оптимальных поправок на тропосферу и ионосферу для обработки исходных данных спутниковой альтиметрии с целью получения высот морской поверхности, готовых для научных исследований. Пополнение Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии

В 2017 г. было проведено включение уточненного алгоритма первичной обработки данных спутниковой альтиметрии для каждого спутника обеспечения в Интегрированную Базу Данных Спутниковой Альтиметрии, который был программно реализован для обработки данных спутников Jason-2/3 и SARAL/AltiKa для учета необходимых поправок на влияние тропосферы и ионосферы.

Осуществлена запись данных спутников Jason-2/3, ERS-1/2, SARAL/AltiKa, Satinel-3 в исходном формате и переформатирование в формат Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии. Для формирования Интегрированной Базы Данных Спутниковой Альтиметрии с сайтов были экспортированы и заархивированы данные этих спутников. Общий объем данных в архивированном виде составил более 10 ТБайт.

Проведено исследование климатической изменчивости сезонного хода уровня Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным альтиметрических измерений. Изменения климата на водосборном бассейне Черного моря и его акватории отражаются в изменении основных параметров состояния моря: уровня и температуры морской поверхности. Для исследования этих изменений использовались данные спутниковой альтиметрии и радиометрии, которые позволяют за продолжительный временной интервал провести анализ пространственно-временной изменчивости межгодовой скорости изменения этих параметров.

Для исследования пространственно-временной изменчивости скорости климатической изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) использовались данные дистанционного зондирования за интервал 1982–2015 гг. Результаты исследования показали, что за временной интервал 1982–2015 гг. ТМП у побережья Краснодарского края росла со средней скоростью $0,079 \pm 0,005^\circ\text{C}/\text{год}$, а у побережья Республики Абхазия – со скоростью $0,072 \pm 0,002^\circ\text{C}/\text{год}$ (рис. 2.7). При этом скорость роста ТМП уменьшалась от Керченского пролива ($0,082^\circ\text{C}/\text{год}$) до Адлера ($0,076^\circ\text{C}/\text{год}$), а вдоль побережья Республики Абхазия уменьшалась по направлению от Адлера ($0,076^\circ\text{C}/\text{год}$) до Очамчиры ($0,071^\circ\text{C}/\text{год}$).

За временной интервал 1993–2015 гг. уровень моря у побережья Краснодарского края рос со средней скоростью $0,29 \pm 0,03$ см/год, а у побережья Республики Абхазия – со скоростью $0,27 \pm 0,02$ см/год. При этом скорость роста уровня Черного моря увеличивалась от Керченского пролива ($0,28$ см/год) до Адлера ($0,31$ см/год), а вдоль побережья Республики Абхазия наоборот – уменьшалась по направлению от Адлера ($0,31$ см/год) до Очамчиры ($0,24$ см/год) (рис. 2.8).

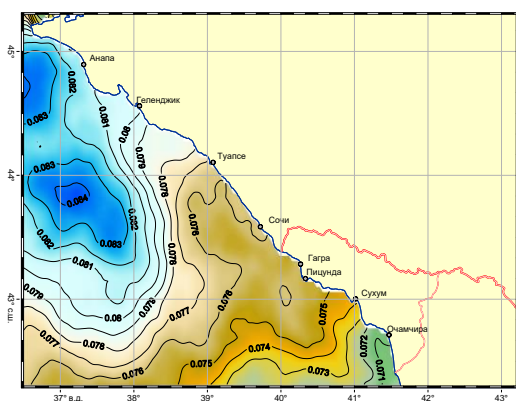


Рисунок 2.7 – Пространственная изменчивость климатической скорости изменения ТПМ ($^\circ\text{C}/\text{год}$) за период с 1983 по 2015 гг

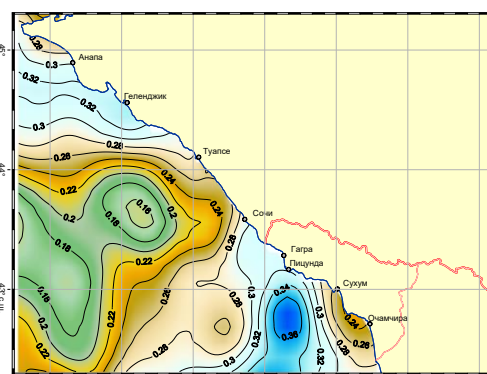


Рисунок 2.8 – Пространственная изменчивость климатической скорости изменения уровня Черного моря (см/год) за период с 1993 по 2015 гг

За временной период 1993–2016 гг. максимальные скорости межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря (более 5 мм/год) наблюдаются в Ботническом заливе. По направлению к Датским проливам скорость уменьшается с 4,4 до 3,2 мм/год. В проливе Каттегат она становится более 3,6 мм/год. Анализ нормированных скоростей межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря показывает, что вероятность максимальных скоростей подъема или падения уровня моря наблюдается в проливе Каттегат и у побережья Эстонии, а минимальных – на границе Датских проливов и центральной части моря и в Ботническом заливе (рис. 2.9, рис. 2.10).

С сентября 1992 г. по настоящее время изменчивость уровня Каспийского моря хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (рис. 2.11). Результаты расчетов показали, что этот временной период можно разделить на шесть интервалов. Начиная с 2016 г. по конец 2017 г. уровень моря начал расти со скоростью $3,22 \pm 1,27$ см/год и к июню 2016 г. составил -27,87 м. Однако в июне 2017 г. он

уменьшился до величины $-27,93$ м, что не позволяет говорить об устойчивой тенденции к росту уровня Каспийского моря.

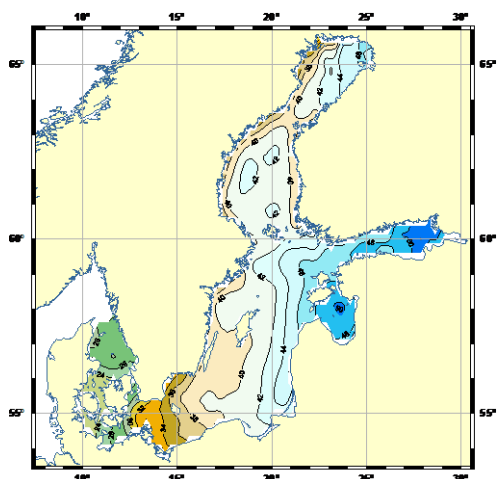


Рисунок 2.9 – Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Балтийского моря по данным альтиметрических измерений

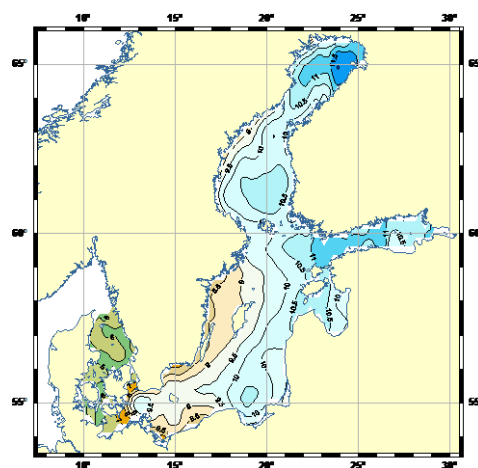


Рисунок 2.10 – Нормированные скорости изменения уровня Балтийского моря по данным альтиметрических измерений

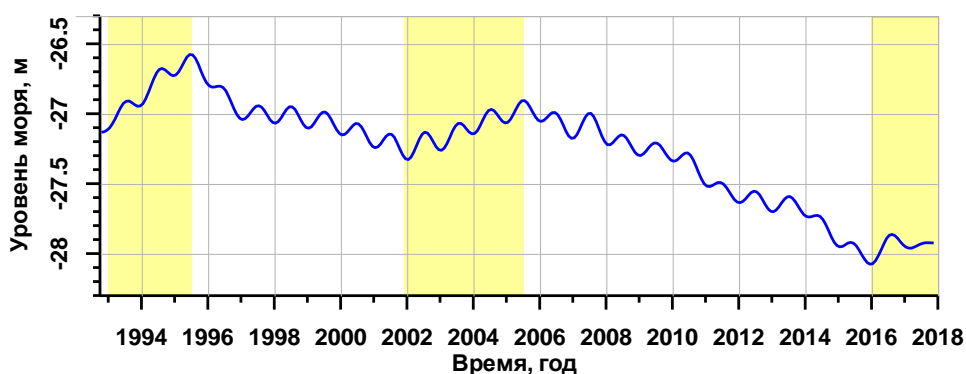


Рисунок 2.11 – Временная изменчивость уровня Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии с января 1993 г. по декабрь 2017 г. Периоды роста уровня выделены желтым цветом

За отчетный период **Интегрированная База Данных Спутниковой Альтиметрии** для Мирового океана и **Интегрированная База Данных Спутниковой Альтиметрии** для Каспийского моря были пополнены данными спутника Jason-2 версии D.

2.7. Выполнение функций Национального геофизического комитета Российской академии наук

Национальный геофизический комитет Российской академии наук (НГК РАН) осуществляет представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе (IUGG) и его восьми ассоциациях. Базовой организацией НГК является Геофизический центр РАН.

В 2017 г. Комитет участвовал в организации Международной научно-практической конференции "Global Challenges and Data-Driven Science" (<http://codata2017.gcras.ru/>), которая прошла 8–13 октября 2017 г. в Санкт-Петербурге. Председатель НГК РАН,

академик, профессор А. Д. Гвишиани был членом программного комитета конференции; секретарь НГК РАН, к.ф.-м.н. Р. И. Краснощёков принял участие в работе организационного комитета.

Основные усилия Бюро и аппарата НГК РАН, а также членов секций были направлены на организацию участия российских ученых и специалистов в научных ассамблеях IUGG. В 2017 г. были организованы 5 научных ассамблей ассоциаций IUGG (таб. 2.2).

Таблица 2.2 – Даты и места проведения ассамблей ассоциаций IUGG в 2017 г.

Ассоциация	Даты проведения	Место проведения	Интернет-сайты ассамблей
IACS	12–17 февраля	Веллингтон, Новая Зеландия	http://www.climate-cryosphere.org/
IAHS	1–14 июля	Порт-Элизабет, ЮАР	https://iahs.info/IAHS-2017.do
IAG–IASPEI	30 июля – 4 августа	Кобе, Япония	http://www.iag-iaspei-2017.jp/
IAVCEI	14–18 августа	Портленд, США	http://iavcei2017.org/
IAPSO–IAMAS–IAGA	27 августа – 1 сентября	Кейптаун, ЮАР	http://www.iapso-iamas-iaga2017.com/

Члены Секции геомагнетизма и аэрономии приняли активное участие в работе Совместной научной ассамблеи трех ассоциаций IUGG: физических наук об океане (IAPSO), метеорологии и атмосферных наук (IAMAS) и геомагнетизма и аэрономии (IAGA), которая состоялась в г. Кейптауне, ЮАР (27 августа – 1 сентября 2017 г.). Национальным делегатом от России для участия в заседаниях Исполнительного совета IAGA был назначен член Секции чл.-корр. А. А. Соловьёв. В ходе работы ассамблеи он был избран вице-председателем Комиссии по данным и информации IUGG (UCDI).

На заседании Рабочей группы по геомагнитным наблюдениям (IAGA Division V Working Group V-OBS: Geomagnetic Observation) в качестве места проведения очередного Семинара IAGA (IAGA-Workshop) в 2020 г. была выбрана магнитная обсерватория "Казань" Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ).

Список использованных источников

Sergeyeva N., Kedrov E. et al. Creation of a modern system of registration, publication and citation of geophysical data // Book of Abstracts of the International Conference “Global Challenges and Data-Driven Science” // Geoinf. Res. Papers Ser. (edit. Kedrov E), 2017, Vol. 5, P. 107. BS1002, [DOI:10.2205/CODATA2017](https://doi.org/10.2205/CODATA2017)

Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P. Open access to geophysical data // 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held, 2017, Vol. 19, P. 6734.

Soloviev A., Kedrov E. et al. Geophysical data publishing under the "Earth Science DataBase" project // Joint IAPSO-IAMAS-IAGA Assembly "Good Hope for Earth Sciences", (Cape Town, South Africa), Abstract Book, 2017, P. 176.

Strategic Plan 2014–2018 — World Data System: Trusted Data Services for Global Science
URL: <http://www.icsu-wds.org/organization/strategic-plan>

EarthByte URL: <https://www.earthbyte.org/global-plate-models>

3. Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0004

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610082-9

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

В 2017 г. работы по теме были направлены на решение следующих научных задач:

1 Разработка методологии использования сейсмологических данных для прогнозирования развития тектонического процесса в зонах активного орогенеза.

2 Изучение современных движений земной коры на основе спутниковых систем "GPS/ГЛОНАСС" для обоснования геодинамической безопасности на радиационно опасных объектах.

3 Исследование кинематики земной поверхности в районах сильных сейсмических событий.

4 Разработка принципов применения нейронных сетей для построения деформационных полей для увеличения достоверности геодезической информации.

Ниже кратко характеризуются результаты исследований по задачам 1 и 3.

В 2017 году были продолжены исследования по разработке методологии использования сейсмологических данных для прогнозирования тектонических процессов в зонах активного орогенеза, как тестовых районов максимально негативного развития геомеханических процессов способных привести к разрушению структурно-тектонического блока. Для этого были выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния для ряда крупных землетрясений по методологии, приведенной в отчете о НИР за 2016 г.

16 апреля 2016 г. в Центральной части о. Кюсю (Япония) произошло землетрясение с $M=7.0-7.3$, сильнейшее за последние тридцать лет в этом районе. Эпицентр землетрясения расположен восточнее г. Кимамото ($32^{\circ}46'55.2''$ сш и $130^{\circ}43'00''$ вд). (рис. 3.1). Два активных тектонических разлома (*Futagawa fault*, *Hinagu fault*) разделены областью локализации трех, значительно меньших по протяженности, разломов, достоверность которых имеет геологическое подтверждение. Значения главных действующих тектонических напряжений приняты: $\sigma_{yy} = 10$ МПа, $\sigma_{xx} = 30$ МПа. Предметом анализа были карты компонент тензора напряжений (σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy}) и интенсивности напряжений σ_i в пределах эпицентральной зоны до и после землетрясения. На рисунке 3.2 приведена карта отношения σ_{xx}/σ_{yy} . На карту вынесены эпицентры главного толчка и форшоков. Можно видеть, что эпицентр одного из форшоков и эпицентр главного толчка попадают в зоны отношений (σ_{xx}/σ_{yy}), вдвое и больше превышающие фоновые значения, равные трем. Можно предположить, что гипоцентры главного толчка и форшоков возникают в условиях низких значений напряжений бокового отпора, возможно, переходящих в напряжения растяжения. Форшоки, следовавшие друг за другом (в течение часа) сформировали новый разрыв, вероятно соединяющий разломы (*Futagawa fault*, *Hinagu fault*), вызывая частичное (в

течение суток) перераспределение напряжений и стимулируя старт разрыва в гипоцентре главного толчка, где отношение σ_{xx}/σ_{yy} больше шести. Предполагается, что во время форшоков образовался новый разрыв, соединяющий два протяженных разлома (*Futagawa fault*, *Hinagu fault*). Новый разрыв в эпицентральной зоне приводит к постепенному изменению НДС.

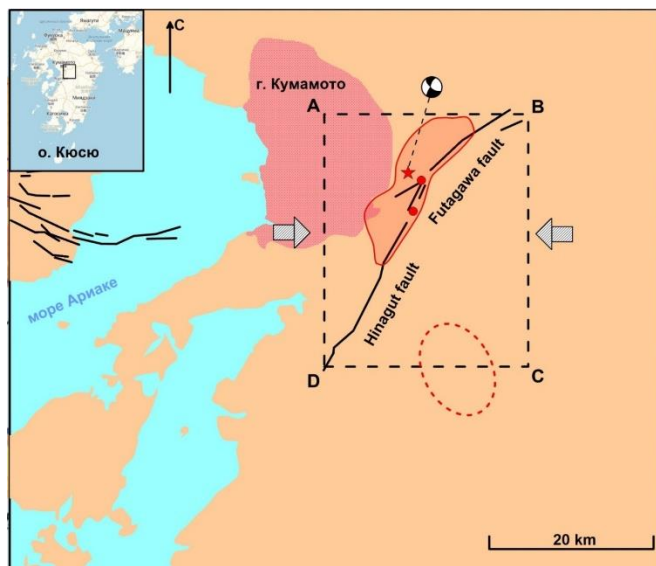


Рисунок 3.1 – Схема разломной тектоники эпицентральной зоны землетрясения 16.04.2016 [Морозов, Маневич, 2017; Устинов, Кафтан, 2016], область моделирования – площадь ABCD. Звезда – эпицентр землетрясения 16 апреля 2016 года, кружки – эпицентры форшоков с М 6.4, стрелки – направление оси компрессионного сжатия, красная линия оконтуривает область зарегистрированных афтершоков, в первые трое суток после главного толчка, красная пунктирная линия – ограничивает площадь возможного эпицентра сильного корового землетрясения

На рисунке 3.3 представлена карта разности интенсивности напряжений до и после главного разрыва (пунктирная линия) во время землетрясения. Положительные значения сброшенной энергии деформации и соответственно высокой плотности эпицентров последовавших афтершоков. В то же время, на концах разломов возникают зоны высокой интенсивности напряжений (отрицательные значения $\Delta\sigma_i$). В рамках упругой модели геологической среды, этот процесс протекает мгновенно (со скоростью, несколько меньшей скорости распространения поперечных волн), – в реальной геологической среде необходимо время. Вместе с тем следует допустить, что часть напряжений шарового тензора в прилегающей геологической среде снимается во время распространения нового разрыва между разломами (*Futagawa fault*, *Hinagu fault*), стимулируя новый разрыв в гипоцентре главного толчка. Новый разрыв, образовавшийся во время землетрясения 14 апреля 2016 г., протяженностью более 50 километров, изменяет напряженное состояние эпицентральной зоны в течение времени, вместе с тем проявление косейсмического эффекта деформации поверхности эпицентральной зоны представляет определенный интерес в анализе НДС. Следует отметить, что формирование очага сильного корового землетрясения происходит в зоне высокой концентрации энергии деформации, т.е. область высокой интенсивности напряжений является областью зарождения и

распространения последующего разрыва. Разрыв, как правило, стартует из периферийной области аномально высокой интенсивности напряжений при условии минимальных напряжений отпора (переходящего в напряжение растяжения).

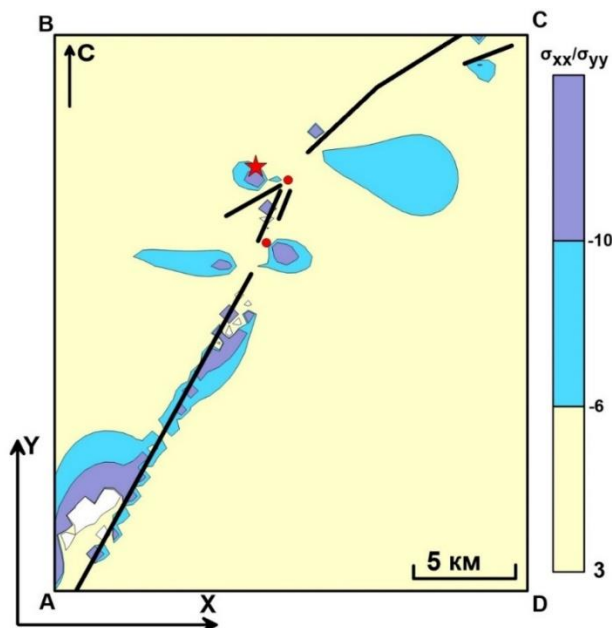


Рисунок 3.2 – Карта отношений $\varpi = \left(\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} \right)$ до землетрясения, (звезда – эпицентр главного толчка, кружки – эпицентры форшоков)

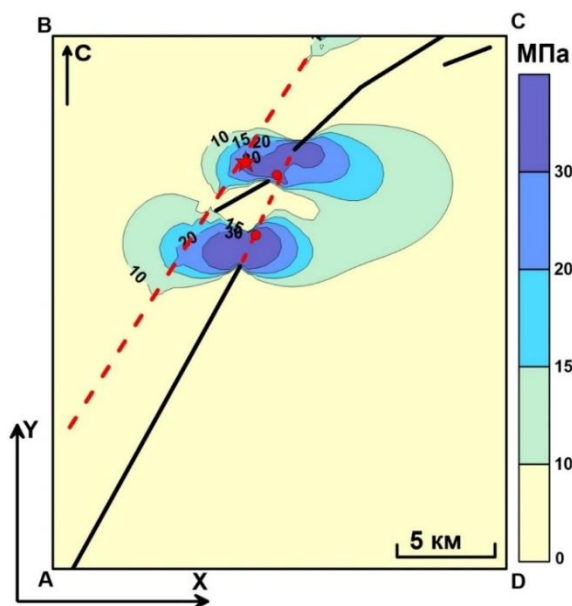


Рисунок 3.3 – Карта разности интенсивности напряжений до и после землетрясения 16 апреля 2016 года, (звезда – эпицентр главного толчка, кружки – эпицентры форшоков, красная пунктирная линия – предполагаемый разрыв)

Одним из важнейших элементов современного комплекса геофизических наблюдений является мониторинг движений и деформаций земной поверхности. Он позволяет регистрировать изменения, происходящие на поверхности Земли в связи с различными природными и техногенными процессами, важнейшими из которых являются

такие как сейсмическая активность и вулканизм. При этом наибольшую эффективность исследований обеспечивают современные спутниковые технологии, например, такие, как глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Точность и эффективность выявления движений и деформаций средствами ГНСС являются важнейшими характеристиками наблюдательных сетей. Поэтому они вынуждены являться предметом исследований с целью их непрерывного совершенствования. Эффективность использования ГЛОНАСС совместно с GPS или без нее при решении точных геодезических задач еще недостаточно оценена. Имеются публикации сравнительных анализов точности автономных координатных определений в режиме точного определения координат, так называемого *Point Precise Positioning (PPP)*. Представляется важным выяснить, насколько точны наблюдения ГЛОНАСС в настоящее время в условиях локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности и инженерных объектов. Для этих целей был проведен специальный эксперимент, описание и результаты которого коротко представлены ниже.

Результаты ГНСС наблюдений были получены по данным мониторинга движений и деформаций в локальной тестовой сети, состоящей из четырех пунктов, удаленных друг от друга на расстояния от 3 км до 19 км. На протяжении трех месяцев (ноябрь 2014 г. – февраль 2015 г.) в сети осуществлялись непрерывные ГНСС измерения с интервалом одновременной регистрации спутникового сигнала 30 сек.

Получены наборы из шести векторов базовых линий сети на каждые сутки в течение трех месяцев в комбинациях, показанных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Комбинации наборов векторов базовых линий

ГНСС	Маска возвышения спутников ГНСС	
	5°	15°
GPS	×	×
GPS+ГЛОНАСС	×	–

Во всех вариантах, показанных в таблице знаком "×", были получены компоненты геоцентрических приращений пространственных координат (dX , dY и dZ) базовых линий, средние квадратические ошибки их определения (m_{dX} , m_{dY} и m_{dZ}) а также корреляционные матрицы для каждого вектора сформированной сети. Вторым этапом являлось определение векторов смещений и деформаций земной поверхности, контролируемой тестовой сетью по результатам уравнивания векторов базовых линий с использованием авторских методик.

Уравнивание выполнялось по традиционной схеме решения системы уравнений поправок v вида

$$v = A dx + l, \quad (1)$$

где v – вектор значений искомых поправок к разностям повторно измеренных компонент векторов базовых линий контрольной сети, порядка $(3n-3) \times 1$ для n базовых линий; A – матрица коэффициентов уравнений поправок (1); dx – вектор определяемых смещений пунктов контрольной сети порядка $3k \times 1$ при k определяемых пунктах; l – вектор разностей измеренных элементов сети порядка $(3n-3) \times 1$.

Для учета неравноточности измерений использовались ковариационные матрицы векторов базовых линий Q_l , полученные с использованием программного обеспечения Topcon Tools. Решением системы уравнений поправок по методу наименьших квадратов с учетом неравноточности и взаимной зависимости элементов векторов базовых линий под условием минимума квадратичной формы $v^T Q_l^+ v$ является выражение

$$dx = -N^+ L = -Q_{dx} L, \quad (2)$$

где, $N = A^T Q_l^+ A$ и $L = A^T Q_l^+ l$ так называемые матрица коэффициентов нормальных уравнений и вектор свободных членов нормальных уравнений, где $Q_l^+ = P$ представляет собой матрицу весов измерений. Так как выполнялось уравнивание свободной сети, то вместо стандартной обратной матрицы коэффициентов нормальных уравнений N^{-1} использовалась главная псевдообратная матрица N^+ .

В случае уравнивания свободной сети несмещенной оценкой дисперсии единицы веса зависимых и неравноточных наблюдений является

$$\mu^2 = \frac{v^T Q_l^+ v}{n - m}, \quad (3)$$

где n – общее число измерений, m – число необходимых измерений.

Статистическими оценками дисперсий искоемых смещений dx являются значения

$$m_{dx_{ii}}^2 = \mu^2 q_{ii}, \quad (4)$$

где q_{ii} – диагональные элементы ковариационной матрицы неизвестных Q_{dx} .

Определив по результатам уравнивания слагаемые суммы общую эффективность искоемых кинематических характеристик можно оценить по критерию Фишера. Для каждого цикла измерений (разностей измеренных векторов) в вариантах таблицы получены следующие характеристики, позволяющие сопоставить эффективность каждого из вариантов.

Одной из задач поставленного эксперимента являлось сопоставление характеристик точности и эффективности выявления смещений при использовании маски возвышения, равной 5° и 15° . В этом анализе были использованы только наблюдения спутников системы GPS. Сравнивались средние квадратические ошибки (СКО) единицы веса μ , дисперсионные отношения F и средние квадратические ошибки определения горизонтальных и вертикальных смещений (рис. 3.4), обобщенно для всей сети.

Результаты сравнения представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

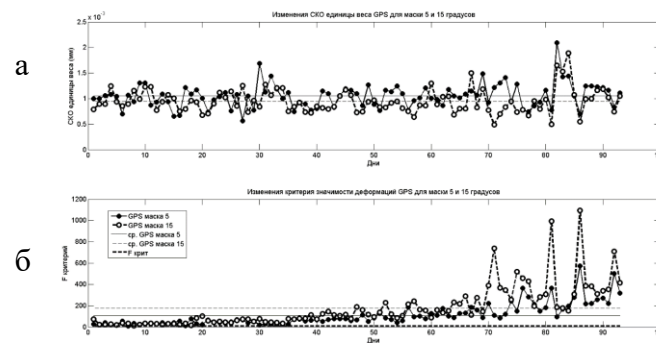


Рисунок 3.4 – Сравнение СКО единицы веса (а) и дисперсионных отношений F (б) результатов уравнивания наблюдений с масками 5° и 15°

Точки и сплошная линия-изменения СКО единицы веса GPS для угла возвышения 5° . Кружки и пунктирная линия – изменения СКО единицы веса GPS для угла возвышения 15° . Критическое значение $F_{\text{крит.}}$ (жирная пунктирная прямая) получено по таблицам распределения Фишера при доверительной вероятности $P \geq 0.01$ и числе степеней свободы 6.

Рисунок 3.4 свидетельствует о том, что точность и эффективность определения смещений при маске 15° несколько выше, чем при 5° . При этом СКО единицы веса в среднем меньше на 0.1 мм. Средние уровни значений показаны на графиках прямыми линиями. Эффективность выявления смещений также несколько выше при маске 15° , по отношению к маске 5° , как показано в нижней части рисунка 3.5. Представляет интерес выяснить, какие именно компоненты смещений (плановые или высотные) определяются точнее при маске 15° и в каком соотношении.

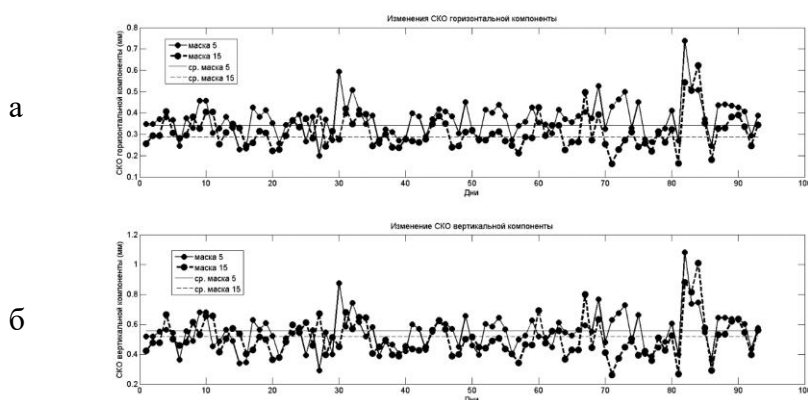


Рисунок 3.5 – Сравнение СКО определения горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент смещений, полученных по результатам уравнивания GPS наблюдений с масками 5° и 15° . Точки и сплошная линия – изменения СКО единицы веса GPS для угла возвышения 5° . Кружки и пунктирная линия - изменения СКО единицы веса GPS для угла возвышения 15°

Рисунок 3.4 показывает, что увеличение маски с 5° до 15° оказывает большее влияние на определение горизонтальных компонент. При этом точность повышается на 0,1 мм, тогда как для высотной компоненты соответствующее превышение составляет примерно вдвое меньшую величину.

Используя возможности применяемой аппаратуры выполнять одновременно измерения как GPS, так и ГЛОНАСС, осуществлен сравнительный анализ результатов обработки двух вариантов наблюдений GPS и GPS+ГЛОНАСС с маской 5° . Сравнение результатов этих вариантов уравнивания представлено на рисунке 3.6.

Результаты сравнения показали, что СКО полученные после уравнивания только GPS и GPS+ГЛОНАСС в среднем практически совпадают. В то же время наблюдается ощутимое повышение эффективности определения смещений при совместной обработке данных двух спутниковых навигационных систем. Это показывает нижний график (рис. 3.6). То есть точность совместной обработки наблюдений двух систем, хоть незначительно, но выше точности обработки только GPS наблюдений. Поэтому представляет интерес оценка вклада в общий результат наблюдений каждой из систем

раздельно. Так как с использованием коммерческого программного обеспечения Торсон Tools и большинства других программ самостоятельная обработка ГЛОНАСС без участия GPS не представляется возможной, выполнялся специальный анализ СКО, полученных в обоих вариантах уравнивания: GPS и GPS+ГЛОНАСС.

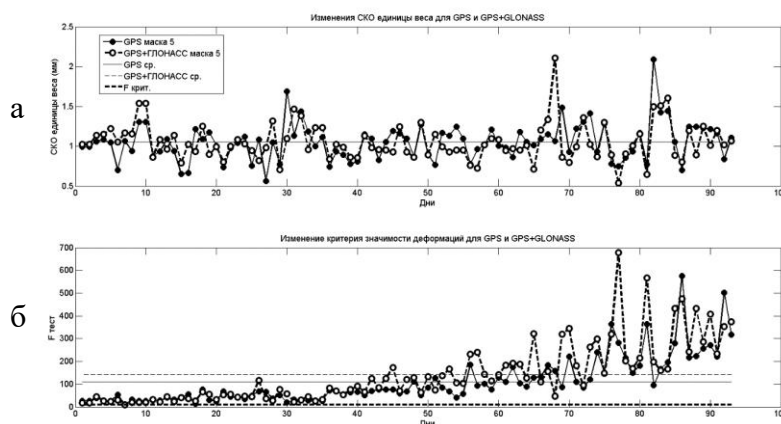


Рисунок 3.6 – Сопоставление точности (а) результатов уравнивания наблюдений GPS и GPS+ГЛОНАСС и эффективности определения смещений (б) $F_{\text{крит}}=8$ для $P<0.01$ и $k=6$

Точки и сплошная линия – изменения СКО единицы веса и дисперсионных отношений F для угла возвышения 5° по GPS. Кружки и пунктирная линия - изменения СКО единицы веса и дисперсионных отношений F для угла возвышения 5° по GPS+ГЛОНАСС.

Рассмотрим формулу дисперсии единицы веса измерений, обозначив в ней число избыточных измерений символом r ,

$$\mu_{12}^2 = \frac{v_{12}^T P_{12} v_{12}}{r_{12}}, \quad (5)$$

где подстрочный индекс 12 означает использование в обработке измерений двух систем GPS – 1 и ГЛОНАСС – 2.

Заметим, что оценку (5) мы получили из совместной обработки наблюдений двух систем GPS+ГЛОНАСС. Дисперсию при условии, что соответствующие весовые матрицы независимы друг от друга, можно представить как сумму двух слагаемых результатов наблюдений каждой из навигационных систем,

$$\mu_{12}^2 = \frac{v_{12}^T P_{12} v_{12}}{r_1 + r_2} = \frac{v_1^T P_1 v_1}{r_1 + r_2} + \frac{v_2^T P_2 v_2}{r_1 + r_2}. \quad (6)$$

Из обработки наблюдений GPS отдельно от ГЛОНАСС получена также оценка

$$\mu_1^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1}{r_1}. \quad (7)$$

Для получения дисперсии единицы веса наблюдений ГЛОНАСС остается узнать соотношение чисел избыточных измерений r_1 и r_2 , возникающих при одновременном наблюдении спутников обеих систем.

Сопоставление СКО единиц веса измерений с использованием GPS и ГЛОНАСС представлено на рисунке 3.7.

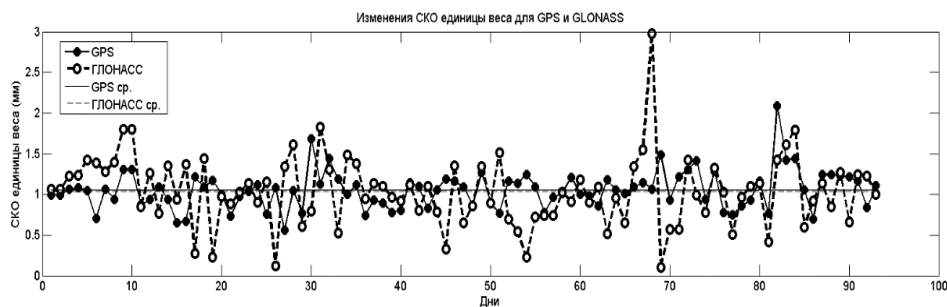


Рисунок 3.7 – Сопоставление результатов вклада GPS и ГЛОНАСС в общую СКО единицы веса. Точки и сплошная линия – СКО для GPS. Круги и пунктирная линия – СКО для ГЛОНАСС

Сравнение показывает, что среднее значение СКО измерений ГЛОНАСС несколько больше, чем у GPS. В то же время, получение обобщенной СКО, как среднего арифметического значения, не является корректным. Операция получения среднего справедлива для дисперсий. Поэтому, вычислив соответствующие суммы средних квадратов и извлекая квадратный корень, получаем окончательные оценки обобщенных СКО единицы веса каждой из спутниковых навигационных систем $\mu_1 = 1.08$ мм и $\mu_2 = 1.12$ мм, соответственно. По результатам совместной обработки GPS+ГЛОНАСС получаем $\mu_{12} = 1,08$ мм.

На рисунке 3.8 представлены гистограммы распределения СКО наблюдений с использованием GPS и ГЛОНАСС. Можно видеть, что распределение СКО ГЛОНАСС менее островершинное, чем у GPS, т.е. оно имеет больше значений в области крупных СКО.

Наблюдения спутников GPS на разных углах возвышения показали, что более высокая точность определения приращений координат и эффективности выявления смещений земной поверхности обеспечивается использованием маски возвышения 15° . При этом уменьшение СКО достигает 20–25% по отношению к наблюдениям с маской 5° , а эффективность выявления смещений повышается в среднем на 40%.

Сравнение результатов наблюдений GPS и GPS+ГЛОНАСС показывает, что обработка GPS+ГЛОНАСС и исключительно GPS в среднем не существенно различается по СКО, но при этом совместная обработка демонстрирует меньший разброс значений, т.е. большую стационарность по дисперсии. В то же время, сравнение критериев значимости выявления смещений показывает большую эффективность при совместном использовании обеих навигационных систем на величину порядка 30%.

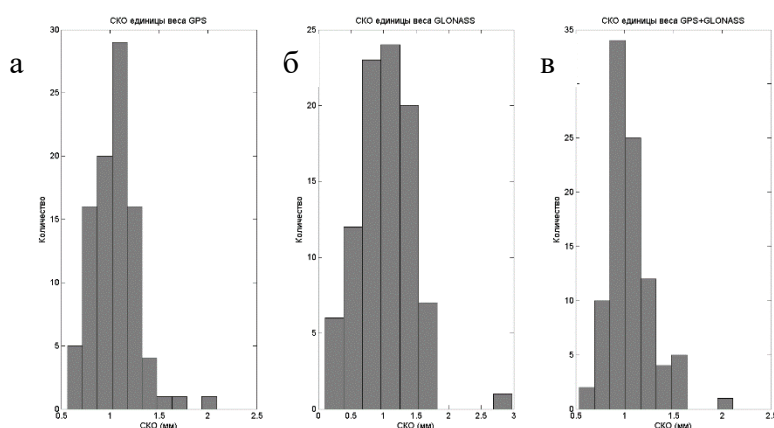


Рисунок 3.8 – Гистограммы распределения СКО единицы веса наблюдений GPS (а), ГЛОНАСС (б) и GPS+ГЛОНАСС (в)

Оценка вклада ГЛОНАСС в общую точность измерений показала, что точность определений с использованием этой ГНСС близка к точности определений GPS. Но при этом повышения точности совместной обработки по отношению к исключительно GPS не наблюдается из-за меньшего числа измерений ГЛОНАСС в течение суток. Этот результат обнадеживает тем, что при доведении состава спутниковой группировки ГЛОНАСС до сегодняшнего состава GPS, точность результатов совместной обработки может повыситься почти в полтора раза. Варьирование СКО GPS наблюдений более стабильно во времени, чем у ГЛОНАСС. Распределение СКО для варианта совместной обработки GPS+ГЛОНАСС свидетельствует о его предпочтении по отношению к обработке только GPS наблюдений.

Общим положительным результатом эксперимента является в целом достаточно высокая точность определения векторов базовых линий данной конкретной сети геодинимического назначения – порядка 1 мм. Это свидетельствует о том, что суточные сеансы непрерывных ГНСС наблюдений могут обеспечивать высокие требования, предъявляемые, например, при мониторинге устойчивости радиационно опасных объектов, в отличие от более частых часовых сеансов, за счет компенсации внутрисуточных периодических ошибок систематического характера.

4. Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2014-0015

Номер госрегистрации: 115012960029

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

4.1. Введение

Предложены новые методы исследования случайных геофизических процессов. На примере случайных блужданий с разными скоростями и случайной перемежаемостью режимов блуждания выведены и решены уравнения, позволяющие учесть стохастическую природу распространения загрязнений по поверхности. Показано, что скорость расплывания диффузионного пятна отличается от предсказаний обычного уравнения диффузии за счет конечной вероятности больших смещений (аномальная диффузия). На примере эволюции случайного графа показана эффективность применения эволюционных уравнений. Их использование позволяет полностью разрешить проблему образования гигантских структур в нелинейных динамических процессах. Методы дискретного математического анализа модифицированы с целью предсказания трендов и других характеристик случайных процессов для случаев, когда случайный геофизический процесс не задается определенной функцией и задачи фильтрации данных не могут быть поставлены. Введено понятие регрессионных производных, играющих ту же роль что и обычные производные, но позволяющие оперировать со случайными наборами данных. Приведены примеры использования метода. В тех случаях когда за случайным геофизическим процессом стоит некий строго определенный, но зашумленный геофизический процесс построен метод эффективного устранения шумов. Приведены примеры использования метода.

Результаты работ по проекту: Созданы общие вероятностные методы анализа геофизических процессов основанные на использовании марковской цепочки уравнений. Методы оказались крайне эффективны для анализа эволюции популяций, теории образования гигантских компонент в случайных графах, теории прохождения электромагнитных волн через дисперсные системы. Выяснена роль плазмозольных частиц и ридберговских комплексов в распространении и генерации радиоволн в ионосфере. Именно, показано, что заряженные частицы могут рассеивать электромагнитные волны за счет плазменных колебаний поверхностных зарядов, а ридберговские комплексы эффективно излучают на радиочастотах за счет квантовых переходов внутри группы энергетических уровней с одинаковым орбитальным моментом. Предложены и применены эффективные методы обработки данных по временному ходу геомагнитного поля с помощью регрессионных производных. Новые фильтрационные модели использованы для анализа временного хода геомагнитного поля. Стохастические дифференциальные уравнения применены для анализа динамики возникновения гигантской компоненты в случайном графе.

4.2. Случайные графы

Решение задачи об эволюции случайного графа исключительно важно для геофизических приложений, так как процесс эволюции случайных графов позволяет моделировать такие важные явления как растрескивание коры, формирование речных систем, динамику залежей полевых ископаемых и др. До сих пор подход к этой проблеме базировался на использовании комбинаторного анализа. Мы используем аппарат эволюционных уравнений.

Пусть есть граф порядка M содержащий N связных компонент. Каждая компонента характеризуется ее порядком g и числом заполнения ребер ν . Ясно, что $g-1 \leq \nu \leq g(g-1)/2$. Минимальное значение ν соответствует дереву порядка g , а максимальное – числу ребер в полном графе порядка g . Отдельная вершина тоже рассматривается как связный граф порядка 1.

Любое состояние графа задается набором чисел заполнения

$$Q = \{n_{g,\nu}\},$$

где $n_{g,\nu}$ – число связных компонент порядка g содержащих ν ребер (g, ν – компонента).

Рассмотрим первоначально пустой граф порядка M (просто M вершин) и начнем добавлять к этому графу ребра (одно ребро в единицу времени). Такой процесс ведет либо к объединению двух связных компонент

$$(l, \lambda) + (m, \mu) \rightarrow (l+m, \lambda+\mu+1),$$

либо к заполнению одной компоненты добавочным ребром

$$(g, \nu) \rightarrow (g, \nu+1).$$

Таким образом граф эволюционирует за счет изменения числа связных компонент, их порядка и степени заполнения. Эффективность слияния пропорциональна lm , числу способов соединить две связные компоненты одним ребром. Эффективность заполнения одной компоненты добавочным ребром пропорциональна $g(g-1)/2 - \nu$, числу свободных мест для концов ребра.

Введем вероятность $W(Q, t)$ застать граф в состоянии Q в момент времени t и производящий функционал этой вероятности.

$$\Psi(X, t) = \sum_Q W(Q, t) \prod_{g,\nu} x_{g,\nu}^{n(g,\nu|Q)},$$

где $n(g, \nu|Q)$ – числа заполнения $n_{g,\nu}$ принадлежащие заданному состояний Q и $X = \{x_{g,\nu}\}$ – набор независимых формальных переменных. Функционал Ψ подчиняется уравнению

$$V \frac{\partial \Psi}{\partial t} = (L_f + L_c) \Psi.$$

Здесь множитель V задает масштаб времени. В теории коагуляции V – полный объем системы. Правая часть этого уравнения содержит два дифференциальных оператора L_f and L_c . Оператор L_f отвечает за эволюцию заполнения связных кластеров.

Нами сформулировано точное решение такой задачи для произвольного начального спектра объекта и дан его скэйлинг-анализ вблизи критической точки (момента времени образования гигантского кластера). Именно это явление и изучается в проекте. Спонтанное образование суперкластера – это фазовый переход второго рода, роль параметра порядка в котором играет его масса, строго равная нулю в докритической области. Оказывается, вблизи критической области масса и другие моменты распределения кластеров по размеру ведут себя как степенные функции разности между текущим и критическим временем, причем соответствующая зависимость разная до и после критического момента (рис. 4.1).

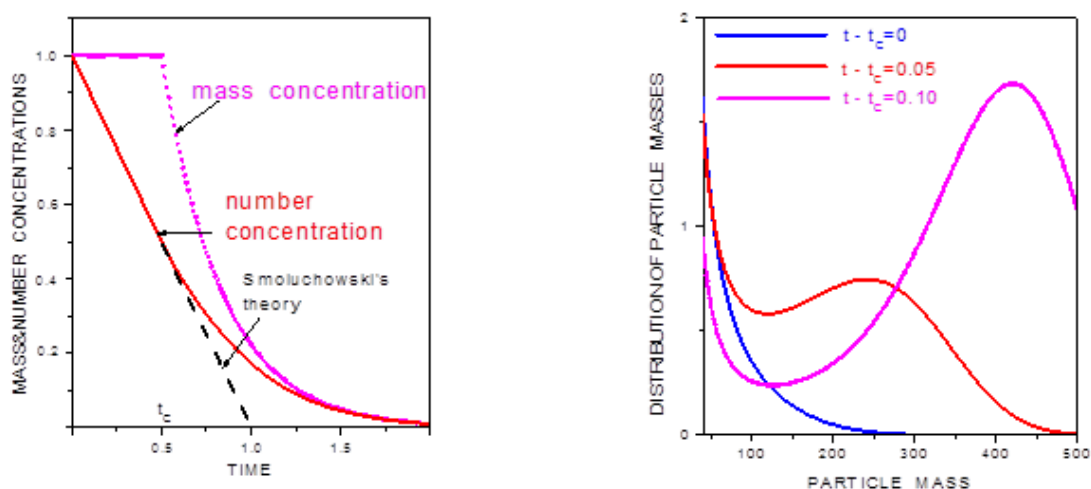


Рисунок 4.1 – Динамика возникновения суперграфа

4.3. Регрессионные производные и регрессионное сглаживание

В последнее время в ДМА построены регрессионные касательные для произвольной дискретной функции, заданной в общем случае на нерегулярной сетке. Результаты они дают аналогичные обычным производным в регулярном случае.

Значение касательной в точке дает правильное значение функции в ней, то есть сглаживание, но уже другое регрессионное (чем больше кубиков, тем лучше).

Пусть функция $y = f(x)$ дифференцируема в нуле; $f_{\Delta}(x)$ – ограничение f на отрезок $[-\Delta, \Delta]$. Вычислим проекцию $\text{pr} f_{\Delta}$ на линейное подпространство $\text{Lin}_2(-\Delta, \Delta)$ линейных функций в гильбертовом пространстве $L^2(-\Delta, \Delta)$.

Для этого воспользуемся процессом ортогонализации Грама-Шмидта к базису $(1, x)$:

$$e_1 = c; \|e_1\|_{\Delta} = 1 \Leftrightarrow \int_{-\Delta}^{\Delta} e^2 dx = 1; c^2 = \frac{1}{2\Delta}$$

$$1. e_2 = ax + b; (e_2, e_1) = \int_{-\Delta}^{\Delta} (ax + b)c = 0 \Leftrightarrow \int_{-\Delta}^{\Delta} (ax + b)dx = 0$$

$$\int_{-\Delta}^{\Delta} ax dx + \int_{-\Delta}^{\Delta} b dx = a \frac{x^2}{2} \Big|_{-\Delta}^{\Delta} + 2\Delta b = 0 \Rightarrow b = 0.$$

$$2. \|e_2\| = 1 \Leftrightarrow \int_{-\Delta}^{\Delta} a^2 x^2 dx = a^2 \frac{x^3}{3} \Big|_{-\Delta}^{\Delta} = \frac{2\Delta^3}{3} 3a^2 = 1 \Rightarrow a^2 = \frac{3}{2\Delta^3}$$

$$\text{Теперь проекция } \text{pr } f_{\Delta} = (f_{\Delta}, e_1)e_1 + (f_{\Delta}, e_2)e_2 = \frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x) dx + \frac{3}{2\Delta^3} \left(\int_{-\Delta}^{\Delta} xf(x) dx \right) x.$$

Первый член $\frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x) dx \rightarrow f(0)$ (теорема о среднем).

Коэффициент при x . Воспользуемся дифференцируемостью $f(x)$:
 $f(x) = f(0) + f'(0)x + \alpha(x)x$, где $\alpha(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow 0$.

$$\frac{3}{2\Delta^3} \left(\int_{-\Delta}^{\Delta} xf(x) dx \right) x = \frac{3}{2\Delta^3} \left(\int_{-\Delta}^{\Delta} x(f(0) + f'(0)x + \alpha(x)x) dx \right) x$$

$$1. \frac{3}{2\Delta^3} \int_{-\Delta}^{\Delta} xf(0) dx = 0$$

$$2. \frac{3}{2\Delta^3} f'(0) \int_{-\Delta}^{\Delta} x^2 dx = f'(0)$$

$$3. \int_{-\Delta}^{\Delta} \alpha(x)x^2 dx = o(\Delta^3) \quad (\forall \varepsilon > 0 \exists \Delta(\varepsilon) : \forall \Delta < \Delta(\varepsilon) |\alpha(x)| < \varepsilon \Rightarrow$$

$$\left| \int_{-\Delta}^{\Delta} \alpha(x)x^2 dx \right| < \varepsilon \frac{2\Delta^2}{3}.$$

$$\text{Вывод: } \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left(\int_{-\Delta}^{\Delta} xf(x) dx \right) \frac{3}{2\Delta^3} = f'(0)$$

Ниже приведены примеры вычисления производных для гладких и зашумленных временных рядов. На рисунке 4.2 показанной временной ряд и соответствующая ему первая производная.

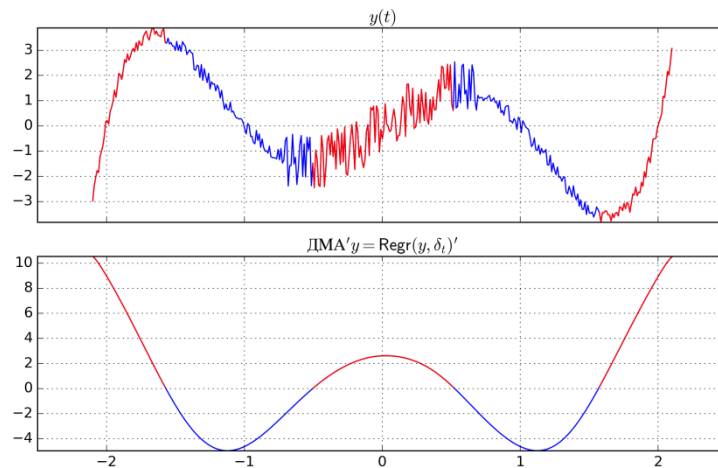


Рисунок 4.2 – Зашумленный временной ряд и его производная

На основе регрессионных производных в ДМА построены регрессионные касательные для произвольной дискретной функции, заданной в общем случае на нерегулярной сетке.

4.4. Разработка системы алгоритмов для задач фильтрации сигналов

Основа разработанного здесь похода к созданию системы алгоритмов базируется на реализации снижения временных затрат для задач вычисления параметров моделей.

Рассмотрим возможности снижения временных затрат при решении задачи построения локальных синусоидальных аппроксимационных моделей за счёт использования возможных больших объёмов оперативной памяти ЭВМ.

Положим, что заданы локальные наблюдения $y(Ti)$, $i = 0, 1, \dots, N-1$, N - число наблюдений, T - шаг дискретизации. Локальную кусочно синусоидальную модель представим в виде $y_M(c, Ti) = a \cos \omega Ti + b \sin \omega Ti$, где $c^T = (a, b, \omega)$ – вектор параметров модели. Сведём нахождение оптимальных параметров модели к задаче минимизации функционала $S(c, y)$

$$S(c, y) = \sum_{i=0}^{N-1} (y(Ti) - y_M(c, Ti))^2, \quad c^\circ = \arg\{\min_c S(c, y)\}.$$

Вычисление c° в данном случае реализуем на основе решения соответствующих систем линейных уравнений второго порядка. Реализуем двухэтапную минимизацию. На первом этапе зафиксируем частотный параметр ω ; приведём выражения для весовых коэффициентов, коэффициентов Фурье и оценок частично оптимальных параметров. На втором этапе вычислим остаточную сумму $S_0(\omega, y)$ и произведём её минимизацию.

В дискретном случае организуем поиск по частоте, зададим последовательность частот $\omega_k, k = 1, \dots, k_f$, вычислим значения $S_0(\omega_k, y)$; найдём оптимальный индекс k° и оптимальные параметры

$$k^\circ = \arg\{\min_k S_0(\omega_k, y)\}, \quad \omega^\circ = \omega_{k^\circ}, \quad a^\circ = a^\circ(\omega_{k^\circ}), \quad b^\circ = b^\circ(\omega_{k^\circ}).$$

Видим, что нахождение коэффициентов Фурье и оценок параметров рассматриваемой модели приводит к линейным операциям над наблюдениями

$$b_{01}(\omega_k) = \sum_{i=0}^{N-1} y(Ti) \cos \omega_k Ti, \quad b_{02}(\omega_k) = \sum_{i=0}^{N-1} y(Ti) \sin \omega_k Ti,$$

$$a^\circ(\omega_k) = \sum_{i=0}^{N-1} c_{1,ki} y(Ti), \quad b^\circ(\omega_k) = \sum_{i=0}^{N-1} c_{2,ki} y(Ti), \quad k = 1, \dots, k_f.$$

Очевидно, предложенное преобразование алгоритма, которое сводится к предварительному вычислению одномерных и двумерных массивов и размещению их в оперативной памяти ЭВМ, возможно, достаточно большого объёма, и реализации вычислений. На рисунке 4.3 представлены результаты тестирования.

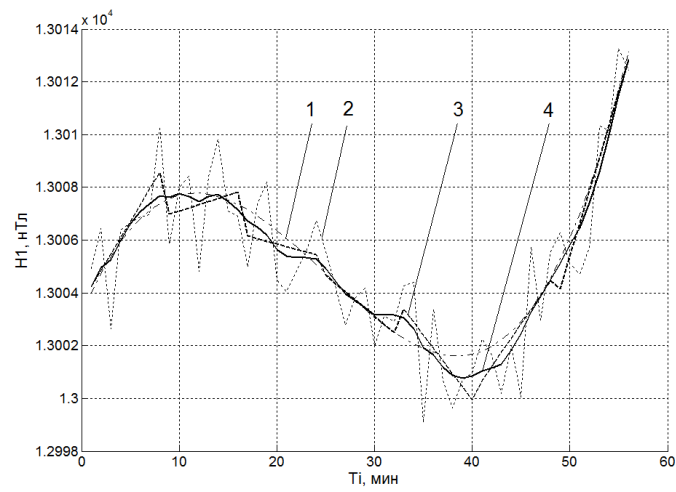


Рисунок 4.3 – Результаты тестирования алгоритма на модельных наблюдениях

5. Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2014-0014

Номер госрегистрации: 115021010261

Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

5.1. Поставленные задачи и степень их выполнения

Проект выполнялся в рамках Подраздела "Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов". Цели проекта состояли в исследовании связи геомагнитных возмущений и параметров солнечной активности с эволюцией магнитного поля Солнца, а также в оценке влияния условий межпланетной среды и процессов в нижней атмосфере на параметры верхней атмосферы Земли. В рамках проекта решены следующие задачи: разработан новый физически обоснованный метод выявления сигналов экстремальной солнечной активности в высокоширотных геомагнитных данных; выявлен геомагнитный параметр, являющийся индикатором высокоскоростных потоков солнечного ветра; усовершенствовать математические методы формализации динамики изменения геомагнитного поля; проведен анализ векового хода и более высокочастотной изменчивости компонент геомагнитного поля на полярных и авроральных обсерваториях северного и южного полушарий. Было запланировано опубликовать полученные результаты не менее, чем в 3 статьях в научных журналах, входящих в WoS/Scopus/РИНЦ.

Задачи проекта выполнены полностью, запланированные результаты получены. В 2015–2017 гг. опубликовано 6 статей: 2015 г. – 2 статьи, 2016 г. – 2 статьи, 2017 г. – 2 статьи. Результаты соответствуют мировому уровню.

Параметры солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) определяется эволюцией магнитного поля Солнца, которое изменяется в ходе 22-летнего магнитного солнечного цикла (СЦ), 11-летнего СЦ и при более долгопериодных колебаниях. Наибольшие значения скорости СВ наблюдаются на фазе спада 11-летнего СЦ, когда высокоскоростные потоки ВСП выходят из приэкваториальных солнечных коронарных дыр, которые находятся в плоскости эклиптики. По мере распространения в космическом пространстве ВСП сжимают более медленный фоновый СВ, и так формируются области фронтов скорости (CIR). Выбросы корональной массы (СМЕ) и CIR вызывают повышения геомагнитной активности, магнитные бури и суббури, при этом СМЕ вызывают наиболее интенсивные и короткие магнитные бури, а CIR и связанные с ними альвеновские волны – более слабые, но продолжительные бури. Таким образом, скорость СВ является одним из основных факторов взаимодействия СВ с магнитосферой Земли. Высокоскоростные потоки СВ вызывают большие геомагнитные возмущения, особенно в высоких широтах земного шара.

Прямые спутниковые измерения параметров ММП и СВ осуществляются с середины 1960-х несколькими поколениями спутников. Реконструкция значений ММП и СВ в

доспутниковую эпоху возможна только по косвенным данным. Геомагнитная активность является наиболее прямым индикатором солнечной активности. Попытки реконструкции предпринимались неоднократно в основном по данным среднеширотных обсерваторий. Результаты оказывались весьма приблизительными, особенно это касалось максимальных значений скорости СВ на спаде солнечных циклов. Мы предложили и физически обосновали новый метод реконструкции скорости СВ по длинным рядам геомагнитных данных высокоширотных обсерваторий. Этот метод позволяет реконструировать скорость СВ с большей точностью и, как показывает сравнения с данными прямых измерений за последние 50 лет, адекватно воспроизводит экстремальные значения скорости СВ в каждом солнечном цикле.

Сравнение распределения высокоскоростных потоков и числа солнечных пятен показывает, что хотя в среднем скорость увеличивается с долговременной эволюцией солнечной активности, частота появления коронарных дыр остается постоянной. Удалось обнаружить экстремальные высокоскоростные потоки на спаде цикла 18, что является экспериментальным подтверждением современной теории солнечного динамо, в рамках которой цикличность солнечной активности интерпретируется как последовательное преобразование полоидальной и тороидальной конфигурации магнитного поля Солнца.

Периоды экстремально низкой солнечной активности также представляют большой интерес с точки зрения исследования внутриатмосферной изменчивости. Во время пониженной солнечной активности в 24-м цикле сложились благоприятные условия для обнаружения в движении нейтральной компоненты в нижней ионосфере. Высокоширотная средняя атмосфера и мезосфера/нижняя термосфера характеризуется сильной изменчивостью, высокой динамической активностью и тем, что на нее оказывается влияние снизу (из стратосферы) и сверху (из магнитосферы). Межгодовая изменчивость, климатологические средние ветровые и приливные поля в северной полярной мезосфере/нижней термосфере на высотах 80–100 км изучались с использованием наблюдений метеорного радара, который непрерывно работал во время с декабря 2008 года на геофизической обсерватории Соданкюля (67N, 26E).

5.2. Новый метод реконструкции скорости солнечного ветра по данным высокоширотных геомагнитных обсерваторий

Высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) по сравнению с другими параметрами солнечной активности вызывают магнитосферные суббури наибольшей интенсивности. В высокоширотной ионосферной токовой системе доминирует суббуревой ионосферный западный авроральный электроджет (WEJ). Мы предложили новый метод реконструкции среднегодовых и среднемесячных значений скорости СВ по геомагнитному параметру, который является индикатором интенсивности WEJ. По данным полярной обс. Годхавн и авроральной обс. Соданкюля мы рассчитали значения скорости СВ, начиная с 1914 г. Таким образом был получен более чем столетний ряд скорости СВ. Показано, что за период спутниковых измерений коэффициент корреляции между скоростью СВ и геомагнитным индикатором интенсивности WEJ превосходит коэффициенты для всех предложенных ранее функций геомагнитных параметров.

Анализ наиболее длинных существующих рядов геомагнитных наблюдений в высоких широтах показал, что было два экстремальных события ВСП: в 2003 г. (солнечный цикл 23) и 1952 г. (солнечный цикл 18). После экстремальных ВСП в 1952 г. последовал исключительно высокий солнечный максимум цикла 19, который был вершиной современного 100-летнего солнечного "гранд-максимума". Тот факт, что удалось обнаружить экстремальные ВСП в 1952 г., является экспериментальным подтверждением современной теории солнечного динамо, в рамках которой цикличность солнечной активности интерпретируется как последовательное преобразование полоидальной и тороидальной конфигурации магнитного поля Солнца в 22-летнем цикле. Изменение тороидального поля просходит в фазе с изменением числа солнечных пятен, и эволюция этого поля прослеживается на большом интервале времени. Полоидальное поле изменяется приблизительно в противофазе с тороидальным полем и его интенсивность обуславливает высокоскоростные потоки, исходящие из коронарных дыр. Таким образом, скорость СВ является индикатором величины полоидального поля, но прямые измерения скорости начались только в середине 1960-х годов. Полученные нами результаты впервые дают экспериментальное подтверждение того, что на пике "гранд-максимума" исключительно мощному тороидальному полю 19-го солнечного цикла предшествовало не менее мощное полоидальное поле.

Предложенный метод – единственный, который позволяет восстановить экстремальные значения скорости СВ, а не только средней интенсивности. Так, его результаты хорошо совпадают со скоростью, измеренной спутником в 2003 г., а также в предыдущие годы ВСП. Предлагаемый новый метод основан на анализе данных не среднеширотных, а полярных обсерваторий. Мы показали, что ВСП вызывают суббури большой интенсивности, тогда как бури, инициированные коронарными выбросами массы (СМЕ) с кольцевым током (Dst индекс). При бурях, инициированных ВСП, понижение Dst сравнительно небольшое, и доминирует суббуревой западный электроджет. В среднеширотных же данных присутствуют в равной мере эффекты и СМЕ, и ВСП. Поэтому по ним не удастся получить корректные значения скорости СВ, и они получаются заниженными, и тем больше, чем мощнее ВСП.

В качестве параметра, который наилучшим образом коррелирует со скоростью СВ, было выбрано значение разности между амплитудой геомагнитного возмущения, вызываемого WEJ, и значением спокойного поля, усредненной по 5 наиболее спокойным дням каждого месяца. В полярной шапке этот параметр – амплитуда вариации вертикальной геомагнитной компоненты Z. В авроральной зоне – это амплитуда вариации горизонтальной, направленной на север компоненты H. При этом выбираются только значения, соответствующие ночным часам местного времени.

Таким образом, мы реконструируем скорость СВ по параметру, который является индикатором интенсивности WEJ. Параметр "delta" Z представляет собой разность между наиболее возмущенным и наиболее спокойным годовыми уровнями вертикальной геомагнитной компонентой в полярной шапке. Полярная обсерватория Годхавн (код GDH) имеет ряд данных наблюдений с 1926 г. Аналогичные результаты по реконструкции скорости СВ получены, если использовать параметр delta H для

авроральных станций. Авроральная обсерватория Соданкюля (код SOD) имеет ряд данных наблюдений с 1914 г.

Корреляция среднегодовых значений индекса "delta" и скорости СВ достигает 0.8. Для среднемесячных значений индекса коэффициент корреляции имеет сезонную вариацию и изменяется от 0.7 до 0.9. Основные результаты реконструкций по предложенному методу с помощью индекса "delta" опубликованы в работах [Mursula *et al.*, 2015; 2016; Lukianova *et al.*, 2012, 2017; Lukianova, 2016].

Разработанный метод и предложенный геомагнитный индикатор скорости СВ позволяет восстановить экстремальные значения ВСП, а не только средней скорости. Так, результаты хорошо совпадают с скоростями СВ, измеренными спутником в 2003 г., а также в предыдущие годы ВСП. В интервале 1965–2009 гг. имеется хорошее согласие между обеими линиями, что дает основания считать значения скорости СВ, полученные для предшествующих лет, достаточно достоверными. Более того, коэффициент корреляции между измеренной скоростью СВ и $\text{deltaZ}_{\text{GDH}}$ ($\text{cc}=0.8$) превосходит коэффициенты для любых когда-либо предложенных функций геомагнитных данных, которые были получены в предыдущих работах, посвященных восстановлению параметров СВ в прошлом [Lockwood *et al.*, 2009; Svalgaard, Cliver, 2007].

Был проведен анализ временных масштабов корреляции энергии солнечного ветра и магнитосферы на временных масштабах от 1 дня до 1 месяца. Прямых методов наблюдения для определения общей скорости, с которой энергия передается из солнечного ветра в магнитосферу, не существует. В отсутствие прямых измерений, должны быть разработаны альтернативные способы оценки временных масштабов поступления энергии с использованием различных ионосферных и магнитосферных индексов в качестве прокси. Эффективность оценивается по их корреляции с выбранным индексом. На рисунке 5.1 показан ход коэффициента корреляции между скоростью СВ и параметром $\text{delta H}_{\text{SOD}}$ на временных масштабах от 1 до 30 дней для разных сезонов: зимы (месяц 1), весны (месяц 4) и осени (месяц 10). Можно видеть, что коэффициенты постепенно уменьшаются при уменьшении временного масштаба. Вследствие эффекта Рассела-Макферрона более высокие коэффициенты характерны для весенних, а самые низкие – для осенних месяцев. В октябре эффективность поступления энергии почти не меняется на масштабах от 10 до 30 дней. В апреле на 30-дневных масштабах эффективность значительно больше, чем на декадных. Кроме того, на масштабах, меньших, чем 8 дней, наблюдается резкое падение корреляции для всех сезонов. Этот факт может быть обусловлен тем, что именно на этих масштабах начинает работать механизм высвобождения энергии, уже накопленной в магнитосфере, а не только энергии, поступающей непосредственно из СВ.

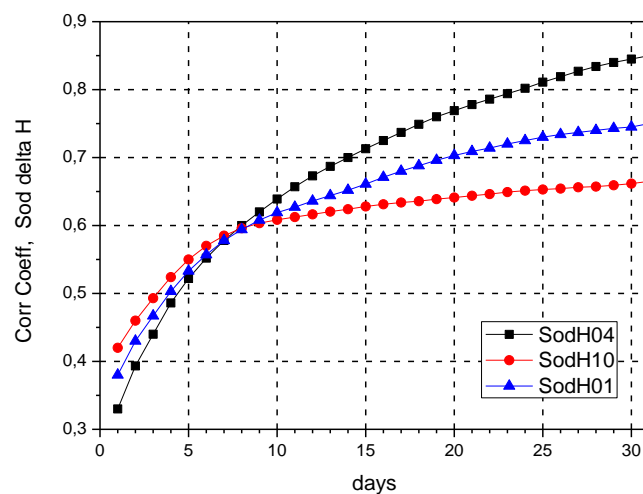


Рисунок 5.1 – Изменение коэффициента корреляции между скоростью СВ и параметром delta H SOD на временных масштабах от 1 до 30 дней для января, апреля и октября

6. Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0006

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610079-9

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов

6.1. Введение

Настоящее исследование является частью Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № I.4П "Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче" и направлено на развитие современных эффективных пользовательских инструментов для решения задач сбора, хранения, представления и анализа обширных баз геопространственных данных по геофизике и геологии. Разработанные в ходе проекта средства позволяют использовать пространственную и атрибутивную информацию о геолого-геофизических параметрах с целью получения новых знаний о минерально-сырьевых ресурсах России. В ходе исследований были использованы современные подходы к созданию веб-ориентированных ГИС с применением сетевых технологий передачи пространственной информации, инфраструктуры пространственных данных, клиент-серверных технологий и др.

6.2. Тематическая база геоданных проекта

6.2.1. Геопространственные данные

База геопространственных данных (БД), сформированная в ходе проекта в 2015—2017 гг., включает в себя цифровые векторные и растровые тематические карты по различным дисциплинам. БД включает в себя серию геологических карт масштаба 1:2 500 000 на территорию России и ее отдельные регионы и наборы данных по геофизике: растровые карты, построенные на основе моделей гравитационного поля EGM2008 и EIGEN-6с2 [Förste et al., 2012; Pavlis et al., 2012]; карты аномального гравитационного поля, создаваемого осадочным чехлом и плотностными неоднородностями консолидированной коры [Kaban, 2001; Kaban et al., 2012]; карты изостатических аномалий гравитационного поля [Kaban, 2001; Kaban et al., 2004]; карты глубин границы Мохоровичича [Soloviev, 2016]; карты мощности осадочного чехла [Kaban, 2001; Kaban, 2002]. В ходе проекта в качестве внешних картографических сервисов в БД были включены: карта четвертичных образований территории России [Петров и др., 2014] и карта крупнейших месторождений мира [Ткачев и др., 2015]. Для гибкого и удобного доступа они объединены в отдельные картографические сервисы и опубликованы на ГИС-сервере ГЦ РАН [Красноперов, Соловьёв, 2015; Красноперов и др., 2016]. Доступ к данным осуществляется средствами специализированного геопортала.

В 2017 г. в БД была включена тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов масштаба 1:1 500 000, гл. ред. Л.П. Карсаков и Чжао Чуньцин (рис. 6.1) [Карсаков и др., 2005].



Рисунок 6.1 – Тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов масштаба 1:1 500 000 [Карсаков и др., 2005]. Отображение средствами сетевого сервиса ArcGIS.com

Данная тектоническая карта является продуктом совместных исследований Института тектоники и геофизики (ИТиГ) им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН и Шэньянского института геологии и полезных ископаемых. Оригинальная карта и ее легенда оформлены на английском языке. Карта была передана в ГЦ РАН специалистами ИТиГ ДВО РАН. При составлении тектонической карты были использован ряд изданных ранее геологических карт различных масштабов (1:500 000—1:2 500 000). Также в качестве источников данных были использованы опубликованные схемы расчленения и корреляции геологических образований и другие картографические материалы для территории юга Дальнего Востока России и сопредельных северо-восточных районов Китая [Карсаков и др., 2005].

6.2.2. Метаданные

В ходе исследований особое внимание было уделено созданию базы метаданных для пространственных слоев, хранящихся в БД. На каждый из тематических слоев, составляющих сервис оформляются подробные метаданные. Они готовятся в соответствии со спецификацией ISO 19139. Метаданные представляют собой файлы в формате XML и содержат исчерпывающую справочную информацию о слое: аннотацию, библиографические ссылки, расшифровку полей атрибутивной таблицы и т.п. Доступ к метаданным осуществляется при помощи специального инструмента геопортала в разделе с легендой. Эта функция вызывает в отдельном окне соответствующую HTML-страницу с метаданными выбранного слоя (рис. 6.2). Очевидное преимущество данного подхода заключается в большей информативности метаданных. Страницы, автоматически генерируемые на основе описания картографического сервиса, имеют ограниченный набор полей и дают лишь его общее описание. В данном случае пользователь может ознакомиться с описанием не только самого сервиса, но и составляющих его картографических слоев.

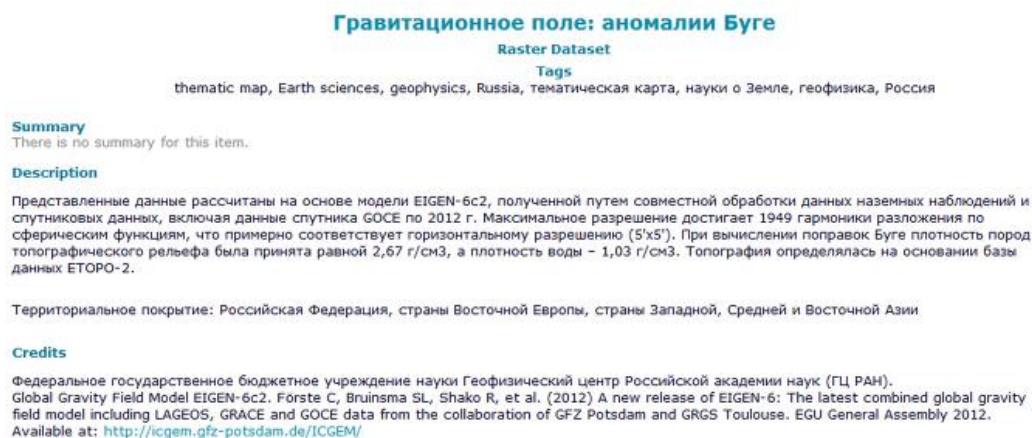


Рисунок 6.2 – HTML-страница с метаданными слоя "Гравитационное поле: аномалии Буге", вызванная через клиентское приложение

6.3. Геопортал проекта

Взаимодействие пользователя с картографическими сервисами осуществляется средствами специализированного геопортала (<http://geology-gis.gcras.ru/>). Основой геопортала является разработанное клиентское приложение, размещенное на веб-сервере. Через него происходит обращение к картографическим сервисам и сервисам геообработки, опубликованным на ГИС-сервере. Приложение предоставляет пользователю список доступных пространственных данных и набор инструментов геообработки, которые можно к ним применять [Soloviev et al., 2016].

Для реализации клиентского приложения был выбран язык JavaScript, язык разметки HTML, а также формальный язык описания внешнего вида документа CSS. Весь основной функционал пользовательского приложения написан с использованием мощной библиотеки ArcGIS API for JavaScript, которая позволяет не только легко работать с картами в веб-приложениях, но и производить обмен данными при помощи REST API с ГИС-серверами на базе ArcGIS for Server и сервисами ArcGIS Online [Fu, 2016]. В основе этой библиотеки лежит фреймворк Dojo Toolkit. Dojo — это открытая библиотека для языка JavaScript, построенная на основе подхода асинхронной загрузки модулей. Это повышает читаемость кода и позволяет значительно ускорить загрузку веб-страницы, так как модули загружаются одновременно с остальным контентом сайта [Russell, 2008].

Элементы интерфейса приложения включают в себя основное меню, интерактивную карту и текущую легенду. Пользователь взаимодействует с приложением с помощью инструментов основного меню. Для удобства они сгруппированы в отдельные вкладки: "Базовые карты", "Опции", "Список геоданных", "Алгоритмы", "Поиск" и "Результаты". Инструменты геообработки [Soloviev et al., 2016], опубликованные на ГИС-сервере, доступны пользователю через вкладку "Алгоритмы". Они добавляются в приложение администратором системы. Инструмент поиска по базе геоданных доступен в соответствующей вкладке "Поиск". Данный инструмент производит тематический поиск по названиям и метаданным сервисов. Если поиск успешен, то результаты в виде отобранных слоев, соответствующих запросу, выдаются пользователю в этой же вкладке. Интерактивная карта является основным инструментом визуализации пространственных данных. Она имеет стандартные элементы управления для изменения масштаба

отображения. Легенда карты представлена справа. Она формируется динамически на основе легенд выбранных картографических слоев. Легенда также снабжена переключателем порядка отображения слоев. Это позволяет подключать интересующие слои в любом порядке, регулируя порядок их прорисовки данным инструментом. Также пользователю доступна возможность изменения прозрачности отображаемых слоев. Причем она настраивается независимо для каждого из активных слоев.

Приложение также предоставляет функцию просмотра данных из атрибутивной таблицы слоя (рис. 6.3). При выделении интересующего объекта появляется окно с подробной информацией. При этом объект может быть как точечным, так и полигональным. Эта функция предоставляет широкие возможности для взаимодействия с атрибутивной информацией слоя. Это особенно удобно при работе со слоями, отражающими характеристики месторождений полезных ископаемых. В атрибутивных данных также могут содержаться гиперссылки на внешние ресурсы (например, схемы разрезов, текстовые документы и т.п.). Данная функция отсутствует в стандартном картографическом веб-приложении ESRI ArcGIS Online.

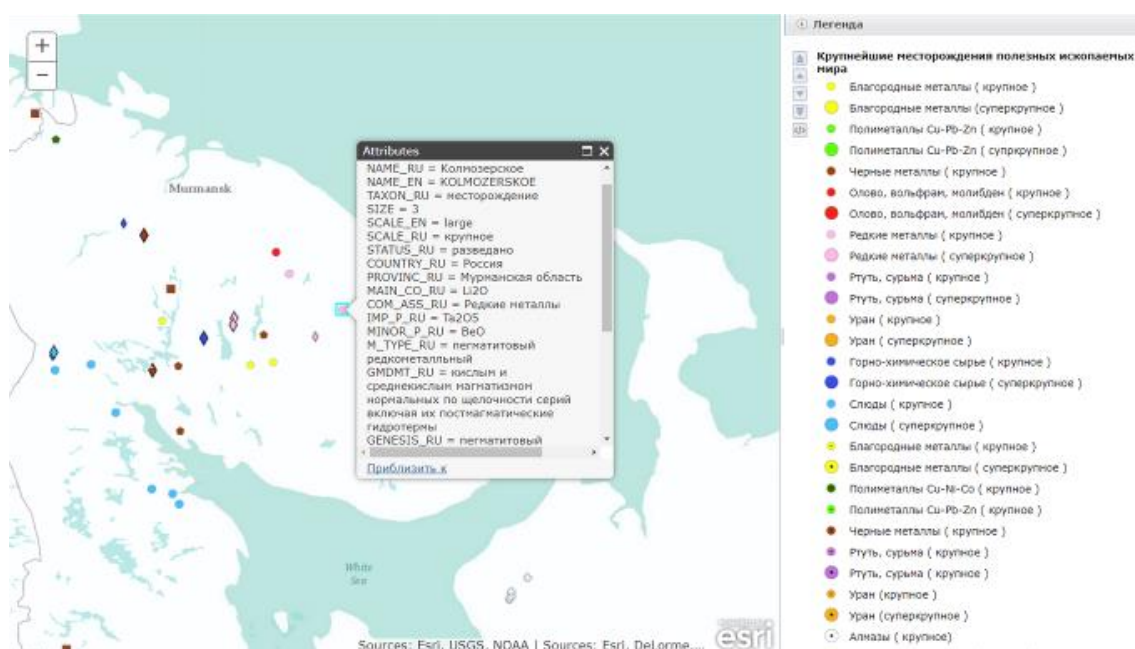


Рисунок 6.3 – Представление атрибутивной информации элемента карты из слоя "Крупнейшие месторождения полезных ископаемых мира" [Ткачев и др., 2015]

Список использованных источников

- Карсаков Л.П., Чжао Ч. и др. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-азиатского и Тихоокеанского поясов. Объяснительная записка к Тектонической карте масштаба 1:1 500 000. — Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, 2005.
- Красноперов Р.И., Соловьёв А. А. Аналитическая геоинформационная система для комплексных геолого-геофизических исследований на территории России // Горный журнал, 2015, № 10, С. 89-93. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.16
- Красноперов Р.И., Соловьев А.А. и др. Интерактивное веб-приложение для комплексного изучения пространственной информации по наукам о Земле с использованием базы

геоданных ГЦ РАН // Исследования по геоинформатике, 2016, Т. 4, № 1. DOI: 10.2205/2016BS039

Петров О.В., Морозов А.Ф. и др. Карта четвертичных образований территории Российской Федерации масштаба 1: 2 500 000. СПб.: ФГУП "ВСЕГЕИ", 2014.

Ткачев А.В., Булов С.В. и др. Веб-ГИС "Крупнейшие месторождения мира" // Геоинформатика, 2015, № 1, С. 47-59.

Förste C., Bruinsma S.L. et al. A new release of EIGEN-6: The latest combined global gravity field model including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // Geophysical Research Abstracts, 2012, Vol. 14. EGU2012-2821

Fu P. Getting to Know Web GIS, 2016.

Kaban M. A. Gravity Model of the North Eurasia Crust and Upper Mantle: 1. Mantle and Isostatic Residual Gravity Anomalies // Russian Journal of Earth Sciences, 2001, Vol. 3, № 2, P. 25-144. DOI: 10.2205/2001ES000062

Kaban M.K. A gravity model of the north Eurasia crust and upper mantle: 2. The Alpine-Mediterranean fold belt and adjacent structures of the southern former USSR // Russian Journal of Earth Sciences, 2002, Vol. 4, № 1. DOI: 10.2205/2002ES000082

Kaban M., Stolk W. et al. Density structure of the crust and upper mantle of Asia // International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems GGHS, 2012. S7-038

Kaban M.K., Schwintzer P. et al. A new isostatic model of the lithosphere and gravity field, Journal of Geodesy, 2004, P. 368-385.

Pavlis N.K., Holmes S.A. et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal of Geophysical Research, Vol. 117, 2004. B04406, DOI: 10.1029/2011JB008916

Russell M. Dojo: The Definitive Guide, 2008.

Soloviev A.A., Zharkikh J.I. et al. GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform // Russian Journal of Earth Sciences, 2016, Vol. 16, № 6. DOI: 10.2205/2016ES000587

Stolk W., Kaban M.K. et al. High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas // Tectonophysics, 2013, Vol. 602, P. 55-68. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.01.022

7. Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0011

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610085-0

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

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

В рамках третьего (завершающего) этапа реализации проекта по программе № 1.28П Президиума РАН **"Исследование исторического процесса развития науки и техники в России: место в мировом научном сообществе, социальные и структурные трансформации"** по теме *"Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию"* были подведены суммарные итоги по проекту: апробирован запущенный в эксплуатацию геоинформационный веб-сервис, основой которого стала создаваемая в несколько этапов проекта БД по крупнейшим месторождениям нефти и газа России и мира; проведены не только аналитические исследования по развитию методов разведки и добычи УВ на основе месторождений представленного в рамках работы ГИС-проекта, но и сравнения разработанной БД с другими базами, представленными в сети Интернет.

Итоговым шагом на пути проведения работ по проекту стала визуализация БД на демонстрационном комплексе со сферическим экраном с применением разработанных методов визуализации. Разработанный набор сферических слайдов является важным элементом для проведения оценки развития методов добычи углеводородов в России и других странах мира в 20 веке.

Разработаны методы визуализации базы данных с использованием демонстрационного комплекса со сферическим экраном, а также набор сферических слайдов по оценке развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за период с 1900 по 2000 гг.

7.1. Суммарные результаты проекта

1. Проведено изучение специализированных российских и зарубежных библиографических источников, находящихся в открытом доступе;
2. Разработана БД, представленная в рамках проекта, выполненная в несколько этапов. Первым шагом стала разработка концепции с изучением предметной области и формированием атрибутивных полей – статических и динамических, которые получили развитие в ходе выполнения работ второго этапа;
3. Следующим этапом проекта стала визуализация контента БД, реализуемая в среде Esri ArcGIS (рис. 7.1, 7.2). В результате, все месторождения вместе со всей сопутствующей информацией были представлены в виде геопространственных объектов, отображенных на единой карте, снабженной инструментами работы с данными. Важная составляющая созданной системы для работы с крупнейшими месторождениями УВ – это

специализированный веб-сервис, целью создания которого стало обеспечение удобного для пользователей и алгоритмических приложений доступа ко всему множеству слоев данных, имеющихся в БД;

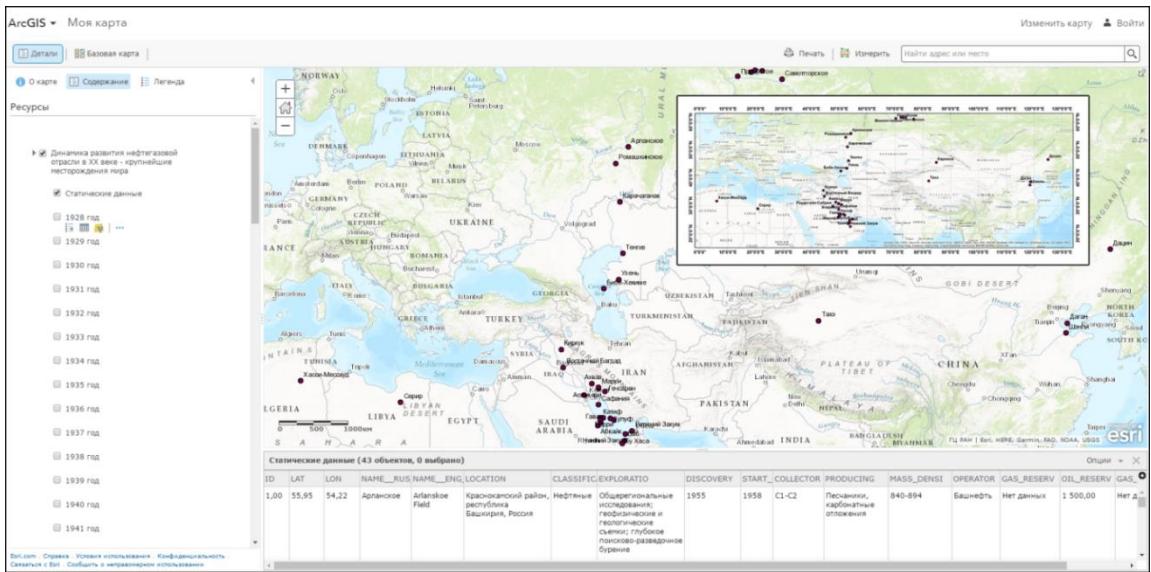


Рисунок 7.1 – Пример отображения статической информации о месторождениях в среде построенного ГИС-проекта (ArcGIS). На карте точками отмечены крупнейшие месторождения УВ, разработка которых началась в 20 веке. В атрибутивной таблице под картой по каждому месторождению доступна информация со статическими параметрами

4. Немаловажным элементом веб-сервиса, который можно выделить в отдельный блок, является его функционал, доступный пользователю посредством портала в режиме онлайн: выбор слоев, просмотр легенды слоев, просмотр атрибутивной таблицы и пр.;

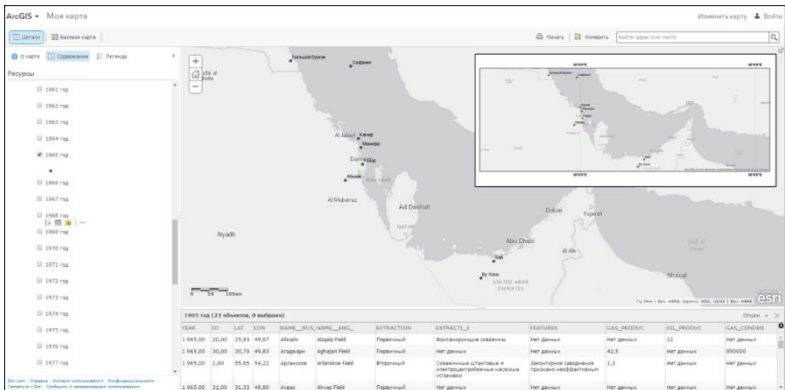


Рисунок 7.2 – Пример отображения динамической информации о месторождениях в среде ArcGIS. На карте точками отмечены крупнейшие месторождения УВ, разработка которых проводилась в 1965 году. В атрибутивной таблице под картой по каждому месторождению доступна информация с динамическими параметрами, актуальными на 1965 год – метод добычи, технология добычи, технологические особенности, дебит скважин

5. Проведение масштабного аналитического исследования по завершению первого и второго этапов проведения работ, разделенного на блоки: *первая часть*

исследования направлена на проведение глобального аналитического исследования с целью оценки становления нефтегазовой отрасли в мире на протяжении 20 века и обозначение ключевых этапов развития; *вторая часть* исследования посвящена оценке роли и места России в развитии науки и техники в области добычи УВ в период с 1900 по 2000 гг.

7.2. Визуализация БД на сферическом демонстрационном экране

Наряду с традиционным плоским экраном, созданная система БД – ГИС-сервис – веб-приложение, оснащена и одним из передовых средств визуализации – цифровым демонстрационным комплексом со сферическим проекционным экраном. Это устройство основано на новой технологии, позволяющей сферически визуализировать растровые изображения, анимацию и видеоматериалы.

В нашей стране технология сферической визуализации успешно развивается в Геофизическом центре РАН (ГЦ РАН). В ГЦ РАН было разработано оригинальное сферовизуализирующее программное обеспечение (ПО) “ORBUS”, по ряду параметров превосходящее американский и китайский аналоги.

7.3. Аппаратно-программная часть демонстрационного комплекса со сферическим экраном

Комплекс представляет собой полый сферический экран диаметром 100 см со специальным напылением, проектор, объектив типа "рыбий глаз" и рабочую станцию со специальным ПО (рис. 7.3). Сферический экран представляет собой полупрозрачный шар из акрила. Шар имеет 2 вида напыления – внутреннее и внешнее: с внешней стороны напыление минимизирует блики на поверхности шара; внутреннее задерживает максимальное количество света (в нашем случае – спроецированного изображения).

Важнейшей составляющей данного комплекса, несомненно, является программное обеспечение (ПО) "ORBUS", непосредственно отвечающее за преобразование исходных данных в традиционном плоском отображении в сферический формат. Оно обеспечивает интерактивную визуализацию данных на сферическом экране, включая возможность их подготовки к визуализации (номер свидетельства на программу для ЭВМ 2014618293 от 14 августа 2014 г.). В качестве объектов, выводимых на сферический экран, могут выступать текстовые надписи, векторные объекты, изображения, видео, бегущая строка и прочее, что позволяет создавать презентации любого уровня сложности. Единственным требованием является наличие географической привязки, которая соответствует либо географическому положению объекта, либо выбирается произвольно с целью визуальной репрезентативности демонстрируемого материала.



Рисунок 7.3 – Пример мобильного проекционного комплекса с твердым сферическим экраном

В 2015 году программа получила широкое развитие, функционал ПО продолжает развиваться по настоящее время. В частности, разрабатываются новые методы и сервисы визуализации, увеличивается количество поддерживаемых форматов исходных данных. Разработана технология построения динамических карт на базе поступающих данных, меняющихся во времени (сейсмических, геомагнитных, гравитационных, метеорологических наблюдений) в режиме реального (квазиреального) времени. Реализована возможность визуализации данных непосредственно из открытых баз данных сети Интернет.

ПО “ORBUS” написано на языке C++. Для трехмерной визуализации на нижнем уровне используется графическая библиотека OpenGL, а поверх него – графический инструмент OpenSceneGraph. Для создания графического интерфейса пользователя используется Qt framework. Приложение может работать под Windows и Linux.

Таким образом, по описанному выше алгоритму была произведена визуализация контента БД на демонстрационном комплексе со сферическим демонстрационным экраном, что позволяет представить месторождения БД максимально репрезентативно и динамично, формируя тем самым правильное комплексное представление о распределении крупнейших месторождений УВ во всем мире (рис. 7.4).

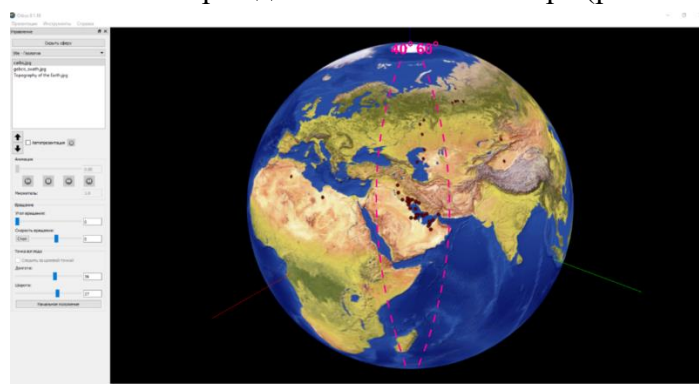


Рисунок 7.4 – Пример работы ПО “ORBUS” визуализации данных по месторождениям УВ на сферическом демонстрационном экране. Точками отмечены крупнейшие месторождения УВ. Проведены 40° и 60° меридианы, между которыми находится большинство представленных месторождений

7.4. Сравнительная характеристика проекта

В Российской академии наук успешно реализуются фундаментальные проекты по сбору, анализу и управлению данными из области наук о Земле различной направленности. Так, например, проводятся исследования в области твердых полезных ископаемых с разработкой базы данных по крупным и суперкрупным месторождениям в Отделе геоинформационных систем Государственного геологического музея им. В. И. Вернадского (ГГМ РАН). Коллектив лаборатории геоинформатики Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН) обеспечивает формирование автоматизированных банков данных для информационного обеспечения геологоразведочных работ в области геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии, геохимии и вулканологии. Группа исследователей Мирового центра данных по физике твердой Земли, функционирующего в Геофизическом центре РАН и являющегося регулярным членом Мировой системы данных (World Data System – WDS, <http://icsu-wds.org/>), занимается накоплением, хранением различных геофизических данных и обеспечивает к ним доступ для проведения научных исследований.

Представленные в среде Интернет зарубежные базы данных по полезным ископаемым несколько отличаются по контенту: широкое распространение имеют сугубо производственные веб-библиотеки, в которых представлены, например, данные по бурению скважин определенных территорий. Кроме того, известны минерагенические базы данных, включающие в себя данные по известным минералам и поддерживаемые Минералогическим сообществом Америки и Минералогической ассоциации Канады. Некоторые из баз данных как по минералам, так и по тектонике, функционируют на платформе специализированных сервисов, созданных для обмена данными между учеными всего мира и оснащенных специальным программным обеспечением, позволяющим визуализировать данные в режиме онлайн. Однако, несмотря на активное развитие направления по созданию баз данных по различным дисциплинам наук о Земле, остается ряд вопросов, которые необходимо решить. Среди них: обеспечение доступа широкому кругу пользователей онлайн; создание новых баз данных с целью привлечения к ним высокого научного и прикладного интереса не только на российском, но и на международном уровне; использование новейших средств визуализации пространственных данных, имеющих географическую привязку, путем создания цифровых карт в ГИС-среде; оснащение подобных баз данных специальными программными инструментами, обеспечивающими пользователю простой и удобный доступ для аналитической работы с представленными данными.

Созданная в рамках проекта система БД – ГИС-сервис – веб-приложение, оснащенная к тому же одним из передовых средств визуализации – цифровым демонстрационным комплексом со сферическим проекционным экраном, позволяет решить все вышеперечисленные задачи. Введенное в эксплуатацию веб-приложение уже больше года успешно функционирует на портале <http://gis.gcras.ru/> и успешно прошло стадию валидации со стороны пользователей. Кроме того, результаты разработки были неоднократно представлены научному сообществу на крупных международных конференциях как российского, так и международного масштабов, в результате чего

также подтвердилась значимость и оригинальность разработанного геоинформационного продукта.

Используя созданный ГИС-проект, можно увидеть закономерность распределения УВ на карте мира, выявить страны-лидеры по добыче, отследить развитие технологий и объемы добычи в каждой стране. Кроме того, ввиду свободного доступа к базе данных, она может стать одним из инструментов, используемых в образовательных целях.

Таким образом, результатом проведения работ по проекту стал многокомпонентный научный продукт, который может служить для проведения аналитических исследований в рамках решения различных образовательных, научных и прикладных задач.

8. Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0013

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610084-3

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

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

8.1. Цели, поставленные задачи и полученные результаты

Выполнение проекта программы Президиума РАН "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" предусматривало решение следующих задач: (*) разработка методики использования данных обсерваторских и спутниковых измерений для составления прогноза и коррекции направления ориентации буровой колонны в условиях спорадических возмущений во время магнитных бурь; (*) исследование индивидуальных и статистических характеристик экстремальных геомагнитных бурь и оценка их влияния на точность подземной ориентации; (*) разработка новых автоматизированных методов оперативной обработки и анализа геомагнитных данных. Фундаментальная задача связана с разработкой новой технологии для подземной навигации при наклонно-направленном бурении глубоких скважин в Арктике. Поставленные задачи выполнены полностью, планируемые на 2017 г. результаты достигнуты. В частности:

- На основе мониторинга геомагнитной активности в 2017 г. выделены периоды магнитных бурь, проведен сравнительный анализ их интенсивности в контексте пространственного распределения возмущений. Показано, что во время бури 7 сентября 2017 г. наибольшие возмущения магнитного поля происходили в европейской части Арктики, а 8 сентября – канадском секторе.

- Построена математическая модель и разработан алгоритм для оценки влияния геомагнитных возмущений, обусловленных магнитной бурей, на фактические геометрические параметры траектории ствола при бурении глубокой наклонно-направленной скважины. Входными параметрами модели являются начальные координаты забоя, длина ствола и радиус допуска, график изменения зенитного угла. Моделируемые параметры включают в себя трехмерные координаты фактического профиля и их приращения на каждом шаге измерений, смещение фактического профиля по горизонтали, азимут смещения и интенсивность искривления ствола.

- Разработан и протестирован программный модуль, реализующий модель.

- Проведены модельные расчеты фактических координат ствола в условиях магнитной бури на примере виртуальных скважин, расположенных на различных широтах в Арктике. Численные оценки показали, что смещение фактического профиля и интенсивность искривления ствола превышают допустимые значения в случае, если вариации магнитного склонения во время бури имеют амплитуду $>2^\circ$.

- Построена статистическая модель наземных вариаций геомагнитного поля в зависимости от параметров солнечного ветра и индексов геомагнитной активности.

- С помощью построения регулярного базисного ряда повышено качество базисной линии при обработке данных магнитных обсерваторий.
- Обновлен сервис построения и анализа данных магнитных обсерваторий в аппаратно-программном комплексе "Магнус".

8.2. Мониторинг возмущений геомагнитного поля в Арктике

Мониторинг возмущений геомагнитного поля в Арктике в 2017 г. проводился с помощью регулярного анализа параметров солнечного ветра по данным спутников (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) и геомагнитных индексов Dst (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>) и AE. (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html>), а также поступающих в режиме реального времени данных российских обсерваторий. Для этого использовался аппаратно-программный комплекс (АПК) "МАГНУС", разработанный в ГЦ РАН. Для расширения возможностей работы с базой данных геомагнитных данных был разработан веб-сервис для интерактивного просмотра магнитограмм и сопутствующих измерений.

В 2017 г. на спаде солнечного цикла произошло две крупные магнитные бури: 1–2 мая и 7–8 сентября, причем последняя была наиболее интенсивной. Dst индекс является основной глобальной характеристикой бури. Среднесуточные значения Dst индекса составляли 2 мая $Dst = -75$ нТл, а 8 сентября $Dst = -150$ нТл. Минимальное среднечасовое значение в 12 UT 8 сентября достигало -142 нТл. Буря произошла на спаде 24 солнечного цикла и была вызвана мощным коронарным выбросом и высокоскоростными потоками солнечного ветра.

8.3. Оценка точности бурения наклонно-направленной скважины в Арктическом регионе во время геомагнитных возмущений

В высоких широтах значительную долю неопределенности в показания скважинных инклинометров вносят спорадические возмущения внешнего магнитного поля, связанные с магнитными бурями и суббурями. Были проведены оценки величины помех, возникающих в показаниях скважинного магнитометра в условиях высокой геомагнитной возмущенности на примере магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. Для оценки влияния геомагнитных возмущений на точность проводки скважины поместим виртуальные локации модельных скважин в точки расположения двух арктических геомагнитных обсерваторий, которые разнесены по широте. В данном случае обсерваторский магнитометр будет рассматриваться в роли скважинного инклинометра. Обсерваторские измерения позволяют проследить изменение магнитных элементов во время бури и, рассчитав параметры траектории бурения при наблюдаемых вариациях магнитного склонения, оценить на этой модели степень отклонения фактической траектории ствола от заданного направления. При этом заданное направление предполагает неизменность величины магнитного склонения, т.е. отсутствие обусловленных магнитной бурей возмущений поля. Рассчитанная фактическая траектория следует показаниям обсерваторского магнитометра, которые подвержены возмущениям.

Основная задача технологии направленного бурения состоит в оперативном расчете величины и направления отклонения фактического профиля от проектного и

корректирование траектории. Определение направления в пространстве под землей осуществляется с помощью непрерывных измерений компонентным скважинным магнитометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны. В качестве системы координат, в которой рассчитываются координаты проектного и фактического профиля, принята система координат, связанная с направлением магнитного меридиана и направлением силы земного тяготения. Датчики системы телеметрии, работающие в скважине, привязаны к истинному или магнитному северу. Задача расчёта траектории бурения состоит в том, чтобы на основании измерений рассчитать координаты точек в прямоугольной системе координат, связанной с устьем скважины: вертикальную глубину (z) и горизонтальные смещения (x и y) точки измерения в направлении север-юг и восток-запад.

8.4. Расчет отклонения параметров траектории ствола во время магнитной бури 7–8 сентября 2017 г.

По измеренным значениям магнитных элементов D (склонение) и I (наклонение) можно однозначно определить направление на истинный северный полюс, величину географического азимута и отклонение от вертикали. На рисунке 8.1 представлены изменения D на трех авроральных обсерваториях во время магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. Обсерватории СВВ (77° , 309°) и УКС (67° , 300°) расположены на Аляске, а обсерватория ABS (67° , 21°) - в северной Европе. Вариации минутных значений D достигают очень большой амплитуды: 10, 30 и 30 градусов соответственно для СВВ, УКС и ABS.

При усреднении за 0.5 часа, амплитуда уменьшается до нескольких градусов, однако остается достаточно большой, чтобы вносить помехи при подземной ориентации.

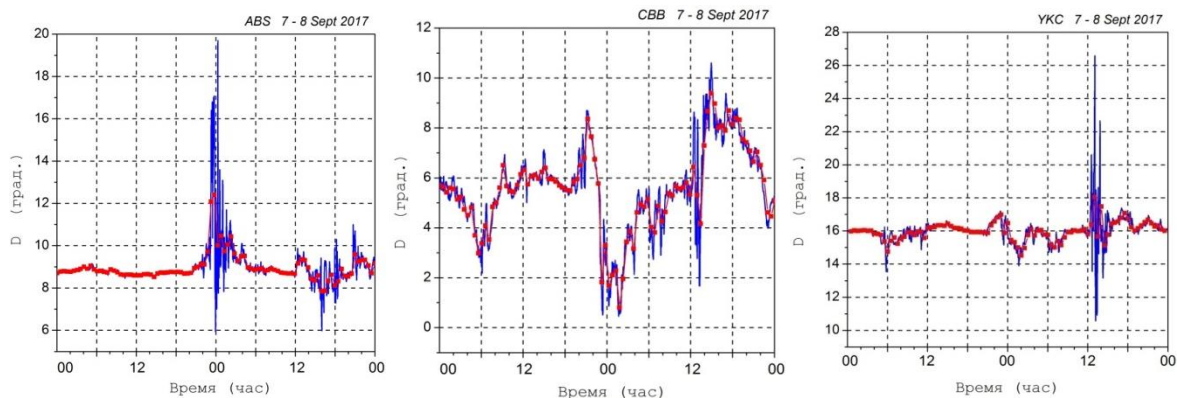


Рисунок 8.1 – Минутные значения D (синяя линия) на трех авроральных обсерваториях во время магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. Обсерватории СВВ (77° , 309°), УКС (67° , 300°) и ABS (67° , 21°). Красным цветом показаны точки получасового усреднения

На рисунке 8.2 изображены изменение координат ствола, вычисленных с использованием возмущённых величин азимута φ в том случае, если не проводится корректировка отклонений от проектного профиля и фактическое направление бурения не изменяется. Расчет производится по данным скважинных гравиметрических и инклинометрических измерений значений углов α (зенитный угол) и φ (азимут).

Приращения координат на отрезке ΔL в соседних верхней и нижней точках замера $i, i+1$ вдоль длины ствола L рассчитываются для метода минимума кривизны как

$$\begin{aligned}\Delta y &= T \cdot (\sin \alpha_i \cdot \sin \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1}) \\ \Delta x &= T \cdot (\sin \alpha_i \cdot \cos \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1}), \\ \Delta z &= T \cdot (\cos \alpha_i + \cos \alpha_{i+1})\end{aligned}\quad (1)$$

$$T = \frac{180 \cdot \Delta L \cdot \operatorname{tg} \frac{F}{2}}{\pi \cdot F}, \quad (2)$$

$$F = \arccos(\sin \alpha_i \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \alpha_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1} + \sin \alpha_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1}). \quad (3)$$

По данным о приращениях координат можно рассчитать горизонтальное смещение A для i -ой точки профиля от устья скважины, а также азимут смещения Ψ :

$$A_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}, \quad \Psi_i = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}. \quad (4)$$

Угол пространственного искривления ствола γ и интенсивность искривления J (в единицах градус/10 м) на i -м интервале ΔL между точками $i, i+1$:

$$\gamma_i = \arcsin \sqrt{[\sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \alpha_i \cdot \cos(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_{i+1}]^2 + \sin^2 \alpha_{i+1} \cdot \sin^2(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}, \quad (5)$$

$$J_i = \frac{\gamma_{i+1,i}}{10}. \quad (6)$$

Рассчитанные геометрические параметры (1) – (6) определяют фактический профиль ствола скважины и дают возможность выявить места резкого искривления.

В периоды геомагнитных возмущений обнаруживается резкое увеличение интенсивности искривления до 2° на 10 м. Места резкого искривления ствола являются интервалами вероятных технологических осложнений при бурении. Таким образом, модельный расчет показывает, что колебания азимута, обусловленные возмущениями магнитного склонения во время магнитной бури, могут приводить к резким изменениям геометрических параметров ствола скважины и значительным отклонениям от заданного направления.

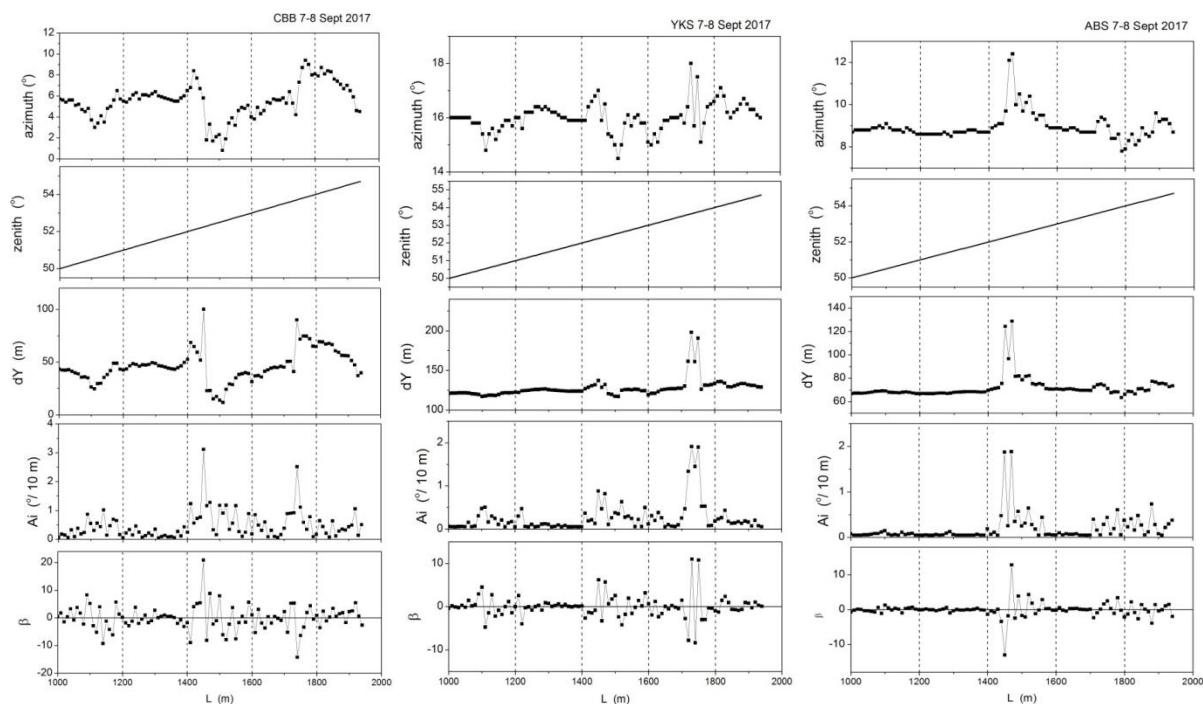


Рисунок 8.2 – Изменение зенитного угла и магнитного склонения и геометрические параметры фактического профиля ствола скважины для длины ствола. Сверху вниз: изменение зенитного угла α и азимута φ ; приращение координаты у на каждом шаге измерений; смещение фактического профиля по горизонтали A ; и интенсивность искривления ствола для 7–8 сентября, obs. CBB (левая колонка графиков), obs. YKS (средняя колонка) и obs. ABS (правая колонка)

8.5. Повышение качества базисной линии при обработке данных магнитных обсерваторий, развитие системы измерений и расширение функционала АПК "МАГНУС"

Предложен новый подход к расчету регулярных рядов базисных значений при измерениях геомагнитного поля на обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ. Подход основывается на одновременном анализе результатов абсолютных наблюдений и значений регулярного ряда $\Delta F = \Delta F(t)$, который широко используется для оценки качества данных и представляет собой ряд разностей между значениями модуля поля, регистрируемыми скалярным магнитометром, и вычисленными по полным значениям компонент, получаемых из данных векторного магнитометра. Систематический анализ ΔF в предлагаемом методе позволяет задействовать всю имеющуюся информацию о работе обсерваторских приборов в промежутках между моментами абсолютных измерений. Для установления связи с наблюдаемыми базисными значениями вводится функция приближенной оценки промежуточных базисных значений.

Метод прошел апробацию на частично синтезированных данных. В качестве исходных вариационных значений $\vec{V} = (X_v, Y_v, Z_v)$ использовались очищенные от техногенных помех вариации трех ортогональных компонент МПЗ, измеренные векторным магнитометром на обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ "Санкт-Петербург" (IAGA-код SPG). Процесс апробации алгоритма состоял из 100 вычислительных

экспериментов на основе синтезированных данных. В каждом вычислительном эксперименте к псевдонаблюдаемым базисным значениям добавлялся аддитивный белый гауссовский шум. Показано, что изменение шумовых характеристик в исходных данных не производит существенного влияния на результат работы алгоритма.

Полученные в 2016 г. на обсерватории "Санкт-Петербург" (IAGA-код SPG) данные измерений МПЗ были приведены в соответствие требованиям, предъявляемым к качеству окончательных данных международной сетью наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ. На основе обработанных наборов данных был сформирован годовой отчет обсерватории в форматах, описанных в техническом руководстве ИНТЕРМАГНЕТ.

Для расширения возможностей работы с базой данных Российско-украинского центра геомагнитных данных был разработан веб-сервис для интерактивного просмотра магнитограмм и сопутствующих измерений в аппаратно-программном комплексе "МАГНУС". Улучшенный веб-сервис Plot 2.0 (<http://geomag.gcras.ru/dataproduct-plot20.html>) реализован согласно принципу микросервисной архитектуры с использованием свободных языков программирования.

9. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием данных геомагнитного спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0012

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610083-6

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

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

9.1. Математическое моделирование F- области полярной ионосферы

Высокоширотная ионосфера является самой сложной областью ионосферной оболочки Земли, поскольку происходящие в ней процессы обусловлены не только ионизацией солнечным излучением, но также электрическими полями магнитосферного происхождения и энергичными частицами, выпадающими из магнитосферы. В F-области (на высотах 200–300 км) типичным является существование разномасштабных неоднородностей электронной концентрации (N_e). В связи с ограниченным количеством пунктов регулярных наблюдения в высоких широтах чисто эмпирические модели не дают детального описания трехмерной структуры полярной ионосферы и её структурных особенностей для реальных гелио-геофизических условий.

В этой связи актуальной задачей является разработка и использование физико-математических моделей, которые позволяют получить необходимую информацию о состоянии полярной ионосферы на основе компьютерных расчетов. Разрабатываемые теоретические модели электродинамики полярной ионосферы и распределения N_e являются региональными и учитывают основные процессы, наиболее существенные именно для заданной области, тем самым повышая оперативность расчетов. В основе данного подхода к ионосферному моделированию лежит необходимость решения прикладных задач диагностики и мониторинга "ионосферной погоды", в частности, в таком стратегически важном регионе как Арктика.

Хотя численная модель в целом адекватно воспроизводит основные крупномасштабные неоднородности F-области, важной практической проблемой является повышение точности прогноза распределения N_e . Проблема может быть решена с помощью разработки нестационарной модели, входные параметры которой изменяются с течением времени. Это важно, поскольку при расчете N_e уравнения непрерывности и фотохимического равновесия интегрируются в плазменной трубке, которая движется под действием меняющегося электрического поля. При получении текущих значений параметров солнечного ветра непосредственно из данных измерений открывается возможность в квази-реальном времени обеспечить регулярное обновление трёхмерной структуры F-области полярной ионосферы. Переход к учёту изменяющихся во времени параметров солнечного ветра при расчёте траекторий конвекции на временном отрезке прослеживания эволюции плазменных трубок приводит к повышению точности моделирования.

9.2. Численная модель полярной ионосферы с учетом нестационарной конвекции

Численная модель рассчитывает трехмерное распределение Ne в полярной ионосфере, т.е. в области выше 50° магнитной широты (MLat). Основными факторами, определяющими состояние высокоширотной ионосферы, являются динамика плазмы и процессы образования и химических потерь ионов. Модель состоит из двух блоков, каждый из которых описывает соответствующий фактор.

В блоке расчета конвективного движения ионосферной плазмы, с целью определить траектории, вдоль которых дрейфует плазменная трубка, рассчитывается распределение электрического поля и геометрические и электродинамические параметры картин конвекции. Так как в F области плазма замагничена, линии конвекции совпадают с изолиниями ионосферного электрического потенциала. Ионосферные электрические поля возбуждаются продольными токами (ПТ), которые текут вдоль силовых линий геомагнитного поля и связывают ионосферу с пограничными слоями магнитосферы и солнечным ветром. ПТ контролируются межпланетным магнитным полем (ММП) и непрерывно изменяются с изменением параметров солнечного ветра и солнечным зенитным углом (сезоном года и мировым временем). В рамках модели величина и геометрия ПТ, ионосферного электрического поля и широты границы полярной шапки параметризованы и описываются соответствующими аналитическими формулами.

Во втором блоке решается одномерная задача интегрирования по высоте нестационарного конвективно-диффузионного уравнения и уравнения фотохимического равновесия в вертикальной плазменной трубке, дрейфующей под действием электрических полей магнитосферной конвекции и коротации. Уравнение диффузионного переноса для основного иона O^+ и уравнение непрерывности для обобщенного иона M^+ интегрируется в дрейфующей вдоль траекторий, совпадающих с эквипотенциалами. Параметры нейтральной атмосферы вычисляются по полуэмпирической модели термосферы MSISE. Энергетические спектры и потоки высыпавшихся частиц рассчитываются согласно эмпирической модели, полученной по данным измерений спутников DMSP.

Входными параметрами модели являются значения компонент B_z и B_y межпланетного магнитного поля (ММП), скорость солнечного ветра $V_{св}$, день года (DOY) и универсальное время (UT), а также индексы солнечной (F10.7) и геомагнитной активности (Kp). Шаг по времени составляет 15 мин, а по высоте – 10 км. Выходными параметрами являются распределения Ne в F-области ионосферы в узлах сетки с номинальными шагами 2° по MLat и 15° по долготе в широтной области MLat $>50^\circ$ в диапазоне высот 130 и 600 км. По профилям Ne строятся карты распределения максимальной электронной плотности ($NmF2$).

Уравнения траектории конвекции записываются в геомагнитных сферических координатах r, θ, φ (r – радиус, θ – коширота, φ – геомагнитная долгота). Скорость движения заряженной частицы определяется суммой скорости коротации $V_K = (0, 0, \omega \cdot r \cdot \sin\theta)$ и скорости дрейфа V_D в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях:

$$V_D = (-E_\varphi B_\theta / B, E_\varphi B_r / B, (E_r B_\varphi, -E_\theta B_r) / B). \quad (1)$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая конвективные траектории, имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -2 \cdot E_\varphi(\theta, \varphi) \cdot \frac{(R^2 / M) \cdot \cos \theta}{3 \cdot \cos \theta + 1}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = E_\theta(\theta, \varphi) \cdot \frac{R^2 / M}{2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} + \omega, \quad (3)$$

где M – магнитный момент Земли, ω – частота углового вращения Земли вокруг геомагнитной оси, $R = R_E + 200$ км, R_E – радиус Земли, t – время.

Для определения начальной точки дрейфа плазменной трубки траектория рассчитывается по времени назад на 8–10 часов. В стационарном случае предполагалось, что ММП и скорость солнечного ветра не меняются во времени и принимаются равными тому числу, которое задано как входной параметр. В нестационарной версии входные параметры меняются на каждом временном шаге расчета.

Нестационарная модель конвекции предполагает учет того факта, что входные параметры зависят от мирового времени (UT) и изменяются на каждом шаге расчета Δt . Необходимо ввести функции:

$$B_Z = f_Z(UT), B_Y = f_Y(UT), V = f_V(UT). \quad (4)$$

Входные параметры могут задаваться численно непосредственно из эксперимента (спутниковых измерений) с шагом дискретизации ΔUT на интервале $[UT_1, UT_2]$, в котором содержится N точек. Тогда величины B_Z , B_Y и V описываются массивами

$$\{B_{Zi}\}_{i=1}^N, \{B_{Yi}\}_{i=1}^N, \{V_i\}_{i=1}^N. \quad (5)$$

В частности,

$$B_Z(UT) = B_{Zi}, \quad (6)$$

где i – целая часть от $[(UT - UT_1) / \Delta UT] + 1$.

Здесь видна связь UT с дискретной переменной i . Аналогичные выражения записываются для $B_Y(UT)$ и $V(UT)$.

По сравнению со стационарным случаем изменяются также формулы для АЕ индекса и кошироты границы полярной шапки θ_I :

$$AE = 90 \cdot (B_S + 0.5) \cdot (V / 400)^2, \quad (7)$$

где $B_S = -B_Z$, если $B_Z \leq 0$ и $B_S = 0$, если $B_Z > 0$.

$$\theta_I = 17^\circ - 0.6 \cdot B_Z. \quad (8)$$

Дискретизация проводится аналогично формуле (6).

Зависимость Kp индекса от времени UT надо учесть и в конвекционном, и в ионосферном блоке. В блоке конвекции при расчете траекторий конвекции вспять по UT надо предусмотреть правильное изменение Kp "в прошлое". В ионосферном блоке при решении уравнений для основного иона O^+ и обобщенного иона M^+ надо предусмотреть изменение $Kp(UT)$ "в будущее", т.к. $Kp(UT)$ входит в модель нейтралов и модель корпускулярной ионизации.

Шаг дискретизации Kp составляет 3 часа. Зависимость $Kp(UT)$ описывается массивом чисел $\{Kp_i\}_{i=1}^N$ в интервале $[UT_1, UT_2]$. Тогда

$$Kp(UT) = Kp_i, \quad (9)$$

где i есть целая часть от $[(UT - UT_1) / \Delta UT_{Kp}] + 1$.

Соответствующие изменения были внесены в программу, реализующую модель.

9.3. Сравнение модельных распределений электронной концентрации со спутниковыми измерениями в полярной ионосфере

Распределение Ne в F -области во времени и пространстве, изменяется, главным образом, в зависимости от ориентации ММП и величины солнечного зенитного угла. Крупномасштабные неоднородности Ne наиболее четко проявляются на высоте максимума слоя $F2$. В вертикальном направлении соответствующие изменения Ne распространяются в верхнюю ионосферу до высот 1000 и более километров. Измерения плотности плазмы в верхней ионосфере может быть получено с помощью спутниковой аппаратуры, в частности спутников *Swarm*.

Для валидации модели распределение Ne для двух дней, 17 и 31 января 2014 г., когда противоположных знаках азимутальная компонента ММП была положительной и отрицательной было смоделировано, и результаты сравнивались со спутниковыми данными. В течение первого рассматриваемого периода (31 января) $B_y = +5$ нТл при практически нулевом B_z . Во время второго периода (17 января) ММП менее стабильно, в среднем $B_y = -3$ нТл, а диапазон изменения B_z составляет ± 2 нТл. Геомагнитные условия с обоих случаях достаточно спокойные, лишь к концу суток 17.I Kp повышался до 1.7.

На рисунке 9.1 в координатах MLat-MLT представлены все траектории за 31.I.2014 (рис. 9.1a) и 17.I.2014 (рис. 9.1б). Цветом показаны значения Ne вдоль каждой траектории. Можно видеть, что зона повышенной концентрации наблюдается на траекториях, проходящих через полуночный меридиан и, согласно таблице, относящихся ко второй половине суток. При этом на рисунке 9.1a она смещена на утреннюю, а на рисунке 9.1б – на вечернюю сторону. Такое смещение относительно утренне-вечернего меридиана согласуется с картиной конвекции ионосферной плазмы при различных знаках B_y ММП. При $B_y > 0$ усиленная конвекция на утренней половине шапки формирует здесь наиболее развитый Язык Ионизации (ЯИ), а при $B_y < 0$ происходит вытягивание ЯИ в высокоскоростной поток на вечерней половине шапки. Кроме того, 17.I.2014 зона повышенных значений Ne распространяется до полуночного меридиана и даже в предполуночный сектор. Это может быть обусловлено дополнительной ионизацией, связанной с высыпавшимися авроральными частицами вследствие увеличения геомагнитной активности после 13 UT.

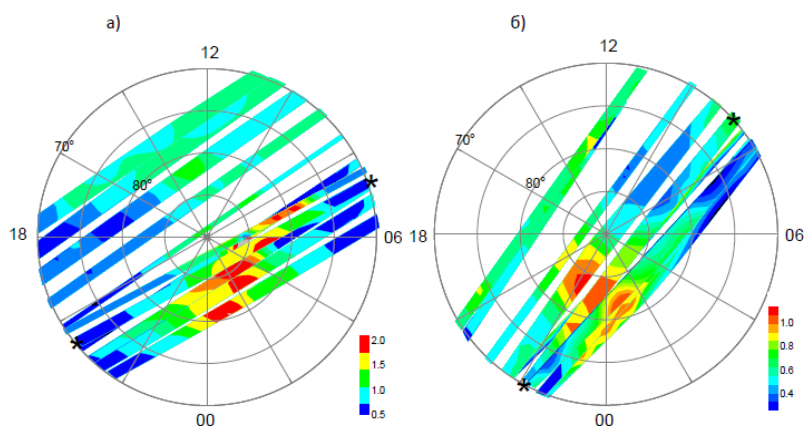


Рисунок 9.1 – Распределение N_e вдоль траекторий в области $MLat > 70^\circ$

Структурные особенности ЯИ, обусловленные B_y компонентой ММП, воспроизводятся с помощью численной модели полярной ионосферы. На рисунке 9.2 представлены изолинии N_e на высоте 500 км, иллюстрирующие влияние знака B_y ММП на распределение N_e . Можно видеть, что при $B_y > 0$ (рис. 9.2а) полярный ЯИ вытянут от полуденного меридиана на утреннюю сторону, а при $B_y < 0$ (рис. 9.2б) – на вечернюю. Такое изменение структуры ионосферы находится в полном соответствии с увеличением напряжённости электрического поля и более интенсивном конвективном дрейфе плазмы в утреннем или вечернем секторах MLT.

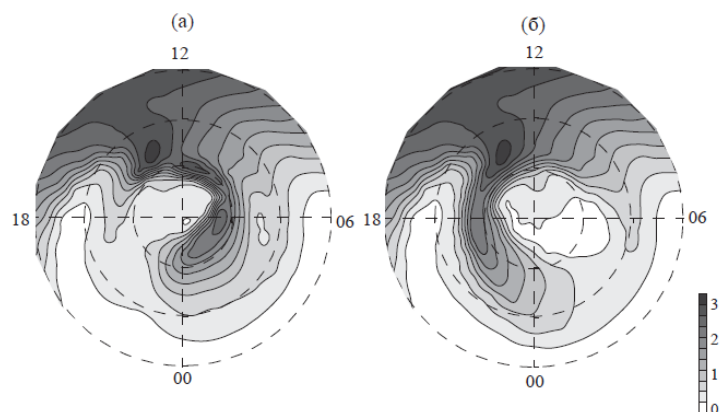


Рисунок 9.2 – Карты изолиний $N_e \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $B_z = 0$ и $B_y = +5 \text{ нТл}$ (а) и $B_y = -5 \text{ нТл}$ (б). Карты построены в геомагнитных координатах в области $MLat > 60^\circ$ на высоте 500 км. Другие входные параметры модели: скорость солнечного ветра 350 км/с, день года 20, индекс $K_p = 0$, индекс $F_{10.7} = 150$, UT = 18

При $B_y < 0$ происходит сужение и вытягивание ЯИ (изолинии затягиваются в поток на вечерней половине шапки) и перемещение плазменной полости в направлении от ночного меридиана к утреннему, что обусловлено истощением плазменных трубок в области ослабленной конвекции на утренней половине шапки. При $B_y > 0$ перестройка структуры ионосферы еще более существенна, чем при $B_y < 0$. Усиленная конвекция на утренней половине шапки формирует здесь наиболее развитый ЯИ, и одновременно заполняется плазменная полость. По мере расширения траекторий конвекции трубки начинают проникать в область прямого УФ излучения, вклад которого в интегральную скорость ионообразования приводит к усилению ЯИ. На вечерней половине шапки ЯИ

существенно подавлен. Таким образом, результаты модельных расчетов Ne и спутниковых наблюдений достаточно хорошо согласуются друг с другом, и модель адекватно описывает физические механизмы процессов, происходящих в полярной ионосфере.

10. Новые математические методы в геофизических исследованиях

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0008

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610078-2

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

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

10.1. Введение

Проект направлен на разработку и применение новых математических методов для исследования динамики геофизических явлений. Речь идет о формулировке новых принципов позволяющих описывать динамику геофизических процессов, которые управляются случайными параметрами. Более того, сама случайность предопределена и никаким образом не может быть исключена из рассмотрения. Дан ответ на вопрос, как случайные факторы влияют на динамику процессов, особенно в случаях возникновения неустойчивостей. Обоснованы новые методы анализа динамических процессов в глубоко неравновесных системах на основе использования эволюционных уравнений и теории графов, сформулированных в терминах вероятности наблюдать заданный процесс, что позволит оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов. Конкретно рассматривается процесс распространения радиосигналов в среде содержащей ридберговские центры и аэрозольные частицы. Показано, что ридберговские центры сами могут генерировать помехи, а заряженные аэрозольные частицы способны рассеивать и поглощать электромагнитные волны. Кроме этого, в полном соответствии с планом мы рассматриваем применение дискретного математического анализа для предсказания моментов наступления критических ситуаций.

НИР была направлена на решение задач распространения радиосигналов в ионосфере и исследовании причин возникновения помех на частотах важных для осуществления дальней связи и радиозондирования земной поверхности. Речь идет об исследовании некоторых элементарных атмосферных процессов ответственных за возникновение в верхних ее слоях помехоактивных элементов. Речь идет о так называемых ридберговских комплексах. По существу это ионизованная молекулярная пара связанная одним внешним электроном, вращающимся на удаленной орбите. Этот электрон удерживается зарядом сосредоточенным в центре, и электронные состояния почти вырождены. Вырождение снимается за счет того, что расстояние между центрами атомов, входящих в состав ридберговского комплекса отлично от нуля. Расстояния между уровнями, относящимися к состоянию с одним и тем же орбитальным моментом как раз и соответствуют радиочастотам, используемым в системах GPS и ГЛОНАСС. Сделана попытка ответить на вопрос о динамике и причинах образования ридберговских комплексов и конечно, исследовать спектры излучения таких систем.

Рассмотрены конкретные геофизические процессы, в которых стохастический подход будет максимально эффективен. Среди таких процессов оказываются такие важные как распространение загрязнений в воздушной, жидкой среде и по земной поверхности, процессы зарождения и распространения аэрозолей в атмосфере, электромагнитные явления в верхней атмосфере, связанные со случайными всплесками солнечной активности, распространение эпидемий. Все эти процессы описываются

уравнениями (чаще всего, дифференциальными), параметры которых являются случайными функциями времени.

Создание методов анализа динамических процессов в глубоко неравновесных системах на основе использования эволюционных уравнений, сформулированных в терминах вероятности, позволило оценивать влияние случайных факторов на протекание вероятностно обусловленных геофизических процессов. Вместе с новыми методами анализа случайных временных рядов и использованием идей дискретного математического анализа эволюционные уравнения позволят сформулировать новые аналитические и численные схемы для исследования структуры нерегулярных множеств моментов наступления событий.

10.2. Эволюция двудольного графа

В этом случае два сорта вершин соединяются ребрами. Вершины одного сорта не соединяются. Тогда число объединений для двух связанных компонент содержащих m_1, n_1 и m_2, n_2 вершин первого и второго сорта пропорционально $m_1 n_2 + m_2 n_1$. Число вакантных мест для ребер в m, n – компоненте есть $mn - \nu$. Минимальная величина ν равна $\nu = m + n - 1$.

Возможно написать выражение для среднего числа $m, n; \nu$ – компонент

$$\bar{n}_{m,n;\nu}(t) = \left(M_g \atop m \right) \left(M_r \atop n \right) e^{mnt/V - mM_r t - nM_g t} (e^{t/V} - 1)^\nu C_{m,n;\nu}. \quad (1)$$

и для числа m, n компонент

$$\bar{n}_{m,n}(t) = \left(M_g \atop m \right) \left(M_r \atop n \right) e^{mnt/V - mM_r t - nM_g t} (e^{t/V} - 1)^{m+n-1} F_{m-1,n-1}(e^{t/V}). \quad (2)$$

Здесь $\bar{n}_{m,n}(t) = \sum_{\nu} \bar{n}_{m,n;\nu}(t)$, M_g, M_r – числа вершин первого и второго сорта в графе, а $M_{g,r} = M_{g,r}/V$, $C_{m,n;\nu}$ – число $m, n; \nu$ связанных компонент. Полиномы $F_{m,n}(x)$ играют ту же роль, что и полиномы Мэллоу введенные для однодольных графов. В частности полином $w^{m+n-1} F_{m-1,n-1}(1+w)$ генерирует $C_{m,n;\nu}$,

$$w^{m+n-1} F_{m-1,n-1}(1+w) = \sum_{\nu=m+n-1}^{mn} C_{m,n;\nu} w^\nu. \quad (3)$$

Сами полиномы удовлетворяют тождеству

$$\ln \left(\sum_{m,n} \frac{\xi^m \eta^n}{m!n!} x^{mn} \right) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{\xi^m \eta^n}{m!n!} (x-1)^{m+n-1} F_{m-1,n-1}(x) + \xi + \eta. \quad (4)$$

Это обобщение теоремы Ридделя для двудольных графов.

10.3. Распространение загрязнений

Мы рассмотрим случайное блуждание загрязнение при условии, что скорость его распространения на микроскопическом уровне меняется случайно. При этом мы не будем ограничиваться малыми смещениями в фазовом пространстве. Тогда мы должны стартовать с уравнения

$$\partial_t W + v \cdot \nabla W = \sum_{v'} A(v, v') W' - \frac{1}{\tau} W. \quad (5)$$

Здесь $W = W(r, v; t)$ – вероятность застать примесь в заданной точке фазового пространства в заданный момент времени, а $1/\tau = \sum_{v'}$ – обратное время изменения скоростного режима. Это уравнение переходит в уравнение диффузии (или, лучше сказать, в уравнение Фоккер–Планка при малых смещениях в фазовом пространстве).

Для решения этого уравнения мы воспользуемся моделью в которой скорости перемешиваемости A – сепарабельная функция v и v' : $A(v, v') = Aq(V)q(v')$. Переходя к фурье-образу по пространству и проделав преобразование Лапласа по времени мы найдем,

$$pW - W_0 + ik \cdot vW + \frac{1}{\tau} W = Aq(v)Q, \quad (6)$$

где $Q = \sum_{v'} q(v')W$. Тогда получаем

$$W(p, q) = \frac{AqQ + W_0}{p + ik \cdot v}. \quad (7)$$

И для Q мы имеем равенство

$$Q = \sum W(p, q) = \frac{AqQ + W_0}{p + ik \cdot v}. \quad (8)$$

Финальный результат имеет вид

$$Q = \frac{Q_0}{1 - S}, \quad (9)$$

где

$$Q_0 = \sum \frac{qW_0}{p + ik \cdot v},$$

$$S = \sum \frac{Aq^2}{p + ik \cdot v}.$$

Результаты интегрирования исключительно громоздки и здесь не приводятся. Характерная черта этого результата – резкая граница, распространяющаяся с конечной скоростью и менее крутой профиль по сравнению с диффузионным пределом. Дальнейшее исследование процесса распространения фронта – исключительно важная задача для теории и практики распространения загрязнений в случайных грунтах.

10.4. Решение уравнений вида $x'(t) = f(t)$

Пусть D оператор дискретного дифференцирования на основе регрессионной производной на множестве временных рядов, заданных на конечном временном интервале $[a, b]$. Если $|[a, b]| = n$, то оператор D переводит временной ряд из пространства \mathbb{R}^n в пространство \mathbb{R}^n , в то время как обычные разностные производные переводят ряд из \mathbb{R}^n в \mathbb{R}^{n-1} . Таким образом главной особенностью оператора регрессионного дифференцирования является, то с помощью него можно дифференцировать исходный ряд произвольное число раз.

Пусть на интервале $[a, b]$ задана функция $f(t)$, которую требуется проинтегрировать, т.е. решить уравнение

$$x'(t) = f(t) \quad (10)$$

при $x(t_0) = f_0$.

Решить это уравнение можно либо воспользовавшись обычной разностной схемой, либо попробовать решить с помощью оператора регрессионной дифференцирования. Т.е. мы заменяем исходное уравнение на уравнение

$$Dx = f, \quad (11)$$

где $f = [f_0, \dots, f_n]$ — заданный временной ряд, $x = [x_0, \dots, x_n]$ искомая функция, заданная в тех же точках. Таким образом, мы заменяем исходное уравнение (10) на систему линейных уравнений (11).

Ранг матрицы D на единицу меньше количества точек, поэтому для решения уравнения мы воспользовались алгоритмом Хуанга. В результате работы этого алгоритма мы получаем некоторое решение x^* и матрицу преобразования H . Для поиска решения удовлетворяющего начальному условию воспользуемся соотношением

$$Hs + x^* = x_0, \quad (12)$$

откуда искомая константа

$$s = (x_0 - x^*) / H.$$

На рисунках 10.1, 10.2, 10.3 приведены примеры решения уравнения $x'(t) = f(t)$ для различных правых частей.

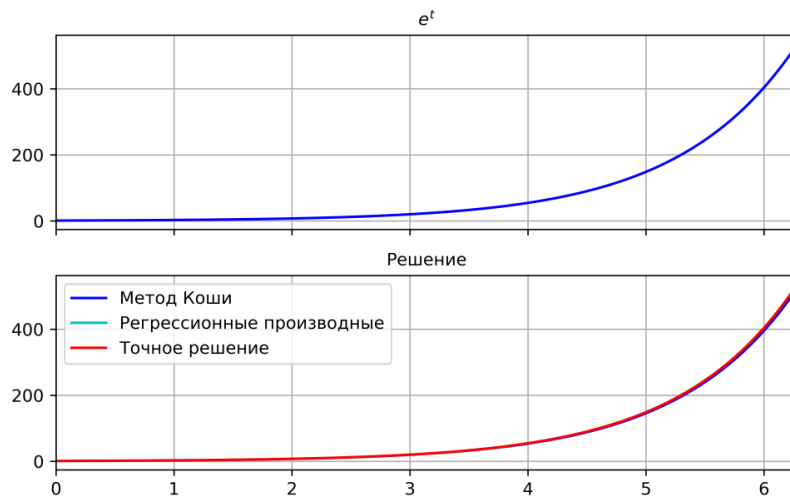


Рисунок 10.1 – Решение уравнения $x'(t) = e^t$

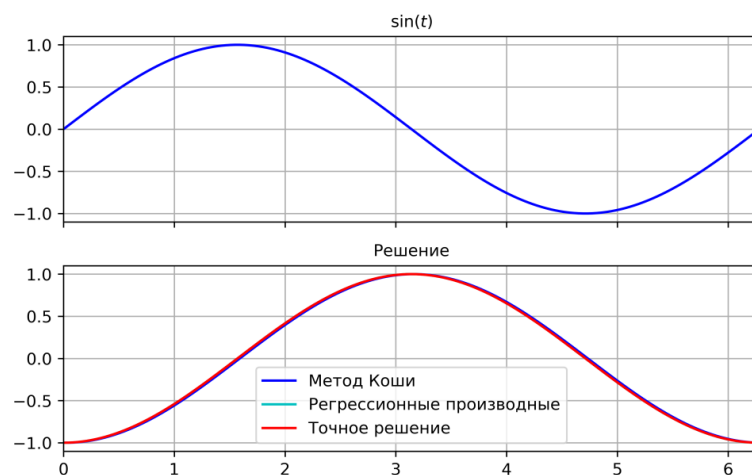


Рисунок 10.2 – Решение уравнения $x'(t) = \sin(t)$

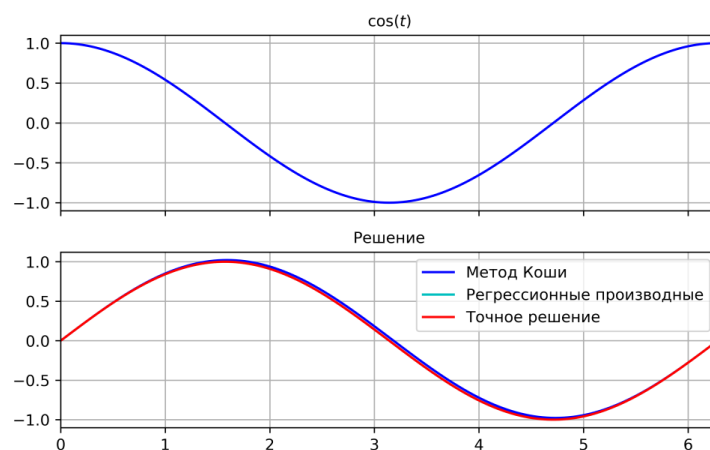


Рисунок 10.3 – Решение уравнения $x'(t) = \cos(t)$

Для оценки качества полученных решений (методами Коши и регрессионного оператора дифференцирования) сравним их с точным решением. Пусть x^* – точное решение, x_C – решение Коши, x_R регрессионное решение. В таблице 10.1 приведены результаты этого сравнения.

Таблица 10.1 – Сравнение результатов решения на гладких функциях

	$L_2(x^* - x_C)$	$L_2(x^* - x_R)$	$L_\infty(x^* - x_C)$	$L_\infty(x^* - x_R)$	$L_1(x^* - x_C)$	$L_1(x^* - x_R)$
e^t	39.143412	0.376609	11.116218	0.107059	267.857404	2.713228
$\sin(t)$	0.181393	0.006691	0.021089	0.001290	2.000000	0.068076
$\cos(t)$	0.314162	0.002618	0.041888	0.000609	3.141593	0.027784

Как уже отмечалось выше сглаживание зависит от параметра p (показатель степени в выбранной мере близости). Поэтому хотелось посмотреть влияние этого параметра на качество решения. Для этого решим уравнение $x'(t) = \sin(t) + \varepsilon(t)$ при различных значениях показателя (рис. 10.4).

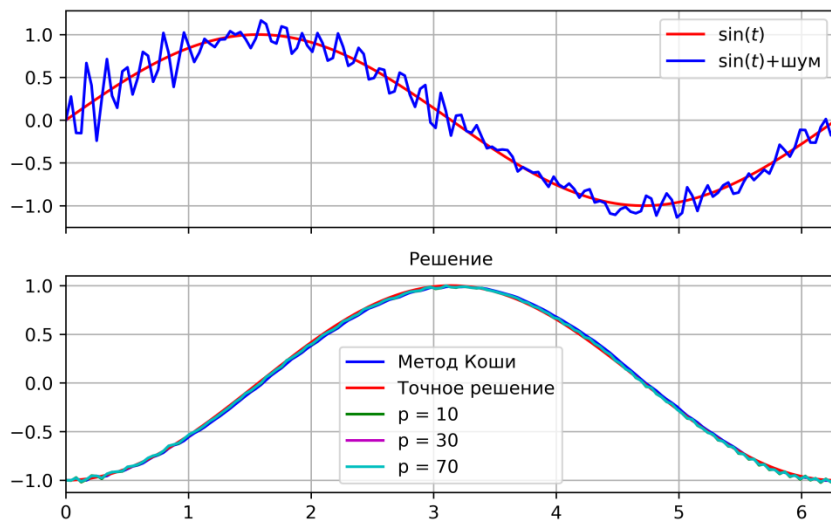


Рисунок 10.4 – Решение уравнения $x'(t) = \sin(t) + \varepsilon(t)$

В таблице 10.2 приведены результаты сравнения решения Коши и решений на основе регрессионных производных при различных p . В таблице x^* – решение уравнения $x'(t) = \sin(t)$, x – одно из решений уравнения $x'(t) = \sin(t) + \varepsilon(t)$.

Таблица 10.2 – Сравнение результатов решения при различных p

x	$L_2(x^* - x)$	$L_\infty(x^* - x)$	$L_1(x^* - x)$
Коши	0.275219	0.040904	2.916814
$p = 10$	0.192984	0.039018	1.921600
$p = 30$	0.167276	0.032700	1.706131
$p = 70$	0.167189	0.032672	1.705344

10.5. Процессы образования аэрозолей в условиях ионосферы

Ионосферные аэрозоли в значительной степени определяют глобальные электродинамические характеристики земной ионосферы. Основным источником аэрозолей в ионосфере – это поступление метеоритного вещества из космоса. Метеориты сгорают превращаясь в пар, который затем конденсируется и дает облако аэрозольных частиц. Существующие данные позволяют заключить, что размеры ионосферных аэрозольных частиц лежат в пределах 0.01 – 10 мкм. Функция распределения частиц по размерам не известна. Мы в дальнейшем будем использовать два вида распределения – логарифмически нормальное и степенное.

Основные участники аэрозольных процессов в ионосфере – это сами аэрозольные частицы, ионы (в основном ионы азота) и электроны. Физико-химические параметры участников аэрозольных процессов в ионосфере перечислены в таблице 10.1.

В дальнейшем мы уделим внимание следующим аэрозольным процессам, протекающим в нижних слоях ионосферы.

1. Зарядка аэрозольных частиц
2. Распределение частиц по зарядам
3. Конденсация молекул на поверхности аэрозольных частиц
4. Взаимодействие аэрозольных частиц с электромагнитными волнами в ионосфере
5. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн заряженными частицами
6. Фотозарядка частиц
7. Коллективные моды возникающие благодаря присутствию аэрозольных частиц в ионосфере.

10.6. Новая формула для скорости конденсации паров в ионосфере

Сравнительно недавно другой принцип был предложен в работе, где сшивались потоки, полученные в диффузионном и свободно-молекулярном пределах, а радиус лимитирующей сферы определялся из требования непрерывности производной профиля концентрации конденсирующихся молекул. Эта формула имеет определенные преимущества перед используемыми ранее, т.к. результат выражается через коэффициент диффузии и тепловую скорость, а не через длину свободного пробега. Формула имеет вид:

$$\alpha = \frac{2\pi a^2 v_t}{1 + \sqrt{1 + (av_t / 2D)^2}}$$

Эта формула очень хорошо воспроизводит экспериментальные результаты по конденсации.

10.7. Ион-аэрозольное взаимодействие в ионосфере

Рекомбинация гораздо более сложный процесс. Заряженный ион, приближаясь к частице должен потерять часть энергии так, чтобы попасть в связанное состояние. И только после этого он может быть захвачен частицей. Такой процесс идет только в присутствии третьей частицы (обычно это молекула газа-носителя). Поэтому соответствующее выражение для эффективности рекомбинации должно зависеть от плотности газа-носителя. Совершенно ясно, что рекомбинационный процесс идет на расстояниях не превышающих длину свободного пробега иона. Далее, после столкновения с третьим телом ион должен занять низколежащие состояния, а иначе состояние ион-частица окажется неустойчивым, и его времени жизни не хватит на то, чтобы захватить ион. Таким образом, важно установить величину расстояния, на которое необходимо иону приблизиться, чтобы быть захваченным частицей. Однако, вклад связанных состояний будет зависеть от размера частицы. Причина этого лежит в том, что в зоне свободно-молекулярного движения ион не сталкивается с молекулами газа-носителя, а значит непременно возвращается в диффузионную зону. Таким образом, только те траектории, которые пересекают поверхность частицы, могут дать вклад в рекомбинационный процесс. Мы же предположим, что все траектории с отрицательными энергиями дают

вклад в эффективность рекомбинации. Действительно, у иона попавшего достаточно глубоко в кулоновскую яму есть очень мало шансов вернуться в состояния, из которых он может вылететь и стать свободным. Остается только определить расстояния, на которое должен приблизиться ион чтобы быть захваченным. Это возможно сделать в рамках теории сшивания потоков. Результирующее выражение для эффективности рекомбинации выглядит очень просто

$$\alpha(a) = \frac{4\pi D l_c}{1 - \exp[-l_c / R(a)]},$$

где $R(a) = 4D / v_T$. Здесь D – коэффициент диффузии ионов в газе-носителе и $l_c = e^2 / kT$ – кулоновская длина. Это выражение справедливо для маленьких частиц, размеры которых заметно меньше, чем длина свободного пробега. Разумеется, это выражение воспроизводит известную формулу Лэнгмюра при заметно больших $R(a)$. Таким образом, при очень малых размерах частицы эффективность рекомбинации не зависит от размера частицы.

11. Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0007

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610077-5

Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

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

11.1. Введение

Настоящий проект выполнялся в рамках программы ОНЗ РАН IV.8.7 "Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика". Исследования по проекту были направлены на формирование обширной междисциплинарной базы геоданных по геофизике. Геоданные, содержащиеся в базе оформлены в виде тематических цифровых карт и представлены в формате ГИС-проектов, опубликованных в виде картографического сервиса "Геофизика". Сформированная база охватывает широкий набор геоданных по физике твердой Земли, магнитному полю Земли и др. дисциплинам. Также была проведена модернизация тематического геопортала ГИС. Разработано специализированное картографическое приложение для раздела веб-сайта международной сети магнитных наблюдений INTERMAGNET.

11.2. Расширение картографического сервиса "Геофизика"

11.2.1. Цифровая карта магнитных аномалий мира WDMAM

Литосферные магнитные аномалии отражают особенности геологического строения литосферы. Карты магнитных аномалий позволяют точнее узнавать структуру и строение земной коры. Глобальные карты магнитных аномалий полезны для иллюстрации тектоники плит, взаимодействия коры с глубинной мантией и другими аспектами динамики Земли. Проект WDMAM — это попытка международной интеграции всех доступных околоземных и спутниковых данных по магнитным аномалиям. Проект был запущен в 2003 г. и в 2007 г. была выпущена и официально принятая карта WDMAM. Карта базируется на модели MF5. В 2010 г. началась работа по составлению обновленной версии карты. После прохождения сложной процедуры валидации и коррекции карта была официально представлена и принята на 26-й Генеральной ассамблее IUGG в июне 2015 г. в Праге, Чехия (рис. 11.1).

11.2.2. Карта магнитных аномалий Земли EMAG2

В результате нескольких лет работы международного коллектива специалистов в 2009 г. была представлена модель коровых магнитных аномалий, получившая обозначение EMAG2. Модель EMAG2 была разработана как результат сотрудничества более 100 поставщиков данных со всего мира. Она составлена на основе совместного анализа спутниковых, морских и аэромагнитных данных. Пространственное разрешение модели составляет 2 минуты дуги. В 2017 г. была представлена обновленная, третья, версия модели.

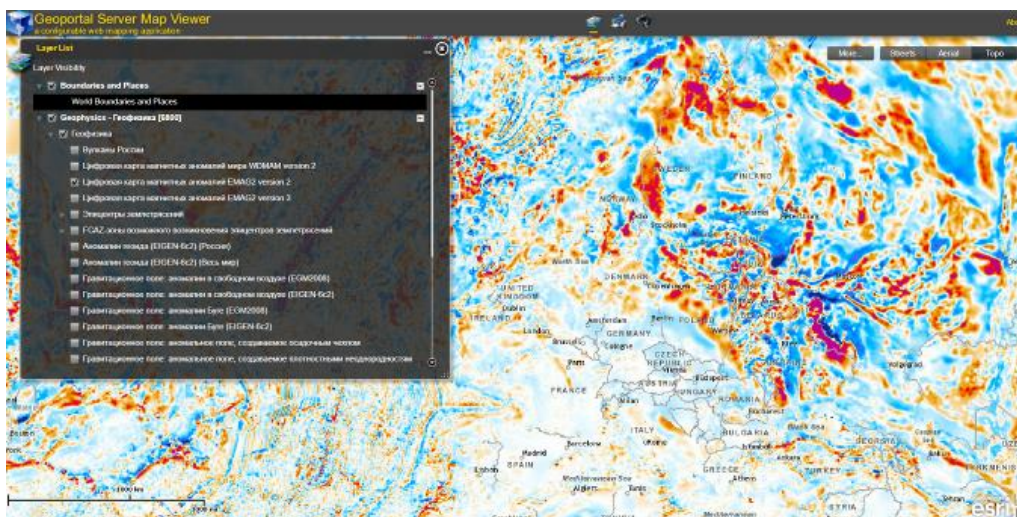


Рисунок 11.1 – Цифровая карта магнитных аномалий мира WDMAM [Dyment et al., 2015; Lesur et al., 2016]. Визуализация средствами геопортала gis.gcras.ru

Данная модель является дальнейшим существенным обновлением серии моделей EMAG. Модель EMAG2 версии 3 более детально отражает магнитные аномалии в океанических регионах и точнее моделирует регионы, на которые данные отсутствуют. Пространственное разрешение модели также составляет 2 минуты дуги. Существенным дополнением новой версии являются сеточные данные, полученные на уровне моря для океанических регионов. По возможности, были использованы исходные данные аэромагнитных и морских магнитометрических наблюдений. Интерполяция между разреженными треками наблюдений проводилась методом крайгинга. Наиболее длинноволновые элементы (более 300 км) были заменены новыми детальными данными спутниковой модели MF7.

Цифровые карты WDMAM и EMAG2 представлены в виде сеточных данных на всю поверхность Земли, определяющих значения интенсивности магнитных аномалий на высоте 5 и 4 км над уровнем моря соответственно. Исходные сеточные данные в формате GeoTIFF были импортированы в отдельную файловую базу геоданных (БГД) — формат gdb ESRI ArcGIS — и оформлены в виде слоя ГИС с последующим включением в картографический сервис "Геофизика" на сервере ГЦ РАН.

11.3. Расширение функциональных возможностей тематического геопортала

11.3.1. Структура программного комплекса для взаимодействия с БГД

Основным средством для взаимодействия с геоданными, накапливаемыми в БГД ГЦ РАН является веб-ориентированный программный комплекс, основа которого — тематический геопортал. Созданный комплекс включает в себя сервер БГД, ГИС-сервер и веб-сервер. Общая упрощенная схема взаимодействия элементов комплекса приведена на рисунке 11.2.



Рисунок 11.2 – Схема взаимодействия элементов комплекса

На сервере БД развернуто файловое хранилище и реляционная база данных под управлением СУБД Microsoft SQL Server Express. В базе хранятся растровые и векторные слои данных по геофизике и другим тематическим категориям по наукам о Земле (геодезия, геология, полезные ископаемые и др.). ГИС-сервер позволяет организовать доступ к пространственным данным в БГД посредством их публикации в формате картографических сервисов. Взаимодействие между сервером БД и ГИС-сервером осуществляется по защищенной локальной сети.

Пользователь обращается к данным с помощью клиентского приложения, развернутого на веб-сервере. Через него происходит обращение к картографическим сервисам и сервисам геообработки, опубликованным на ГИС-сервере. Оно является основным пользовательским инструментом геопортала. Приложение предоставляет пользователю список доступных пространственных данных и набор инструментов геообработки, которые можно к ним применять. В 2017 г. были проведены работы по расширению функциональных возможностей приложения и геопортала. Были добавлены функции поиска данных; инструменты для работы с самой картой: измерение расстояний, площадей и определение координат точек.

11.3.2. Интерактивное картографическое приложение для интернет-сайта международной сети магнитных наблюдений INTERMAGNET

В 2017 г. по предложению руководства международной сети магнитных наблюдений INTERMAGNET было создано интерактивное приложение для представления положения обсерваторий сети на карте для соответствующего раздела на интернет-сайте INTERMAGNET (<http://intermagnet.org/imos/imomap-eng.php>). В предыдущей версии сайта карта представляла собой простое растровое изображение, что было крайне негибким и неудобным решением. Было предложено создать интерактивную карту с возможностью обращения к базе данных, содержащей справочную информацию по каждой из обсерваторий. Реализация интерактивного приложения выполнена при помощи мощной библиотеки ArcGIS API for JavaScript. Обсерватории отмечены на карте пунсонами с изображением эмблемы сети INTERMAGNET. Для каждой обсерватории можно получить дополнительную атрибутивную информацию, кликнув по ней (рис. 11.3).

Magnetic Observatories (Map)

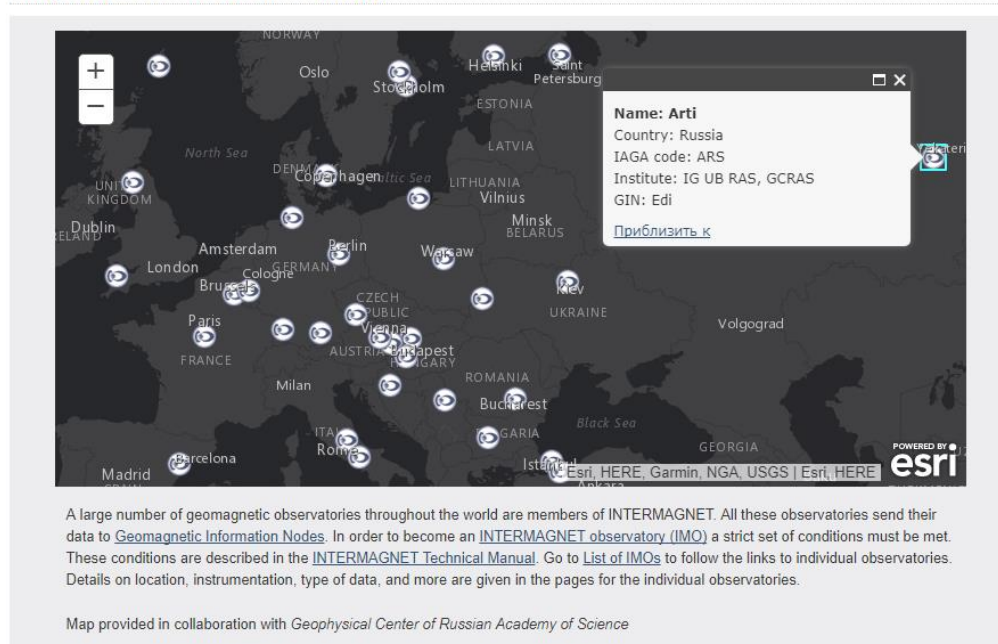


Рисунок 11.3 – Внешний вид интерактивного картографического приложения для интернет-сайта международной сети магнитных наблюдений INTERMAGNET (<http://intermagnet.org/imos/imomap-eng.php>). Вызвано окно с метаданными для обсерватории "Арти" (ARS)

11.3.3. Инструменты геообработки

Важнейшим свойством созданного комплекса является его аналитическая компонента. Она представлена в виде расширяемой базы алгоритмов интеллектуального анализа данных, интегрированных в среду ГИС и опубликованных в качестве инструментов геообработки. Основу базы составляют разрабатываемые в ГЦ РАН алгоритмы топологической фильтрации и кластерного анализа пространственных геолого-геофизических данных, основанные на ДМА. На данный момент в алгоритмический каталог комплекса включены следующие алгоритмы ДМА: "Монолит", "Роден-2" и "DPS" [O et al., 2015; Soloviev et al., 2016]. В 2017 г. был разработан отдельный набор инструментов (toolbox) кластерного анализа для настольного приложения ArcGIS Desktop, на который было получено свидетельство об интеллектуальной собственности [Соловьев и др., 2017]. В 2017 г. алгоритм DPS [Agayan et al., 2014; Nikolov et al., 2015] был адаптирован для работы с двумерными растровыми данными и добавлен в каталог алгоритмов описываемой системы для работы с растровыми слоями геоданных, значение в каждом пикселе которых отражает изменение того или иного физического параметра (рельеф местности, аномалия геоида, аномалия гравитационного поля, магнитная аномалия и т.п.). Важным преимуществом алгоритма является его способность выделять локализованные аномалии, которые в абсолютных значениях могут оказаться достаточно слабыми. Это достигается за счет элементов нечеткой математики, лежащих в основе ДМА.

Список использованных источников

- Соловьев А.А., Краснопёров Р.И. и др. Toolbox "Кластерный анализ" для работы в среде ArcGIS // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2017. № RU 2017617020
- Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R. et al. Discrete Perfect Sets and their application in cluster analysis // *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, Vol. 50, № 2, P. 176–190. DOI: 10.1007/s10559-014-9605-9
- Dyment J., Lesur V. et al. [the WDMAM Task Force; the WDMAM Evaluators; the WDMAM Data Providers] World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0. — IAGA, CGMW, 2015. Map available at <http://www.wdmam.org>
- Korhonen J. et al. Magnetic anomaly map of the world, and associated DVD. Scale 1:50 000 000 — France, Paris: Commission for the geological map of the world, UNESCO, 2007.
- Lesur V., Hamoudi M. et al. Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // *Earth, Planets and Space*, 2016, Vol. 68, № 1. DOI: 10.1186/s40623-016-0404-6
- Maus S., Barckhausen U. et al. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, Vol. 10, № 8. DOI: 10.1029/2009GC002471
- Maus S., Sazonova T. et al. National Geophysical Data Center candidate for the World Digital Magnetic Anomaly Map, *Geochem // Geophys. Geosyst.*, 2007, Vol. 8. Q06017, DOI: 10.1029/2007GC001643.
- Maus S., Yin F. et al. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, Vol. 9, № 7. DOI: 10.1029/2008gc001949
- Meyer B., Saltus R. et al. EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution) Version 3. — USA: National Centers for Environmental Information, NOAA, Model., 2017. DOI: 10.7289/V5H70CVX
- Nikolov B.P., Zharkikh J.I. et al. Integration of data mining methods for Earth science data analysis in GIS environment // *Russian Journal of Earth Sciences*, 2015, Vol. 15, № 4. ES4004, DOI: 10.2205/2015ES000559
- Soloviev A.A., Zharkikh J.I. et al. GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform // *Russian Journal of Earth Sciences*, 2016, Vol. 16, № 6. ES4004, DOI: 10.2205/2016ES000587

12. Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0009

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610080-5

Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

Ответственный исполнитель: зам. директора по науке ГЦ РАН,

чл.-корр. РАН А. А. Соловьев

12.1. Распознавание новых всплесков векового ускорения за период 1991.0–2015.0

12.1.1. Исходные данные

Нами рассматривались данные глобального множества обсерваторий за период 1991.0–2015.0. Отбор обсерваторий проводился по следующим критериям: не менее 17 полных лет данных за период 1991.0–2015.0, геомагнитная широта обсерватории в пределах ± 55 градусов. Нами рассматривались исключительно обсерватории сети ИНТЕРМАГНЕТ и данные статуса "окончательные", т.к. лишь они удовлетворяют высоким стандартам качества, в особенности в отношении базисных линий, что принципиально для точного расчета ВУ. Несмотря на жесткость установленных критериев, записи некоторых обсерваторий содержали большое количество зашумленных и проблемных измерений, достигавшее 20% от всего множества данных. Все рассматриваемые данные были скорректированы на предмет скачков для чего использовалась информация из базы данных "World Monthly Means Database" [Chulliat, Telali, 2007] и базы "Worldwide Observatory Annual Means" (http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/data/annual_means.shtml). В результате были отобраны 56 обсерваторий (рис. 12.1), к данным которых применялся созданный метод на базе гравитационного сглаживания (GrS) [Agayan *et al.*, 2014] для расчета ВХ и ВУ отдельно для каждой компоненты.

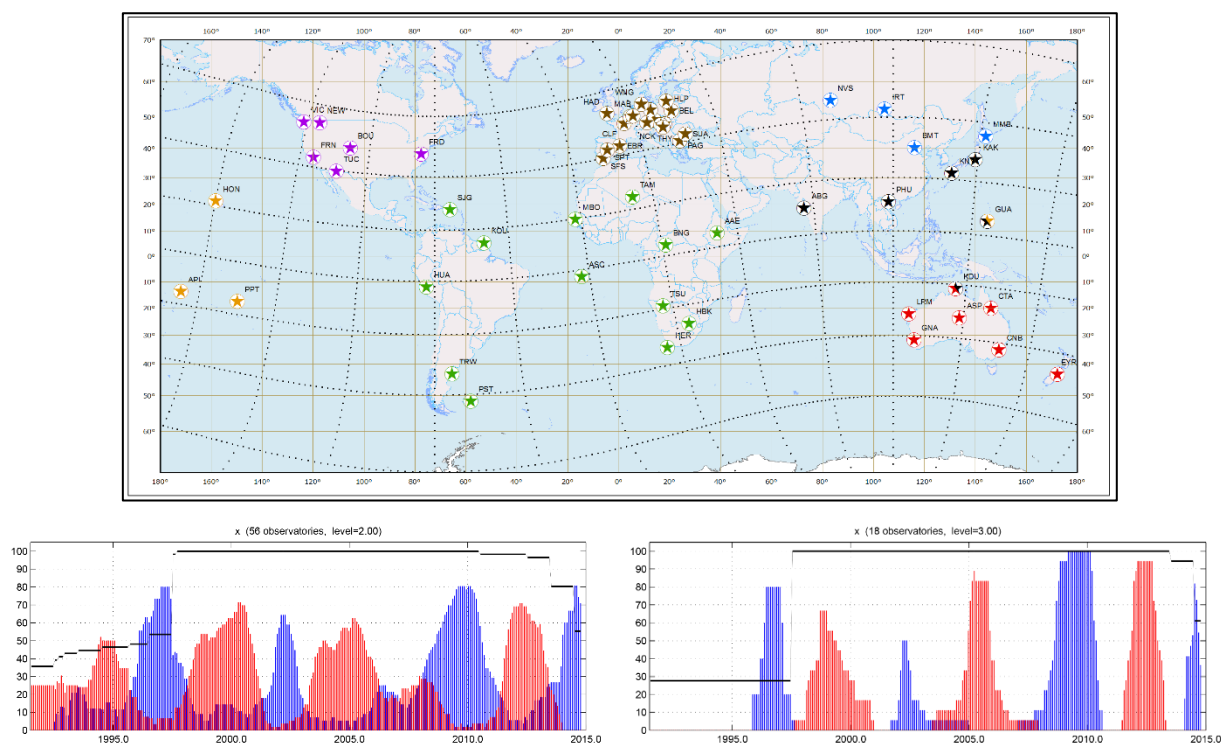


Рис. 12.1 – Сверху: карта обсерваторий, данные которых использовались для распознавания глобальных и региональных всплесков ВУ. Снизу: характеристические функции (ХФ) для записи $d^2X/\text{год}^2$ по данным всего множества обсерваторий при пороге $A=2 \text{ нТл/год}^2$ (слева) и европейских обсерваторий при пороге $A=3 \text{ нТл/год}^2$ (справа). Синие и красные столбики отражают ежемесячный процент обсерваторий, для которых $d^2B/dt^2 < -A$ (отрицательные всплески ВУ) и $d^2B/dt^2 > A$ (положительные всплески ВУ) соответственно. Пики ХФ свидетельствуют о всплесках ВУ в районе 1996, 1999, 2002, 2006, 2009, 2012 и 2014 гг.

12.1.2. Глобальный анализ распознанных всплесков ВУ

Для распознавания всплесков ВУ по множеству обсерваторий для каждой компоненты мы вводим зависящую от времени характеристическую функцию (ХФ), определяемую как процент обсерваторий из числа доступных, для которых ВУ превышает заданный порог A за каждый месяц. Как будет показано далее, ХФ рассчитываются для разных подмножеств обсерваторий, от региональных до глобального.

Как видно из рис. 12.1, ХФ для компонент X и Z , построенные по всем обсерваториям, имеют локальные экстремумы в районе 1996, 1999, 2002, 2006, 2009, 2012 и 2014 гг.

Это является явным подтверждением того, что наш метод способен детектировать повышенную энергию ВУ на глобальном уровне, несмотря на то, что выбранные обсерватории характеризуются ограниченным и неоднородным географическим покрытием, и ВУ не продлевалось вглубь до границы ядро-мантия. Второе ограничение вытекает из того факта, что невозможно продлевать вглубь данные, зарегистрированные в одной точке на поверхности Земли. Отсюда следует, что наибольшие масштабы доминируют в сигнале ВУ, детектируемом нашим методом. Вместе с тем известно, что в сигнале ВУ на границе ядро-мантия доминируют промежуточные масштабы, особенно

степени СГА от 4 до 6 [Chulliat, Maus, 2014]. Интересно отметить, что пики ХФ по Y-компоненте имеют временной сдвиг от нескольких месяцев (2012) до двух лет (2006) по отношению к ранее установленным эпохам всплесков ВУ. Причина не совсем ясна: это может быть связано с продолжением вверх главного МПЗ от границы ядро-мантия до поверхности Земли и проявлением экстремумов на X- и Y-компонентах несколько в иных регионах на поверхности, что, в свою очередь, может сказываться на ХФ по данным фиксированного набора обсерваторий с неоднородным покрытием. Рисунок 12.1 также демонстрирует чередование знака всплесков ВУ на ХФ по компонентам X и Z, не только за период 2005–2012 гг., но и на всем рассматриваемом интервале. Таким образом, наш метод корректно детектирует полярность всплесков на поверхности жидкого ядра на глобальном уровне – информация, которая не содержится в энергетическом спектре ВУ и может быть только восстановлена путем картографирования ВУ на границе ядро-мантия. При увеличении порога от 2 до 5 нТл/год² некоторые пики становятся острее (напр., в 2009 и 2012 гг. на X-компоненте), а некоторые – целиком сглаживаются (напр., в 2012 на Z-компоненте). Это свидетельствует о том, что наш метод очень чувствителен к пороговым значениям – для корректного детектирования всплесков необходимо рассматривать набор таких значений.

Все четыре новых всплеска ВУ (1996, 1999, 2002 и 2014 гг.) устойчиво детектируются на ХФ по X-компоненте при увеличении порогового значения A до 5 нТл/год². Несмотря на то, что их амплитуда становится меньше, чем у всплесков 2009 и 2012 гг., по амплитуде они сравнимы или даже больше, чем всплеск 2006 г. В случае компоненты Z картина менее ясная, т.к. амплитуды уменьшаются для всех эпох, однако локальные максимумы соответствующей ХФ по-прежнему заметны в районе 1997, 1999 и 2002 гг. Не наблюдается максимума ни в 2014, ни в 2012 гг., что свидетельствует о том, что, возможно, географические зоны с наибольшим ВУ на Z-компоненте за эти две эпохи находятся вне областей расположения выбранных обсерваторий. Как и при меньшем пороговом значении 2 нТл/год² полярность пиков ХФ чередуется с 1997 по 2014 гг. как по X-, так и по Z-компоненте.

12.1.3. Региональный анализ распознанных всплесков ВУ

Для определения регионального распределения новых всплесков ВУ мы провели анализ ХФ отдельно по каждому из регионов: Тихоокеанский, Северо-американский, Атлантический, Европейский, Северо-азиатский, Южно-азиатский и Австралийский. Региональные подмножества использованных обсерваторий помечены разным цветом на рисунке 12.1. Результаты представлены в таблице 12.1. Она содержит информацию о наличии наиболее устойчивых всплесков ВУ, видимых при разных пороговых значениях A на соответствующих ХФ, а также информацию об их полярности ("+" для положительных и "-" для отрицательных). В Атлантическом регионе все всплески ВУ устойчиво детектированы с 1997 по 2014 гг. на X-компоненте. Их полярность чередуется от одного всплеска к последующему. Иначе ситуация выглядит на Z-компоненте, поскольку всплеск 2014 г. не проявлен на этой компоненте, а некоторые последовательные всплески имеют одинаковую полярность. Наибольшие амплитуды всплесков на Z-компоненте наблюдаются на обсерваториях Херманус (HER, ЮАР),

Хартебисток (НБК, ЮАР) и Трелев (TRW, Аргентина) в 2002–2003 гг., Бангуй (BNG, Центральная африканская республика) и HER в 1999–2000 г., и о. Вознесения (ASC, Великобритания), BNG, Мбур (МБО, Сенегал), Таманрассет (ТАМ, Алжир) и Цумеб (TSU, Намибия) в 1996–1997 гг. Все всплески были также детектированы с чередующейся полярностью на X -компоненте в Европейском и Южно-азиатском регионах. Это особенно заметно на рис. 12.1, где $X\Phi$ по X -компоненте с пороговым значением ± 3 нТл/год² построена по данным Европейских обсерваторий. Наоборот, более сложная картина возникает в Тихоокеанском, Австралийском, Северо-азиатском и Северо-американском регионах, где либо не наблюдается признаков всплесков, либо присутствует одинаковая полярность у некоторых последовательных всплесков.

При изучении $X\Phi$ по Y -компоненте, построенной отдельно для Южно-азиатского региона, было обнаружено, что пики 2006 и 2009 гг. имеют одинаковую отрицательную полярность. Скорее всего это связано с географическим распределением выбранных обсерваторий, которые все находятся в северном полушарии. Именно поэтому по ним не детектируется эффект на Y -компоненте, вызванный наиболее интенсивным участком ВУ на границе ядро-мантия, который локализован в южном полушарии. Данный эффект в наибольшей степени проявляется в восточной и западной частях соответствующего участка, на что указывает функция Грина, устанавливающая связь между радиальным полем на границе ядро-мантия и Y -компонентой на поверхности Земли (напр., [Constable et al., 1993; Chulliat et al, 2010]). Таким образом, несмотря на то, что наш метод корректно детектирует зоны, в которых всплески ВУ максимальны, он не способен детектировать смену полярности отдельных участков ВУ на границе ядро-мантия.

Таблица 12.1 – Всплески ВУ в ХФ, построенных по данным региональных подмножеств обсерваторий, и их полярности

Регион/ год	Тихий океан (4 обс.)			Сев. Америка (6 обс.)			Атлантика (13 обс.)			Европа (18 обс.)			Сев. Азия (4 обс.)			Юж. Азия (6 обс.)			Австралия (7 обс.)		
	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$
1996– 1997	-		+	-	-		-	-	+	-		+				-			-		+
1999– 2000	+	+	+			-	+		-	+	-		+		-	+		-		-	
2002– 2003	-	+	+			+	-		-	-		+	-		+	-	-		-		
2005– 2007							+	+	-	+			-			+		+	+	-	-
2009– 2010	-			-		-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-		-		-
2012– 2013	+		+				+	-	-	+	-	-	+	+		+			+		
2014– 2015	-			-	+	+	-			-		+	-		+	-		-	-	+	-

12.1.4. Взаимосвязь новых всплесков ВУ с геомагнитными джерками

Из полученных ранее результатов следует, что всплески ВУ разной полярности должны чередоваться с V-образными геомагнитными джерками на земной поверхности. При этом географический охват таких джерков должен соответствовать расположению предшествующего и последующего всплесков ВУ. Это было справедливо для пар всплесков ВУ 2006/2009 и 2009/2012, между которыми наблюдались джерки 2007 и 2011 гг. соответственно. Из полученных нами результатов следует существование джерков между: 1996 и 1999 гг., 1999 и 2002 гг., 2002 и 2006 гг., 2012 и 2014 гг. Здесь следует отметить, что датировка всплесков ВУ и связанных с ними джерков определяется с погрешностью около 1 года из-за неравномерной расстановки обсерваторий (что также приводит к временной разнице по отдельным компонентам) и фильтрующего эффекта слабопроводящей мантии. Также всплески ВУ имеют протяженность более 1–2 лет, а установленные нами даты всплесков ВУ являются лишь периодами, за которые количество обсерваторий с превышающим порог ВУ достаточно велико.

О существовании джерка около 2014 г. ранее сообщалось в работе [Torta et al., 2015]. На Y-компоненте этот джерк был наиболее интенсивен в Атлантическом регионе. Он также явно проявлялся на компонентах X и Z в Европейском и Австралийском регионах. Эта картина согласуется с нашими открытиями, полученными методом на базе GrS. Всплеск ВУ 2014 г. начинается в начале года в Европе, а чуть ранее – в Австралии. С получением новых данных за 2015 и 2016 гг. мы, вероятно, обнаружим, что этот всплеск продолжается и в 2015 г., что позволит нам определить его временные границы более точно.

Джерки были также ранее детектированы в 2003 г. [Olsen, Mande, 2007] и 1999 [Mande et al., 2000; De Michelis, Tozzi, 2005], в основном в Европе. Из рисунка 12.1.1 видно, что джерк 2003 г. имел место между всплесками ВУ 2002 и 2005 гг. и что его эффект действительно был силен в Европе, а также Австралии. Сложнее связать джерк 1999 г., описанный в литературе, с обнаруженными нами всплесками ВУ, поскольку обе процитированные работы основаны на анализе Y-компоненты, на которой наши всплески ВУ менее очевидны. Количество обсерваторий с большим ВУ на Y-компоненте достигает максимума в 1998 г., непосредственно перед обнаруженным джерком 1999 г. Однако при анализе компонент X и Z мы обнаруживаем V-образные джерки около 1998 г., например, на обсерваториях Гуам (GUA, Западная часть Тихого океана), Мемамбецу (ММВ, Япония), Немек (NGK, Германия), Сан Хуан (SJG, Пуэрто-Рико) и ТАМ, которые расположены в разных частях Земли. Это хорошо согласуется с результатами работы [Brown et al., 2013], где на базе метода систематического выделения характерных для джерков сигналов по данным глобальной сети обсерваторий был обнаружен экстремум в количестве детектированных джерков в 1995–1998 гг. Тем самым мы считаем, что всплески ВУ 1996 и 1999 гг. действительно разделены V-образным джерком, в основном на компонентах X и Z, а иногда и Y-компоненте, во многих частях мира.

Несмотря на то, что ранее в литературе не сообщалось о джерке между всплесками ВУ 1999 и 2002 гг., V-образные вариации ВХ можно наблюдать на нескольких обсерваториях в районе 2001–2002 гг. Эти смены полярности ВУ ранее не классифицировались как джерк скорее всего из-за недостаточной стремительности,

свойственной типичным джеркам. Тем не менее, мы предпочитаем классифицировать их как джерк, следуя определению, предложенному в работе [Chulliat, Maus, 2014], так как он имеет место между двумя последовательными всплесками ВУ (рис. 12.2).

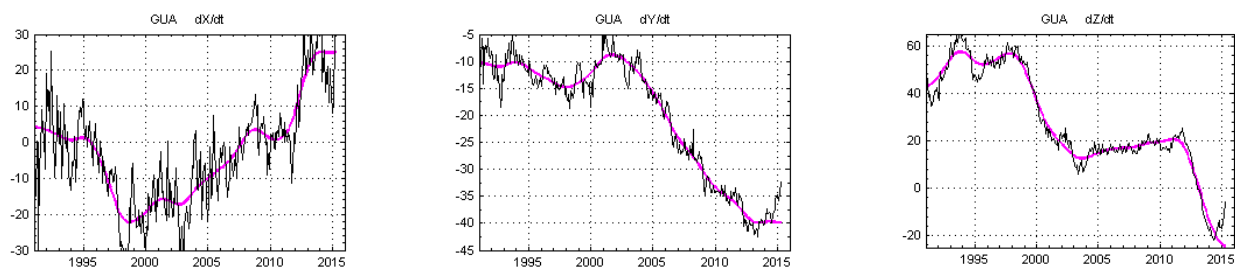


Рисунок 12.2 – ВХ (нТл/год) по методу на базе GrS (фиолетовый) и ВХ по несглаженным данным (черный) на обсерватории GUA

12.2. Усовершенствование наблюдений магнитного поля на обсерваториях "Климовская" и "Казань"

12.2.1. Обработка и анализ данных магнитной обсерватории "Климовская" за 2016 г.

В ходе продолжения работы по улучшению качества данных обсерватории "Климовская" (IAGA-код KLI) [Соловьев и др., 2016; *Geomagnetic data...*, 2015; Soloviev et al., 2015] был подготовлен набор очищенных и проверенных обсерваторских данных за 2016 г. Очистка и формирование окончательных временных рядов вариаций магнитного поля Земли осуществлялись в соответствии с техническим руководством международной сети наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ [St-Louis et al., 2012].

В ходе обработки данных было разработано несколько программных инструментов, позволяющих в автоматическом режиме выделять и устранять выбросы на секундных данных. Кроме того, применение меры аномальности [Soloviev et al., 2016] привело к созданию метода обратного обнаружения техногенных помех по минутным данным. Высокое временное разрешение меры аномальности (1 минута) позволило локализовать техногенные помехи в вариационных данных, не обнаружимые или трудно обнаружимые с помощью стандартных подходов. При подготовке данных особое внимание было уделено анализу абсолютных данных, как наиболее проблемному набору данных обсерватории. Так, часть абсолютных измерений была отбракована благодаря вспомогательным значениям измерительных погрешностей углов теодолита. Глубокий анализ ряда абсолютных измерений позволил обнаружить скачки (сбои) в работе феррозондового магнитометра обсерватории, а также выработать рекомендации, направленные на улучшение качества абсолютных измерений.

После отбраковки неверных наблюдений и фильтрации выбросов в наблюдаемых значениях каждый из рядов базисных значений компонент интерполировался алгоритмом GrS (гравитационное сглаживание) [Агаян и др., 2010; Гвишиани и др., 2011; Agayan et al., 2014] с параметром $\lambda=0.99999$ для построения регулярной базисной кривой по каждой компоненте (рис. 12.3а). Ввиду наличия сбоев вариометра и наличия пропуска данных с 11 июля по 22 сентября 2016 г. было построено три непрерывных базисных отрезка с шагом дискретизации 1 значение в сутки [St-Louis et al., 2012] (рис. 12.3б).

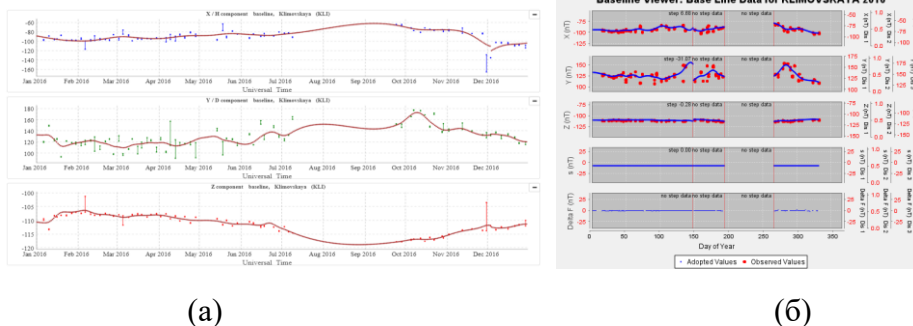


Рисунок 12.3 – Базисные кривые для компонент X, Y и Z обсерватории "Климовская" за 2016 г.: необработанные (а) и обработанные в официальном приложении ИНТЕРМАГНЕТ (б)

Заявка на включение обсерватории в сеть ИНТЕРМАГНЕТ обсуждалась на ежегодном собрании экспертов ИНТЕРМАГНЕТ в г. Херманус (ЮАР) в сентябре 2017 г. Были выработаны рекомендации, направленные на улучшение обработки данных и последующее включение обсерватории в состав международной сети.

12.2.2. Регистрация секундных данных на обсерватории "Казань"

На совместной с Казанским федеральным университетом обсерватории "Казань" (Зеленодольский район, республика Татарстан) была осуществлена наладка скалярного магнитометра POS-1 и настройка регистрации значений полной напряженности магнитного поля с трёхсекундной дискретизацией на компьютере сбора данных. Также был запущен векторный магнитометр LEMI-25, налажена регистрация секундных векторных измерений магнитного поля и запись температурных данных в минутные и секундные файлы на компьютере сбора данных. Схема подключения приборов приведена на рисунке 12.4.

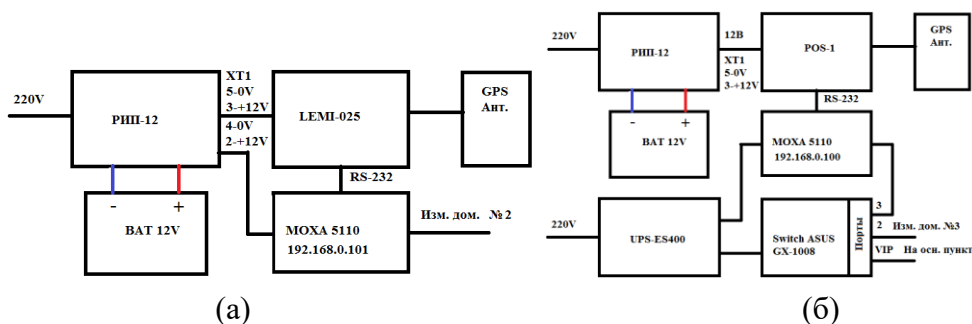


Рис. 12.4 – Схема подключения приборов LEMI-025 (а) и POS-1 (б) на обсерватории "Казань"

В итоге была настроена передача всех регистрируемых данных в геомагнитный центр на базе ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru/>) в режиме квазиреального времени. Пример получаемых данных в графическом формате с сайта геомагнитного центра представлен на рисунке 12.5.

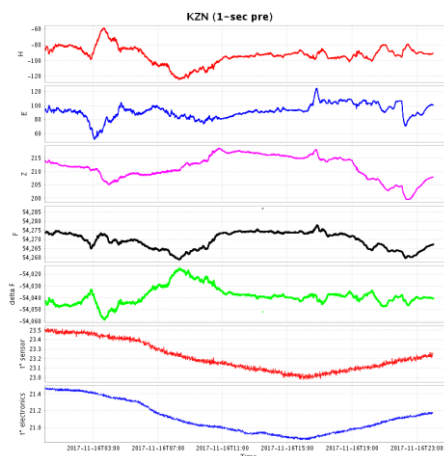


Рисунок 12.5 – Пример 1-секундных оперативных измерений компонент (H , E , Z) МПЗ, 3-секундных измерений полной напряженности (F) МПЗ, калибровочной кривой (ΔF), 1-секундных измерений температуры на сенсоре (t sensor) и блоке электроники (t electronics) вариометра за 16 ноября 2017 г. (<http://geomag.gcras.ru/>)

Список использованных источников

- Агаян С.М., Гвишиани А.Д. и др. Сглаживание временных рядов методами дискретного математического анализа // Российский журнал наук о Земле, 2010, Т.11. RE40001, DOI: 10.2205/2009ES000436
- Гвишиани А. Д., Агаян С. М. и др. Гравитационное сглаживание временных рядов // Тр. ИММ УрО РАН, 2011, Т. 17, № 2, С. 62–70.
- Соловьев А. А., Сидоров Р. В. и др. Новая геомагнитная обсерватория "Климовская" // Геомагнетизм и аэрномия, 2016, Т. 56, № 3, С. 365–379.
- Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R. et al. Weighted gravitational time series smoothing // Russ. J. Earth. Sci., 2014, Vol. 14, № 3. ES3002, DOI:10.2205/2014ES000543.
- Brown W.J., Mound J.E. et al. Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008 // Physics of the Earth and Planetary Interiors, P. 62–76. ISSN 0031-9201
- Chulliat A., Telali K. World Monthly Means DataBase Project // Geophys. Pol. Acad. Sc., 2007. C-99 (398)
- Chulliat A., Thebault E. et al. Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks // Geophys. Res. Lett., Vol. 37. L07301, DOI:10.1029/2009GL042019
- Chulliat A., Alken P. et al. Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core. Geophys. Res. Lett., Vol. 42, P. 3321–3329. DOI:10.1002/2015GL064067
- Chulliat A., and Maus S. Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010, J. Geophys. Res. Solid Earth, 2014, Vol. 119, P. 1531–1543. DOI:10.1002/2013JB010604
- Constable C. G., Parker R. L. et al. Geomagnetic field models incorporating frozen-flux constraints // Geophys. J. Int., Vol. 113, P. 419–433.

Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. DOI:10.2205/kli2011

St-Louis B. J., Sauter E. A. et al. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6, 2012, P. 100.

Mandea M., Bellanger E. et al. A geomagnetic jerk for the end of the 20th century? // *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 183, № 3–4, P. 369–373. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00284-3

Michelis P., Tozzi R. A Local Intermittency Measure (LIM) approach to the detection of geomagnetic jerks // *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 235, № 1–2, P. 261–272.

Olsen N., Mandea M. Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 255, P. 94–105.

Soloviev A., Dobrovolsky M. et al. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI) // Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. DOI:10.2205/kli2011min

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

Torta J. M., Pavón-Carrasco F. J. et al. Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 42, P. 7933–7940, DOI:10.1002/2015GL065501

13. Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений (этап 2017 года)

Номер регистрации в ИС ФАНО: 0145-2016-0010

Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610081-2

Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

13.1. Исследование эффективности методов SC - распознавания

В соответствие с заданием для третьего этапа проекта 2017 года было осуществлено исследование эффективности предложенных методов SC- распознавания, базирующихся на частотно-временных представлениях. Были учтены возможности построения алгоритмов фильтрации на синусоидальных, полигармонических и кусочно-линейных моделях для аппроксимации наблюдений от системы векторного и скалярного магнитометров при геомагнитных наблюдениях ряда обсерваторий.

1. Рассмотрим возможности повышения эффективности за счёт снижения временных затрат при решении задачи построения локальных синусоидальных аппроксимационных моделей при SC-распознавании.

Положим, что заданы локальные наблюдения $y(Ti)$, $i = 0, 1, \dots, N-1$, N – число наблюдений, T – шаг дискретизации. Локальную кусочно-синусоидальную модель представим в виде $y_M(c, Ti) = a \cos \omega Ti + b \sin \omega Ti$, где $c^T = (a, b, \omega)$ – вектор параметров модели. Сведём нахождение оптимальных значений параметров модели к задаче минимизации функционала $S(c, y)$

$$S(c, y) = \sum_{i=0}^{N-1} (y(Ti) - y_M(c, Ti))^2, \quad c^\circ = \arg\{\min_c S(c, y)\}.$$

Реализуем двухэтапную минимизацию. На первом этапе зафиксируем частотный параметр ω ; вычислим выражения для весовых коэффициентов, коэффициентов Фурье и оценок частично оптимальных параметров $\alpha_{rs}(\omega)$, $b_r(\omega)$ $r, s = 1, 2$, $a^\circ(\omega)$, $b^\circ(\omega)$. На втором этапе вычислим остаточную сумму $S_0(\omega, y)$ и произведём её минимизацию; оптимальную оценку частоты и амплитудных параметров представим следующими формулами

$$S_0(\omega, y) = -a^\circ(\omega)b_1(\omega) - b^\circ(\omega)b_2(\omega), \quad \omega^\circ = \arg(\min_\omega S_0(\omega, y)), \quad a^\circ = a^\circ(\omega^\circ), \quad b^\circ = b^\circ(\omega^\circ). \quad (1)$$

Организуем поиск по частоте для (1), зададим ω_k , $k = 1, \dots, k_f$, вычислим значения $S_0(\omega_k, y)$; найдём оптимальное значение k° и оптимальные значения параметров

$$k^\circ = \arg\{\min_k S_0(\omega_k, y)\}, \quad \omega^\circ = \omega_{k^\circ}, \quad a^\circ = a^\circ(\omega_{k^\circ}), \quad b^\circ = b^\circ(\omega_{k^\circ}). \quad (2)$$

С целью уменьшения времени вычислений при поиске предварительно сформируем два одномерных массива базисных функций $\cos \omega_k Ti$, $\sin \omega_k Ti$ и два двумерных массива элементов $c_{1,ki}$, $c_{2,ki}$. Найдём одномерные массивы $b_{01}(\omega_k)$, $b_{02}(\omega_k)$, $a^\circ(\omega_k)$, $b^\circ(\omega_k)$, одномерный массив остаточных сумм $S_0(\omega_k, y)$ и соответствующие оптимальные значения параметров модели

$$S_0(\omega_k, y) = -a_1^\circ(\omega_k)b_{01}(\omega_k) - b_2^\circ(\omega_k)b_{02}(\omega_k), \quad k = 1, \dots, k_f. \quad (3)$$

Предложенное преобразование алгоритма, которое сводится к предварительному вычислению одномерных и двумерных массивов и размещению их в оперативной памяти ЭВМ (возможно, достаточно большого объёма) и к реализации вычислений (2), (3) позволит существенно снизить временные затраты для процедуры SC-распознавания.

2. Рассмотрим возможности снижения временных затрат при решении задачи SC-распознавания на основе локальных полигармонических аппроксимационных моделей за счёт организации специального частотного перебора. Представим локальную полиномиальную аппроксимационную модель следующим соотношением

$$y_M(c, Ti) = \sum_{l=1}^L (a_l \cos \omega_l Ti + b_l \sin \omega_l Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

где вектор $c^T = (a^T, b^T, \omega^T) = (a_1, a_2, \dots, a_L, b_1, b_2, \dots, b_L, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L)$ имеет размерность $(3L, 1)$. На линейные амплитудные параметры ограничения не накладываются: $-\infty \leq a_l \leq \infty, -\infty \leq b_l \leq \infty, l = 1, 2, \dots, L$. Для векторов нелинейных частотных параметров с учётом их упорядочивания, допустимое множество выглядит следующим образом

$$\bar{\Omega}_0^L = \{ (\omega_1, \dots, \omega_L) : \omega_{\min} \leq \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_L \leq \omega_{\max} \}, \quad \omega \in \bar{\Omega}_0^L. \quad (5)$$

Задачу оценивания параметров базисных полигармонических функций свяжем с аппроксимацией наблюдений $y(Ti)$ модельной функцией $y_M(c, Ti)$ (4) и нахождением оптимальных значений амплитудных и частотных параметров. Сформируем функционал

$$S(a, b, \omega, y) = \sum_{i=0}^{N-1} (y(Ti) - y_M(c, Ti))^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (y(Ti) - \sum_{l=1}^L (a_l \cos \omega_l Ti + b_l \sin \omega_l Ti))^2. \quad (6)$$

Минимизируем введённый функционал

$$(a^\circ, b^\circ, \omega^\circ) = \arg \{ \min_{a, b, \omega \in \bar{\Omega}_0^L} S(a, b, \omega, y) \}. \quad (7)$$

Полигармоническую модель является линейной функцией по части параметров

$$\sum_{l=1}^L (a_l \cos \omega_l Ti + b_l \sin \omega_l Ti) = \beta^T \varphi(\omega, Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

$$\varphi(\omega, Ti)^T = (\cos(\omega_1 Ti), \dots, \cos(\omega_L Ti), \sin(\omega_1 Ti), \dots, \sin(\omega_L Ti)).$$

Положим, что вектор наблюдений Y имеет размерность $(N, 1)$. С использованием $\varphi(\omega, Ti)$ сформируем матрицу плана сигнала $X(\omega)$ размерности $(N, 2L)$

$$Y^T = (y(T \cdot 0), y(T \cdot 1), \dots, y(T(N-1))), \quad X(\omega) = \begin{pmatrix} \phi(\omega, T \cdot 0) \\ \phi(\omega, T \cdot 1) \\ \dots \\ \phi(\omega, T(N-1)) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

С применением (9) функционал (6) запишем в векторно-матричном виде

$$S(\beta, \omega, Y) = (Y - X(\omega)\beta)^T (Y - X(\omega)\beta).$$

На первом этапе минимизации для $S(\beta, \omega, Y)$ фиксируем нелинейные частотные параметры $\omega = const$ с учётом, что $\omega \in \overline{\Omega}_0^L$, и находим частично оптимальные значения линейных параметров $\beta^\circ(\omega, Y)$

$$\beta^\circ(\omega, Y) = \arg\{\min_{\beta, \omega=const} S(\beta, \omega, Y)\},$$

С учётом $\beta^\circ(\omega, Y)$ сформируем функционал частичной остаточной суммы

$$S_0(\omega, Y) = S(\beta^\circ(\omega), \omega, Y) = -\beta^{\circ T}(\omega, Y) b(\omega, Y). \quad (10)$$

На втором этапе минимизации для $S_0(\omega, Y)$ осуществим минимизацию по $\omega \in \overline{\Omega}_0^L$.

$$\omega^\circ = \omega^\circ(Y) = \arg\{\min_{\omega \in \overline{\Omega}_0^L} S_0(\omega, Y)\}, \quad \beta^\circ = \beta^\circ(\omega^\circ, Y) = D(\omega^\circ)^{-1} b(\omega^\circ, Y). \quad (11)$$

Алгоритм оценивания параметров строится на базе формул (2.5, 9), проведении вычислений по формулам (10, 11) и минимизации (12) с учётом упорядоченности (5).

Ввиду того, что функционал $S_0(\omega, Y)$ зависит от многих переменных и является многоэкстремальным, его минимизацию произведём при помощи поисковой процедуры нулевого порядка. Для указанной минимизации и получения оценок амплитудных параметров β° (12) реализуем перебор векторов поисковых частот. Значения координат векторов частот выбираем на сетке дискретных значений ω_k в диапазоне $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$

$$\Delta\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / (k_f - 1), \quad \omega_k = \omega_{\min} + \Delta\omega(k - 1), \quad k = 1, \dots, k_f,$$

где k_f — число дискретных частот, $\Delta\omega$ — шаг дискретности. Частоты $\omega_{k_1}, \omega_{k_2}, \dots, \omega_{k_L}$ назначаются из набора дискретных значений ω_k , $k = 1, \dots, k_f$.

Метод задания частот основывается на том, что каждому вектору индексов k^s , может быть поставлен в соответствие вектор поисковых частот ω^s , s — номер вектора.

Координаты $\omega_{k_1}^s, \omega_{k_2}^s, \dots, \omega_{k_L}^s$ для вектора частот ω^s вычисляются по формулам

$$\omega^s = (\omega_{k_1}^s, \omega_{k_2}^s, \dots, \omega_{k_L}^s), \quad \omega_{k_l}^s = \omega_{\min} + \Delta\omega(k_l^s - 1), \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad s = 1, \dots, s_f. \quad (12)$$

Отыскание оптимальных значений для частотных и амплитудных параметров модели на локальном интервале с Y сводится к последовательным вычислениям для $s = 1, \dots, s_f$ ω^s по (13), (8), (9), (10) и (11), и организации перебора

$$s^\circ = \arg\{\min_{s=1, \dots, s_f} S_0(\omega^s, Y)\}, \quad \omega^\circ = \omega^{s^\circ}, \quad \beta^\circ = \beta^\circ(\omega^{s^\circ}). \quad (13)$$

Введение упорядоченности для координат векторов ω из $\overline{\Omega}_0^L$ по (5) существенно снижает количество поисковых вычислений. Нахождение размеров для $\overline{\Omega}_0^L$ и Ω_0^L сводятся к интегралам $V(\Omega_0^L)$, $V(\overline{\Omega}_0^L)$

$$V(\Omega_0^L) = \int_{\omega \in \Omega_0^L} d\omega_1 \dots d\omega_L, \quad V(\overline{\Omega}_0^L) = \int_{\omega \in \overline{\Omega}_0^L} d\omega_1 \dots d\omega_L.$$

Коэффициент $\mathcal{E}(L)$ оценивает относительное уменьшение размеров

$$\mathcal{E}(L) = V(\overline{\Omega}_0^L) / V(\Omega_0^L).$$

Данный коэффициент для $L = 1, 2, 3, 4$ принимал значения $\varepsilon(1) = 1$, $\varepsilon(2) = 0.5$, $\varepsilon(3) = 0.166$, $\varepsilon(4) = 0.002$, которые свидетельствовали о возможной высокой эффективности поиска по векторам частот вследствие учёта упорядоченности.

Величина s_f может быть вычислена, как число сочетаний из k_f элементов по L , $s_f = C(k_f, L)$ и

$$C(k_f, L) = k_f! / (L!(k_f - L)!).$$

Характеристика временных затрат алгоритма для перебора в (14) может быть принята равной $T_1(k_f, L) = k_f! / (L!(k_f - L)!)$. Переходя к асимптотическим оценкам, после упрощений для $k_f \gg L$, получим оценку временной сложности в виде функции $T_2(k_f, L) = O(k_f / L)^L$, которая ведёт себя, также как и $T_1(k_f, L)$. На рисунке 13.1 представлены зависимости числа векторов частот $s_f = C(k_f, L)$ в логарифмическом масштабе для параметров $k_f = 21 - 40$; параметр L принимал значения 3, 5, 7 и 9.

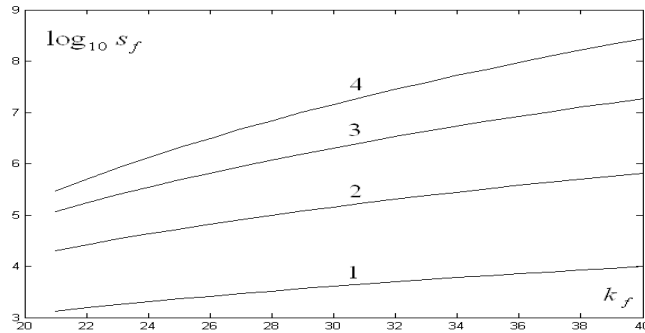


Рисунок 13.1 – Графики зависимостей числа частотных векторов $\log_{10} s_f(k_f, L)$ для параметра $L = 3$ (кривая 1), $L = 5$ (кривая 2), $L = 7$ (кривая 3), $L = 9$ (кривая 4)

Приведённые на рисунке 13.1 графики позволяют сделать вывод, что предлагаемый алгоритм позволяет существенно снизить временные затраты при построении локальных полигармонических моделей в задаче SC-распознавания.

3. Рассмотрим возможности снижения временных затрат при SC-распознавании в задаче построения локальных кусочно-линейных моделей для аппроксимации наблюдений от системы векторного и скалярного магнитометров. Временные затраты уменьшаются в данном случае за счёт перехода от оптимизации путём поискового прямого перебора к оптимизации с использованием линеаризации локальных моделей и вычислении соответствующих квадратичных форм.

Положим, что $H_1(Ti)$, $H_2(Ti)$, $H_3(Ti)$ и $H_0(Ti)$ – исходные функции компонент и модуля вектора напряжённости геомагнитного поля на N -точечном локальном интервале; пусть $y_1(Ti)$, $y_2(Ti)$, $y_3(Ti)$ и $y_0(Ti)$ представляют собой наблюдения от векторного и скалярного магнитометров; введём локальные аппроксимационные модели $H_M(\alpha_n, Ti)$, зависящие от векторов параметров α_n , $n = 1, 2, 3$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$, T – шаг дискретизации. Допустим, что $W_n(Ti)$ – шумовые погрешности наблюдений действуют аддитивно и являются

некоррелированными нормально распределёнными случайными числами с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $\sigma_0^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$. По заданным наблюдениям $y_n(Ti) = H_n(\alpha_n, Ti) + W_n(Ti)$ найдём функции оценок $H_1^\circ(Ti), H_2^\circ(Ti), H_3^\circ(Ti)$, $i = 0, 1, \dots, N-1$, которые должны быть близкими, в определённом смысле, к исходным функциям компонент вектора напряжённости магнитного поля. Функции $H_n^\circ(Ti)$, $n = 1, 2, 3$ примем в качестве результатов фильтрации для наблюдений $y_n(Ti)$, $n = 0, \dots, 3$.

Сформируем составляющие функционалы $S_n(\alpha_n, y_n)$ и $S_0(\alpha, y_0)$, введём блочный вектор $\alpha^T = (\alpha_1^T, \alpha_2^T, \alpha_3^T)$

$$S_n(\alpha_n, y_n) = \sum_{i=0}^{N-1} (y_n(Ti) - H_M(\alpha_n, Ti))^2, \quad (15)$$

$$S_0(\alpha, y_0) = \sum_{i=0}^{N-1} (y_0(Ti) - \sqrt{H_M^2(\alpha_1, Ti) + H_M^2(\alpha_2, Ti) + H_M^2(\alpha_3, Ti)})^2. \quad (16)$$

Исходный функционал представим в виде суммы составляющих функционалов (15), (16)

$$S(\alpha, y) = \frac{1}{4N} (S_1(\alpha_1, y_1) + S_2(\alpha_2, y_2) + S_3(\alpha_3, y_3) + S_0(\alpha, y_0)), \quad (17)$$

где блочный вектор $y^T = (y_0^T, y_1^T, y_2^T, y_3^T)$ имеет размерность $(4N, 1)$.

Отыскание оптимальных значений для параметров α° произведём с использованием минимизации по α исходного функционала $S(\alpha, y)$

$$\alpha^\circ = \arg \{ \min_{\alpha} S(\alpha, y) \}. \quad (18)$$

Оптимальные локальные аппроксимационные функции $H_n^\circ(Ti)$, сформированные с учётом векторов α_n°

$$H_n^\circ(Ti) = H_M(\alpha_n^\circ, Ti), \quad n = 1, 2, 3, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

представим в качестве результата аппроксимации наблюдений от системы магнитометров.

Разработанный алгоритм нелинейной фильтрации был протестирован на модельных геомагнитных наблюдениях с 1-минутной дискретизацией. Исходные модельные функции компонент вектора напряжённости геомагнитного поля $H_{MGn}(Ti)$ представлялись полиномами третьего порядка; модельная функция модуля вектора $H_{MG0}(Ti)$ вычислялась из $H_{MG1}(Ti), H_{MG2}(Ti), H_{MG3}(Ti)$

$$H_{MGn}(Ti) = c_{n,0} + c_{n,1}Ti + c_{n,2}(Ti)^2 + c_{n,3}(Ti)^3, \quad n = 1, 2, 3,$$

$$H_{MG0}(Ti) = \sqrt{H_{MG1}^2(Ti) + H_{MG2}^2(Ti) + H_{MG3}^2(Ti)},$$

$i = 0, 1, \dots, N_f - 1$. Шумовые погрешности $W_n(Ti)$, $n = 0, 1, 2, 3$, моделировались нормально распределёнными случайными числами с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma^2$ и σ_0^2 . Модельные наблюдения компонент и модуля вектора напряжённости геомагнитного поля представлены суммами

$$H_{Mn}(Ti) = H_{MGn}(Ti) + W_n(Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1, \quad n = 0, 1, 2, 3. \quad (20)$$

Были приняты значения параметров модельных функций наблюдений: $c_{1,0} = 13004$, $c_{1,1} = 0.013$, $c_{1,2} = -1.3 \cdot 10^{-5}$, $c_{1,3} = 3 \cdot 10^{-9}$, $c_{2,0} = 5000$, $c_{2,1} = 0.06$, $c_{2,2} = -0.0004$, $c_{2,3} = 0$, $c_{3,0} = 20000$, $c_{3,1} = 0.08$, $c_{3,2} = 0.0007$, $c_{3,3} = 0$; параметр $T = 60c$ определил 1-минутный шаг дискретизации. Модельные наблюдения (20) поступали в формулы (15)–(20) алгоритма нелинейной фильтрации.

Рассматривался случай локальных интервалов без скольжения с числом точек N , $N_{1s} = N(s-1)$, $N_{2s} = N_{1s} + N - 1$, $s = 1, \dots, m$, $mN = N_f$. Вычислялись локальные оценки $H_{ns}^\circ = \alpha_{ns}^\circ$, $s = 1, \dots, m$, формировались последовательности $H_{Ln}^\circ(Ti)$, $n = 1, 2, 3$.

Для случая скользящих локальных интервалов с числом точек N выбирался шаг скольжения N_d , s_0 – число скользящих локальных интервалов. Вычислялась последовательность локальных оценок $\alpha_{n,s}^\circ$, $H_{ns}^\circ = \alpha_{ns}^\circ$, $s = 1, \dots, s_0$ и функции оценок $H_{ns}^\circ(Ti)$, $n = 1, 2, 3$, $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$; далее путем фильтрации со взвешенным усреднением получены оценки $H_{Sn}^\circ(Ti)$, $n = 1, 2, 3$.

На рисунке 13.2 представлены результаты тестирования алгоритма на модельных наблюдениях. Были выбраны значения $N_f = 56$, $N = 8$, параметры шумовых погрешностей магнитометров – $\sigma_0 = 0.5$ нТл, $\sigma = 1.5$ нТл. Пунктирная линия с индексом 1 соответствует исходной модельной функции для компоненты вектора напряжённости геомагнитного поля $H_{MG1}(Ti)$. Ломаная линия с индексом 2 соответствует зашумлённым наблюдениям компоненты $H_{M1}(Ti)$. Кусочно-линейные оценки с индексом 3 представляли собой результат фильтрации без скольжения – $H_{L1}^\circ(Ti)$. Сплошная линия с индексом 4 определяла оценки $H_{S1}^\circ(Ti)$ – результаты фильтрации со скольжением и взвешенным усреднением с $N_d = 1$.

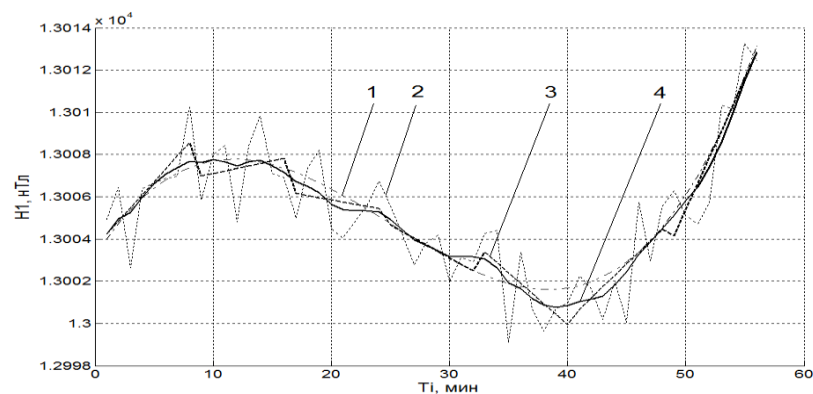


Рисунок 13.2 – Результаты тестирования алгоритма на модельных наблюдениях

Произведённое тестирование алгоритма на 1-минутных геомагнитных наблюдениях позволило сделать экспертный вывод, что СКЗ погрешностей для скользящих моделей со взвешенным усреднением меньше СКЗ погрешностей фильтрации без скольжения, в среднем, на 40–60%.

4.Пример работы алгоритма SC-распознавания продемонстрирован на рисунке 13.3. Линией с индексом 1 обозначены 1-минутные геомагнитные наблюдения компоненты X от обсерватории SPG (Ленинградская обл., Россия) в период геомагнитной бури 17.03.2015 г. Линией с индексом 2 обозначен результат работы алгоритма фильтрации на основе кусочно- линейных моделей. В нижней части рисунка приведён график разности между исходными наблюдениями и результатом фильтрации, на котором хорошо видно выявленное внезапное начало магнитной бури в районе 04:45 по мировому времени. Алгоритм был испытан на данных других обсерваторий в различные буревые периоды и продемонстрировал в целом эффективное SC- распознавание.

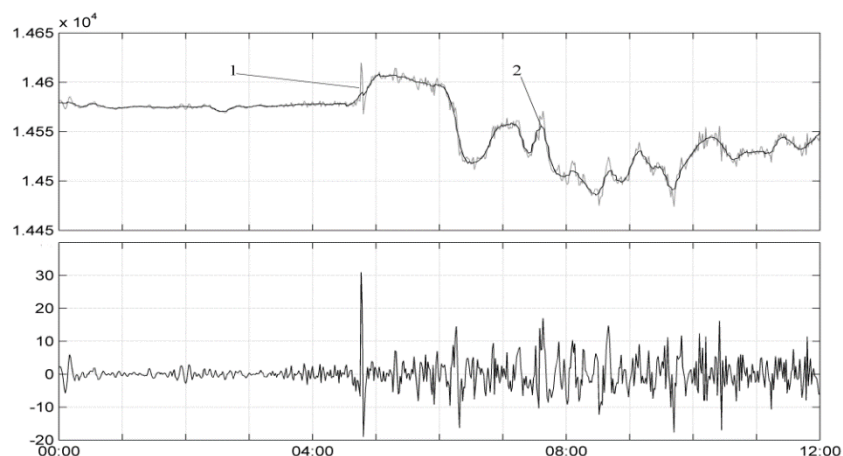


Рисунок 13.3 – Пример работы алгоритма SC-распознавания

14. Грант РФФИ №15-05-07436 "Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа"

Номер госрегистрации: 115012960028

Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани

Ответственный исполнитель: в.н.с., к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов

Созданные за последнее время в ГЦ РАН геомагнитный мониторинг сети ИНТЕРМАГНЕТ и сейсмический мониторинг в Калифорнии и на Кавказе дают основания предложить единый подход к изучению динамики произвольного геофизического процесса, а также сформулировать главную цель и основные задачи настоящего исследования. Главная цель – формализация динамики геофизического процесса через так называемые меры активности. Основные задачи – создание методики мониторинга динамики геофизических процессов с использованием мер активности; поиск и изучение аномалий геофизических процессов на основе его мониторинга.

В рамках данного проекта геофизический процесс будет трактоваться как многомерный динамический массив (в общем случае нерегулярный по времени ряд со значениями в многомерном фазовом пространстве). Специальным образом в фазовом пространстве выбираются реперные точки, и изучение геофизического процесса начинается с изучения его поведения в этих точках. Далее результаты исследований в реперных точках соединяются в единый результат, который и представляет наше исследование геофизического процесса, в частности, его мониторинг. Одномерный временной ряд, выражающий поведение геофизического процесса в точке фазового пространства, помимо нерегулярности во времени, может быть нечеткозначным. Работа с ним потребует совершенно новой техники анализа временных рядов. ДМА обладает определенными заделами в этой области.

Активность – понятие многозначное, зависящее от точки зрения эксперта. Сначала выбирается такая точка зрения, затем она моделируется вспомогательным рядом (моделируется само понятие активности, его количественное выражение). Нормирующий переход в рамках ДМА на сегодняшний день бывает трех типов: с помощью ДМА-сравнений, ДМА-производных и ДМА-трендов. В первых двух схемах – выражение в шкале отрезка степени максимальности активности по сравнению со значениями активности в других точках. В третьем случае – степень возрастания активности в момент. Мера активности разбивает ряд на три части: спокойную, беспокойную и аномальную. Спокойная часть соответствует значениям меры активности от 0 до 0.5, беспокойная – от 0.5 до 0.75, аномальная – от 0.75 до 1. Динамический показатель "Изрезанность" был построен на основе так называемой регрессионной производной (рис. 14.1). Ее использование для произвольного временного ряда позволяет определять области его монотонного убывания или возрастания, а также искать экстремумы.

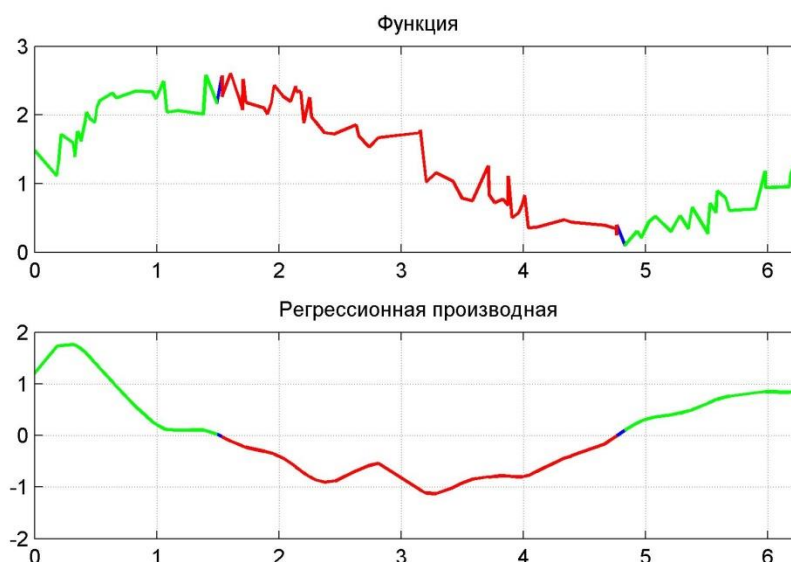


Рисунок 14.1 – Области монотонности на основе регрессионных производных

Разработанное регрессионное сглаживание способно работать не только на регулярной сетке, но и на нерегулярной (рис. 14.2)

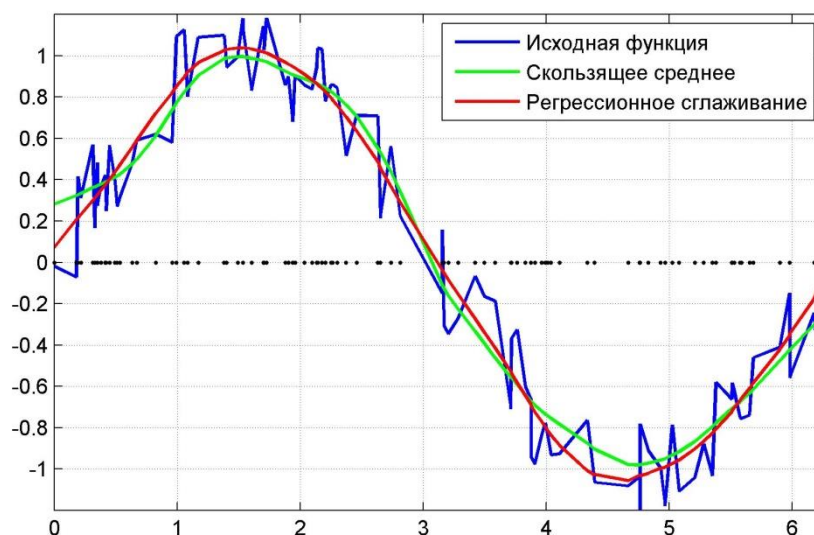


Рисунок 14.2 – Регрессионное сглаживание на нерегулярной сетке

Таким образом, была создана техника работы с нерегулярными нечеткозначными временными рядами по следующей программе: аномалии, тренды, экстремумы, сглаживания и на ее основе была получена система регулярных временных рядов со значениями в моделирующих активность геофизического процесса в реперных фазовых точках в регулярные моменты времени. В самом простом понимании результат первого года уже представляет собой мониторинг исходного геофизического процесса. На этой стадии уже возможна его ГИС-визуализация для случая малых размерностей.

Далее работа по проекту была направлена на дальнейшее совершенствование одномерных мер активности. На их основе с помощью операций нечеткой логики были построены сложные меры активности одномерных рядов и таким образом была завершена

формализация сложного экспертного взгляда на одномерную динамику. Были разработаны и реализованы алгоритмы мониторинга геофизических процессов, как систем временных рядов, на основе мер активности.

Анализ меры активности и ее базовых составляющих составляют суть мониторинга временного ряда экспертом. Он включает в себя:

1. непосредственный анализ активности, позволяющий понять в какой степени интересующая динамика выражена на ряде в каждый момент времени.
2. статистический анализ совокупности базовых активностей на уровне первых двух моментов: средние и ковариационные характеристики. Результат – кодирование поведения ряда с позиции эксперта и возможность сравнения с поведением другого ряда на, вообще говоря, другом периоде наблюдений с позиции того же эксперта.

Поиск аномалий и простой меры активности будут проиллюстрированы на функции (рис. 14.3) соответствующей динамическому показателю изрезанности.



Рисунок 14.3 – Выделение аномалий

Мера активности дает ключ к точечным аномалиям: аномальными на временном ряде называются моменты времени, в которых мера ≥ 0.75 (если некоторое свойство выражено в шкале $[0,1]$, то естественно считать аномальными его проявления, попадающие в отрезок $[0.75, 1]$).

В силу изначальной стохастичности ряда его локально аномальные узлы могут представлять собой подмножество, нуждающееся в дополнительной работе (предварительной топологической фильтрации и последующей кластеризации). Согласитесь, что первая и последняя аномалии на рисунке 14.3 представляют собой единую аномалию. В настоящее время эти задачи решаются алгоритмом ДМА-кластеризации DPS.

Меры активности различных записей и более того совершенно разной природы выражают одну и ту же сущность, а именно, интерес к ним исследователя. Поэтому

записи напрямую сравнивать нельзя, а их меры активности можно. Это обстоятельство - основа ДМА-мониторинга геофизических процессов, под которыми понимается система записей.

Пусть дана система записей, индексированная множеством источников исследуемых записей. Суть ДМА-мониторинга этой системы – построение системы мер активностей, позволяющая понять в каждый момент времени, что происходит в сети на каждой станции.

На рисунке 14.4 показаны фрагменты геофизического мониторинга сети ИНТЕРМАГНЕТ. На карте можно видеть распределение локальной активности по всей совокупности обсерваторий сети. Показателем активности на каждой обсерватории служит мера активности в шкале от 0 до 1. Справа снизу приведена горизонтальная динамическая гистограмма для каждого момента времени, которая отражает распределение обсерваторий, соответствующее разным значениям меры активности. По оси ординат – шкала активности от 0 (нет аномалии) до 1 (сильная аномалия), разбитая на десять интервалов. По оси абсцисс каждому интервалу поставлено в соответствие количество станций, находящихся в этом состоянии на текущий момент времени.

Также на рисунке 14.4 приведен динамический график компоненты B_z межпланетного магнитного поля. Можно наблюдать четкое соответствие между гистограммой наблюдаемой активности на обсерваториях и поведением B_z : при резком изменении B_z наблюдается переход большинства обсерваторий в аномальное состояние.

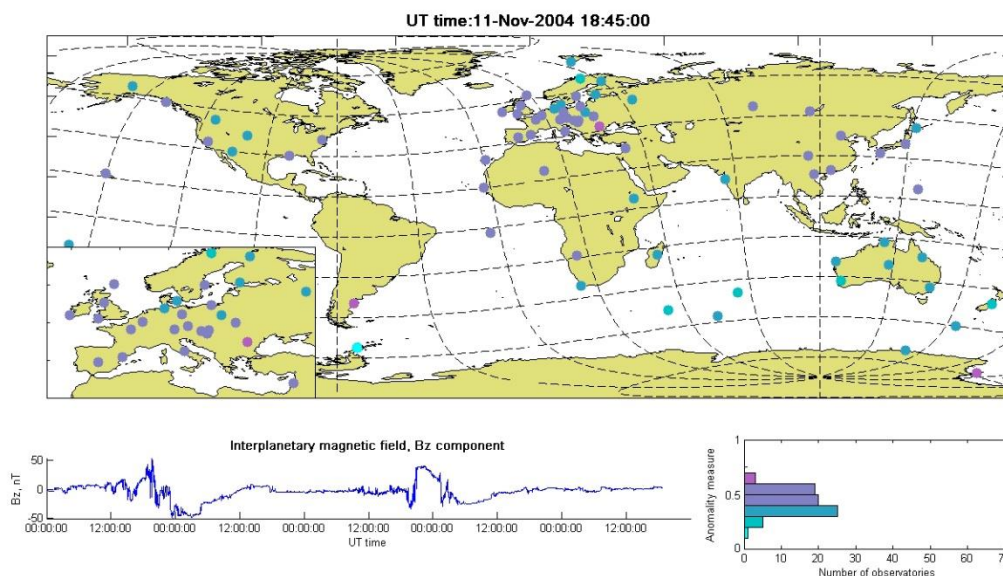


Рисунок 14.4 – Динамический мониторинг сети INTERMAGNET

По аналогии с одномерным случаем система мер активностей позволяет выделить аномальные моменты времени в сети (аномальными считаются моменты времени, в которые средняя активность по всей сети больше или равна 0.75). В отличие от одномерного случая в многомерном случае возникает задача о топологии источников, аномальных в текущий момент времени, которая решается многомерным вариантом алгоритма DPS. Это дает возможность следить за возникновением, развитием и исчезновением аномальных областей в сети.

15. Грант РФФИ №16-35-00603 мол_а "Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений"

Номер госрегистрации: 116012650004

Руководитель: в.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедоев

В 2017 г. исследования по проекту были направлены на использование алгоритмической системы FCAZ [Гвишиани и др., 2013, 2016, 2017а, 2017б; Дзедоев, 2014; Гвишиани, Дзедоев, 2015] для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на Тихоокеанском побережье Курильских островов и на острове Сахалин.

Для распознавания мест возможного возникновения сильных ($M \geq M_0$) землетрясений в районе Курильских островов в качестве объектов распознавания нами использовались эпицентры землетрясений из сформированного в рамках проекта унифицированного каталога землетрясений исследуемого района с глубиной гипоцентра не превосходящей 70 км. Для выбора глубины была построена гистограмма распределения событий по глубине, показавшая, что подавляющая часть землетрясений приходится на слой 0–70 км. Заметим, что для распознавания на Камчатке так же использовались события с глубиной до 70 км. Оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) каталога показала, что начиная с магнитуды $M = 4.2$ каталог является полным [Wyss *et al.*, 2001; Reasenber, 1985]. В связи с этим, в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 4.2$. В рассматриваемом каталоге содержится информация о 11 725 таких землетрясениях.

По результатам анализа графика повторяемости для каталога и по аналогии с работой по распознаванию мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на Камчатке [Дзедоев и др., 2018] в качестве сильных землетрясений для Курильских островов мы рассматривали землетрясения с магнитудой $M \geq 7.75$. Каталог таких землетрясений начиная с 1900 г. был сформирован на основе сформированного инструментального каталога и каталога сильных землетрясений на территории СССР [Новый..., 1977].

Как было сказано выше, в качестве объектов распознавания мы использовали эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 4.2$. К множеству объектов распознавания был применен алгоритм DPS. Было выполнено 3 итерации. Оптимальные значения параметра β – уровня максимальности плотности DPS-кластеров – вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта, описанного в работе [Гвишиани и др., 2016]. В распознанные DPS-кластеры вошло 80% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 4.2$). Полученные DPS-кластеры показаны на рисунке 15.1 зеленым цветом.

К распознанным высокосейсмичным DPS-кластерам эпицентров землетрясений (рис. 15.1) был применен алгоритм E²ХТ. Оптимальные значения его входных параметров вычислялись с помощью автоматизированной процедуры [Гвишиани и др., 2016].

Полученные таким образом двумерные высокосейсмичные FCAZ-зоны показаны на рисунке 15.1 зеленым и красным цветом. Внутри распознанных FCAZ-зон попадает 14 из 18 землетрясений региона с $M \geq 7.75$, три эпицентра находятся рядом с границами FCAZ-зон и один эпицентр находится на некотором отдалении от распознанных зон (рис. 15.1). Это дает авторам с большой степенью достоверности интерпретировать полученные FCAZ-зоны как зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Курильских островов.

Как видно из рисунка 15.1, распознанные зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров известных землетрясений с $M \geq 7.75$. Эпицентры практически всех землетрясений с $M \geq 7.75$ попадают во FCAZ-зоны или располагаются рядом с их границами. Из 18 рассматриваемых нами землетрясений эпицентр только одного является очевидной ошибкой типа "пропуск цели".

Распознанные FCAZ-зоны достаточно хорошо согласуются с результатами долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2013–VIII 2018 гг. [Федотов, Соломатин, 2015].

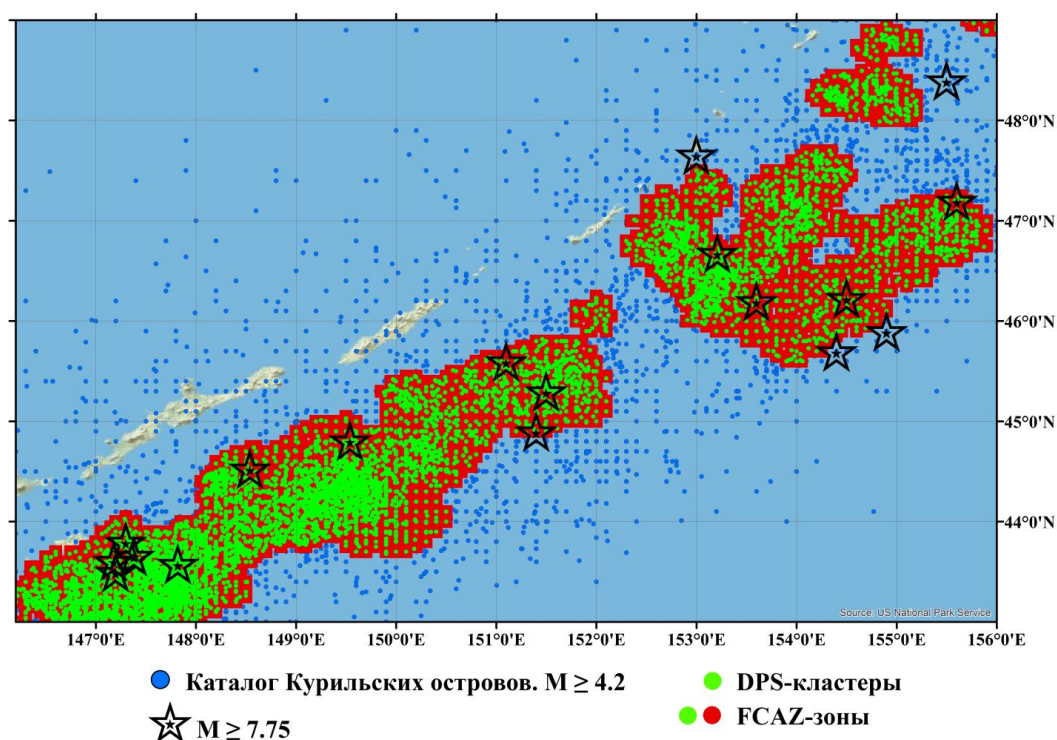


Рисунок 15.1 – Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Курильских островах, распознанные системой FCAZ, и эпицентры землетрясений с $M \geq 7.75$

Достоверность распознанных потенциально высокосейсмичных зон подтверждается контрольными экспериментами. Как правило, при распознавании методом FCAZ мы проводим два типа контрольных экспериментов: "индивидуальная сейсмическая история" и "полная сейсмическая история" [Гвишиани и др., 2016]. Для Курильских островов был проведен контрольный эксперимент "полная сейсмическая история". Из используемого инструментального каталога были исключены эпицентры землетрясений, произошедших после 2000 г. и построены FCAZ-зоны по результатам DPS-кластеризации эпицентров

землетрясений с $M \geq 4.2$ до 2000 г. При этом использовались те же значения свободных параметров алгоритмов DPS и E²XT, что и при обработке всего каталога в основном варианте распознавания. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентров землетрясений, произошедших после 2000 г., относительно распознанных зон.

Сравнение основного результата распознавания (рис. 15.1) и FCAZ-зон "полной сейсмической истории" показал их достаточную близость. Большая часть эпицентров землетрясений, произошедших после 2000 г. находится внутри распознанных в результате эксперимента FCAZ-зон, хотя информация о них никак не использовалась при распознавании. То есть в распознанные зоны попали эпицентры землетрясений, произошедшие спустя 7 лет после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения с $M \geq 4.2$). Таким образом, результат контрольного эксперимента следует признать успешным. Он говорит в пользу достоверности интерпретации полученных FCAZ-зон как зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7.75$ на Тихоокеанском побережье Курильских островов.

Аналогичным образом выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений для острова Сахалин. Объекты распознавания формировали на основе сформированного в рамках проекта каталога землетрясений с глубиной гипоцентра, не превосходящей 30 км. Гистограмма распределения событий по глубине показала, что подавляющая часть событий приходится на слой 0–30 км.

Магнитудные пороги M_R , начиная с которого эпицентры землетрясений будут использоваться как объекты распознавания, и M_0 , начиная с которого места возможного возникновения землетрясений распознаются, выбирались на основе теоретического и практического анализов графиков повторяемости для рассматриваемого региона. Объекты распознавания определены как события с $M \geq 4.1$.

Порог магнитуды M_0 должен быть таким, чтобы землетрясения с $M > M_0$ не являлись очевидно возможными на всей рассматриваемой территории. Исходя из этого и анализа кумулятивного и дискретного частотно-магнитудных распределений землетрясений был взят порог $M_0 = 6.5$. Каталог таких землетрясений начиная с 1900 г. был сформирован на основе рассматриваемого инструментального каталога и каталога сильных землетрясений на территории СССР [Новый..., 1977].

Было выполнено две итерации алгоритма DPS. Оптимальные значения параметра β вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта. В распознанные DPS-кластеры вошло 75.8% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 4.1$). Полученные DPS-кластеры показаны на рисунке 15.2 зеленым цветом.

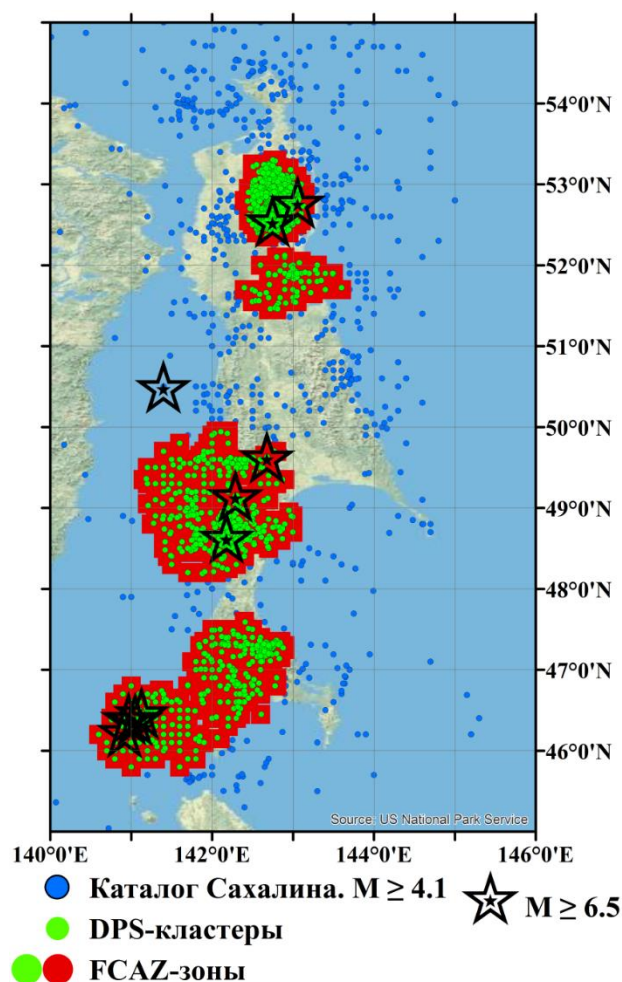


Рисунок 15.2 – Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ на Сахалине, распознанные системой FCAZ, и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$

К распознанным DPS-кластерам применен алгоритм E^2XT . Оптимальные значения его входных параметров вычислялись с помощью блока искусственного интеллекта. Сформированные таким образом высокосейсмичные зоны показаны на рисунке 15.2 совокупностью зеленого и красного цветов. Внутри FCAZ-зон попадает 9 из 10 землетрясений региона с $M \geq 6.5$ и один эпицентр расположен вне FCAZ-зон, создавая ошибку типа "пропуск цели" (рис. 15.2). Это дает возможность с большой степенью достоверности интерпретировать полученные FCAZ-зоны как зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$ на острове Сахалин.

Достоверность распознанных зон FCAZ для острова Сахалин подтверждается контрольными экспериментами "индивидуальная сейсмическая история". При эксперименте "индивидуальная сейсмическая история" FCAZ-зоны строятся по результатам DPS-кластеризации эпицентров только за 20 лет перед сильными ($M \geq M_0$) землетрясениями. Эксперимент заканчивается анализом взаимного расположения распознанных зон и эпицентров сильных землетрясений, для которых эти зоны были распознаны [Гвишиани и др., 2013; 2016].

В эксперименте "индивидуальная сейсмическая история" зоны FCAZ были построены по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 4.1$ только за 20 лет перед сильными ($M \geq 6.5$) землетрясениями. Большая часть из них произошла

задолго до начала инструментальных наблюдений за сейсмичностью региона. Для того чтобы перед подлежащими эксперименту событиями имелась полноценная 20-летняя история сейсмологических наблюдений мы рассматривали только сильные землетрясения, начиная с 1995 года. Начиная с 1995 г. на Сахалине произошло 3 землетрясения с $M \geq 6.5$. Для каждого из них в каталоге было выделено соответствующее подмножество землетрясений с $M \geq 4.1$ за 20 предшествующих лет. К полученным таким образом трем подмножествам объектов распознавания были последовательно применены алгоритмы DPS и E²XT. Для объективности эксперимента во всех трех вариантах были взяты те же значения свободных параметров, что и при обработке всего каталога.

Анализ FCAZ-зон, распознанных в трех экспериментах "индивидуальная сейсмическая история", показал их достаточную схожесть. При этом эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$, для которых проводился эксперимент, оказались внутри распознанных высокосейсмичных зон, либо на их границах.

Сравнение расположения зон основного результата распознавания (рис. 15.2) с результатами трех контрольных экспериментов "индивидуальной сейсмической истории" показывает их достаточную близость. Это обстоятельство дает весомый аргумент в пользу устойчивости FCAZ-распознавания, представленного на рисунке 15.2.

Важнейшие результаты, полученные в ходе реализации Проекта:

- Оригинальная алгоритмическая система FCAZ получила свое дальнейшее развитие, как часть методологии перспективного системного анализа (advance systems analysis).
- Впервые для территории Камчатки, Сахалина и Курильских островов выполнено распознавание мест возможного возникновения сильных и сильнейших землетрясений с использованием в качестве объектов распознавания эпицентров и гипоцентров землетрясений.
- Для Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов распознаны зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.75$.
- Для территории острова Сахалин распознаны зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$.
- Для рассматриваемых в проекте регионов России показано, что объекты распознавания, выбранные на поверхности Земли, являются адекватными для решения существенно трехмерной геофизической задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.
- Основным достижением проекта является то, что распознавание зон возможного возникновения землетрясений в изучаемых регионах удалось провести без привлечения морфоструктурного районирования и необходимости формирования множества объектов обучения. Достаточно было использовать эпицентры землетрясений слабой магнитуды в качестве объектов распознавания. Распознанные высокосейсмичные FCAZ-зоны могут быть в будущем использованы для определения территории, для которой будут проводиться работы по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений методом академика С.А. Федотова.
- По результатам реализации проекта создана база данных цифровых карт зон

возможного возникновения сильных и сильнейших землетрясений.

Список использованных источников

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А. и др. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли, 2013, № 6. С. 3–19.

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А. Оценка сейсмической опасности при выборе мест захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал, 2015, № 10, С. 39–43.

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А. и др. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли, 2016, № 4, С. 3–23.

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А. и др. Формализованная кластеризация и зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений на Крымском полуострове и Северо-Западе Кавказа // Физика Земли, 2017а, № 3, С. 33–42.

Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А. и др. Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье-Забайкалье // Доклады Академии наук, 2017б, Т. 477, № 6, С. 704–710.

Дзедобов Б.А. Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2014, С. 132.

Дзедобов Б.А., Агаян С.М. и др. Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли, 2018, № 2, С. 96 – 103.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г., 1977, С. 536.

Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких Охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7$, 7.7 и 8.3 // Вулканология и Сейсмология, 2015, № 2, С. 3–19.

Reasenber P. Second-order moment of central California seismicity, 1969–82 // Journal of Geophysical Research, 1985, Vol. 90, № B7, P. 5479–5495. DOI: 10.1029/JB090iB07p05479

Wyss M., Wiemer S. et al. A tool for analyses of seismicity patterns. Typical applications and uses: a cookbook, 2001.

16. РФФИ 17-05-01085 а "Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса"

Номер госрегистрации: АААА-А17-117040510185-1

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

Вопрос о влиянии Мессинского кризиса солености на условия осадконакопления в бассейнах Восточного Паратетиса остаётся до конца не решённым. При этом одной из основных проблем является сопоставление большей части региоярусов неогена Восточного Паратетиса с общей стратиграфической шкалой. Особые дискуссии вызывает длительность, а также возраст границ мэотического и понтического региоярусов миоцена [Трубихин, 1989; Певзнер и др., 2003; Чумаков, 2000; Невеская и др., 2003; Семененко и др., 2009; Krijgsman et al., 2010; Vasiliev et al., 2011; Попов и др., 2013]. Применение методов циклостратиграфии на основе глубокого знания литологического строения отложений открывает новые возможности в решении этой проблемы. Выявление астрономической цикличности в средне- и верхнемиоценовых отложениях Восточного Паратетиса с определением основных уровней перерывов в седиментации необходимы для дальнейшего определения влияния Мессинского кризиса солености на условия осадконакопления в сопредельных со Средиземноморским бассейном районах Альпийской складчатой области. Полученные ранее результаты и результаты анализа выявленной астрономической цикличности отложений позволили проследить события Мессинского соленосного кризиса (МСК) как на всей территории Средиземноморья [Hilgen et al., 1995; Krijgsman et al., 1999], так и провести корреляцию с разрезами Атлантики [Hodell et al., 2001; Krijgsman et al., 2004]. В данной работе методы циклостратиграфии впервые применяются к одновозрастным разрезам Таманского полуострова, отвечающего Еникальскому проливу Восточного Паратетиса.

Дискуссия об отражении Мессинского кризиса солености в строении верхнемиоценовых толщ Восточного Паратетиса не теряет своей актуальности до настоящего времени. Существуют разные точки зрения о положении региоярусов миоцена Восточного Паратетиса в общей стратиграфической шкале. Например, имеются существенные разночтения в датирование границ региоярусов верхнего миоцена Восточного Паратетиса, не смотря на хорошую литологическую и палеонтологическую изученность опорных разрезов (рис. 16.1). В связи с существующими разногласиями, детальное изучение разрезов среднего и верхнего миоцена Причерноморья различными методами, в том числе методами циклостратиграфии является актуальным направлением исследования, в том числе и в работе зарубежных исследователей.

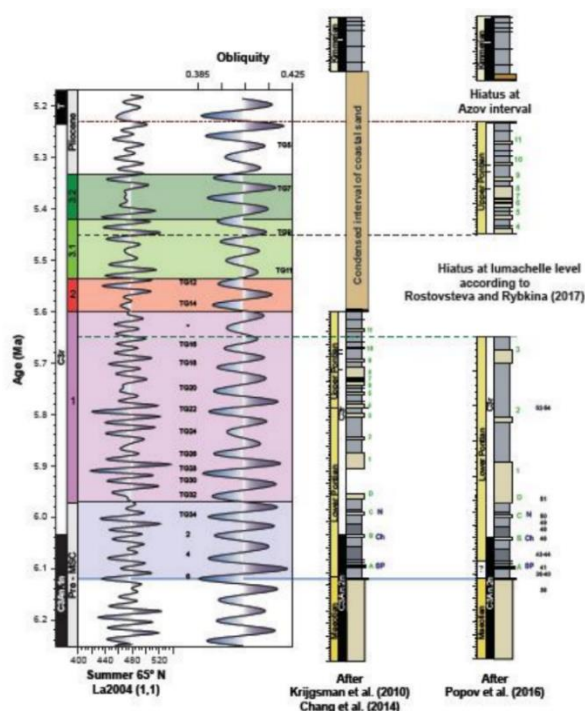


Рисунок 16.2 – Две модели определения возрастов отложений разреза Железный рог

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 внутривосточного 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 восточное 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].

и Пилипенко О.В. (ИФЗ РАН) были проведены экспедиционные работы в Керченско-Таманском регионе с целью уточнения ранее собранного материала и отбора новой необходимой коллекции проб. Впервые были проведены циклостратиграфические исследования сармат-мэотических переходных слоев разреза мыса Панагия (Тамань) и отобраны образцы для получения данных по магнитостратиграфии. Отбор образцов производился для дальнейших лабораторных работ – измерения стандартных магнитных параметров (естественная остаточная намагниченность J_n , магнитная восприимчивость χ и анизотропия магнитной восприимчивости AMS). Итого было отобрано 10 образцов из отложений сармата и 18 из нижнего мэотиса. Также были проведены измерения магнитной восприимчивости пород. В общей сложности получено 226 значений с выявленными колебаниями магнитной восприимчивости пород от $0,063$ до $0,240 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Для проведения сравнительного анализа проведены измерения магнитной восприимчивости пород босфорских и азовских слоев, вскрываемых в разрезе Тамань.

Список использованных источников

- Christiaan G.C. van Baak, Krijgsman W. et al. Paratethys response to the Messinian salinity crisis // *Earth-Science Reviews*, 2017. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.015
- Chumakov I.S. On the Problem of Lower Pontian (Novorossian Substage) Euxinian Caspian, 2000, Vol. 3, P. 17–23.
- Denisov V.I. Regularities of Formationsuspended Materialin the Black Sea, Abstract of PhD dissertation, 1998, P. 25.
- Gunderson K.L., Kodama K.P. et al. Rock-magnetic Cyclostratigraphy for the Late Pliocene - Early Pleistocene Stirone Section, Northern Apennine Mountain Front, Italy // *Special Publications*, 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1144/SP373.8>.
- Hilgen F.J., Krijgsman W. et al. Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene // *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, P. 495–510. DOI:10.1016/0012-821X(95)00207-S
- Hodell D.A., Curtis J.H. et al. Correlation of late Miocene to early Pliocene sequences between the Mediterranean and North Atlantic. *Paleoceanography*, 2001, P. 164–178.
- Krijgsman W., Gaboardi, S. et al. Revised astrochronology for the Ain el Beida section (Atlantic Morocco): No glacio-eustatic control for the onset of the Messinian Salinity Crisis. *Stratigraphy*, 2004, P. 87–101.
- Krijgsman W., Hilgen F.J. et al. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crises // *Nature*, 1999, P. 652–655.
- Krijgsman W., Stoica M. et al. Rise and fall of the Paratethys sea during the Messinian Salinity Crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, P. 183–191.
- Laskar J., Robutel P. et al. A long term numerical solution for the insolation quantities of the earth // *Astron. Astrophys*, 2004, P. 261–285.

- Lirer F., Harzhauser M. et al. Astronomically forced teleconnection between Paratethyan and Mediterranean sediments during the middle and late Miocene // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2009, P. 1–13.
- Neveeskaya L.A., Goncharova I.A. et al. The Neogene stratigraphic scale of the Eastern Paratethys. *Stratigr. Geol. Correl.*, 2003, Vol. 11, № 2, P. 105–127.
- Pevzner M.A., Semenenko V.N. et al. Position the Pontian of the Eastern Paratethys in the magnetochronological scale // *Stratigr. Geol. Correl.*, 2003, Vol. 11, № 5, P. 482–491.
- Popescu S.-M., Biltekin D., et al. Pliocene and lower Pleistocene vegetation and climate changes at the European scale: long pollen records and climatostratigraphy // *Quat. Int.*, 2010, P.152–167.
- Popescu S.-M., Suc J.-P., et al. Early Pliocene vegetation changes forced by eccentricity-precession. Example from Southwestern Romania // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2006, P. 340–348.
- Popov S.V., Akhmetiev M.A. et al. Neogene regiostage stratigraphic scale of the South Russia: current state and perspectives // *General Stratigraphic Scale of Russia: Current State and Ways of Perfection*, 2013, P. 356-360.
- Popov S.V., Shcherba I.G. et al. Late Miocene to Pliocene palaeogeography of the Paratethys and its relation to the Mediterranean // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, P. 91–106.
- Radionova E.P., Golovina L.A. et al. Middleupper Miocene stratigraphy of the Taman Peninsula // *Eastern Paratethys. Cent. Eur. J. Geosci.*, 2012, Vol. 4, № 1, P. 188–204.
- Rostovtseva Yu., Rybkina A. The Messinian event in the Paratethys: Astronomical tuning of the Black Sea Pontian // *Marine and Petroleum Geology*, 2017, P. 321 –332.
- Semenenko V., Andreeva-Grigorovich A. et al. Direct correlation of the Neogene of the Eastern Paratethys with the international oceanic scale by the planktonic microfossils // *Ukraine. Geol. J.*, 2009, № 4, P. 9–27.
- Trubikhin V.M. Paleomagnetic data for the Pontian // *Chronostratigraphie Neostatotypen*, 1989, № 7, P. 76–79.
- Trubikhin V.M., Pilipenko O. Petro magnetism and paleomagnetism of meotian sediments Popov Kamen section (Taman peninsula) // *Physics of the Earth*, 2011, № 3, P. 83–95.
- Vasiliev I., Iosifidi A.G. et al. Magnetostratigraphy and radio-isotope dating of upper Mioceneelower Pliocene sedimentary successions of the Black Sea Basin (Taman Peninsula, Russia) // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2011, P. 163–175.

17. Грант Президента РФ МК-4555.2016.5 для молодых ученых "Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа"

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

В 2017 г. исследования были направлены на применение разработанного математического подхода к мониторингу сейсмической активности SARD (Seismic Activity monitoRing by Discrete mathematical analysis) [Дзедобов, 2017а; Дзедобов, 2017] к каталогам регионов Российской Федерации (Камчатка и Кавказ) для проверки возможности использования подхода SARD.

Алгоритмическим ядром подхода SARD является алгоритм топологической фильтрации DPS (Discrete Perfect Sets) [Agayan *et al.*, 2014] и его модифицированная версия

A-DPS (Adaptive Discrete Perfect Set) [Агаян и др., 2017]. Алгоритм является частью созданного в Геофизическом центре РАН оригинального подхода к анализу дискретных данных под общим названием Дискретный математический анализ (ДМА) [Гвишиани и др., 2008б]. Алгоритм DPS входит в его блок ДМА-кластеризация. В рамках этого блока ранее С.М. Агаяном, Ш.Р. Богоутдиновым, Ан.Ал. Соловьевым под руководством академика РАН А.Д. Гвишиани были созданы алгоритмы "Роден", "Кристалл" и "Монолит", хорошо зарекомендовавшие себя при решении важных геофизических задач [Агаян, Соловьев, 2004; Гвишиани и др., 2008]. Алгоритмы ДМА-кластеризации решают задачи топологической фильтрации многомерных массивов данных, выделяя в этих массивах наиболее существенные части и отсекая несущественные. DPS является результатом дальнейшего развития идей [Agayan *et al.*, 2014]. Как показывают результаты работ [Гвишиани и др., 2016; Gvishiani *et al.*, 2013], он может использоваться для распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений наряду с классическим методом EPA (Earthquake-Prone Areas recognition) [Соловьев и др., 2014].

Идея применения алгоритма $DPS(\beta, q)$ для решения задачи мониторинга сейсмической активности заключается в использовании его свободного входного параметра β – уровня максимальности плотности выделяемых плотных сгущений эпицентров землетрясений (входной параметр q используется для вычисления радиуса локализации). Параметр $\beta \in [-1, 1]$ позволяет осуществлять перенос результатов DPS-анализа каталога землетрясений за некоторый период времени t_i на узлы регулярной географической сетки, покрывающей исследуемый регион, путем построения для каждого узла меры $\mu(t_i)$ активности сейсмического процесса в его окрестности за период времени t_i . Для этого каталог землетрясений предварительно разбивается на временные промежутки t_i . Для каждого t_i проводится DPS-кластеризация каталога землетрясений с дискретно меняющимися значениями параметра β и каждому узлу сетки ставится в соответствие мера $\mu(t_i)$, равная максимальному значению параметра $\beta^* \in [-1, 1]$, при котором узел является близким к выделенным $DPS(\beta^*, q)$ -кластерам эпицентров землетрясений. Мера μ изменяется на отрезке $[-1, 1]$. Для учета памяти сейсмической активности по времени мера μ пересчитывается в меру μ_Δ на временном отрезке $[t_{i-\Delta}, t_{i-1}]$:

$$\mu_{\Delta}(t_i) = \left(\frac{\sum_{k=1}^{\Delta} a_k \mu(t_{i-k})^p}{\sum_{k=1}^{\Delta} a_k} \right)^{1/p} \in [0,1], \quad a_k = \frac{1}{k}, \quad k=1, \dots, \Delta.$$

Мера μ_{Δ} изменяется на отрезке $[0, 1]$. Следует заметить, что вычисление меры μ_{Δ} за период времени t_i производится без привлечения $\mu(t_i)$, используются значения меры μ за Δ предшествующих временных периодов. Тем самым мы получаем, что значение $\mu_{\Delta}(t_i)$ является своего рода прогнозом на период времени t_i . В дальнейшем под мониторингом сейсмической активности мы понимаем анализ и изучение поведения совокупности временных рядов меры μ_{Δ} в узлах сетки.

17.1. Результаты применения подхода SARD для Камчатки

Проведена апробация разработанного подхода SARD для сейсмоактивной области полуострова Камчатка. Использовался каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов [<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>] за период 1962–2015 гг. с глубиной гипоцентров, не превосходящих 70 км [Левина и др., 2013; Федотов, Соломатин, 2015]. Каталог содержит землетрясения с $M_L \geq 3.5$, где M_L – камчатская региональная магнитуда [Абубакиров и др., 2018]. Использовались следующие значения входных параметров: $q = -2.5$, период времени t_i – 1 месяц, шаг сетки – 0.5° , шаг по β – 0.05, Δ – 12 месяцев, $p = 2$.

Анализ полученных с помощью подхода SARD результатов мониторинга сейсмической активности Камчатки был проведен по данным о землетрясениях с 1980 г., поскольку начиная с этого времени каталог достаточно полон для всей изучаемой в работе территории.

За период 1980–2015 гг. на Камчатке, согласно используемому каталогу [<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>], произошло 6 землетрясений с $M_L \geq 6.5$ без учета афтершоков. Пять из них произошли на фоне превышения мерой μ_{Δ} уровня 0.45, три из них при $\mu_{\Delta} > 0.55$.

На рисунке 17.1 в качестве примера показано пространственное распределение значений меры μ_{Δ} по состоянию на 1 марта 1992 г. (рис. 17.1а) и 1 декабря 1997 г. (рис. 17.1б), белыми звездами показаны эпицентры землетрясений с $M_L \geq 6.5$, произошедшие 2 марта 1992 г. и 5 декабря 1997 г. соответственно.

На рис. 1 показаны зоны с высокими значениями меры сейсмической активности μ_{Δ} вдоль побережья центральной Камчатки. Из рисунка 17.1а видно, что эпицентр землетрясения, произошедшего 2 марта 1992 г. с $M_L = 6.6$ ($M_w^{GCMT} = 6.8$), расположен на северо-востоке Авачинского залива в зоне, для которой значения $\mu_{\Delta} > 0.64$ и являлись максимальными для всего представленного на рисунке региона на начало соответствующего месяца. Эпицентр землетрясения от 5 декабря 1997 г. с $M_L = 7.0$ ($M_w^{GCMT} = 7.8$) показан на рисунке 17.1б белой звездой и расположен на юго-востоке Камчатского залива в зоне со значениями $\mu_{\Delta} > 0.56$.

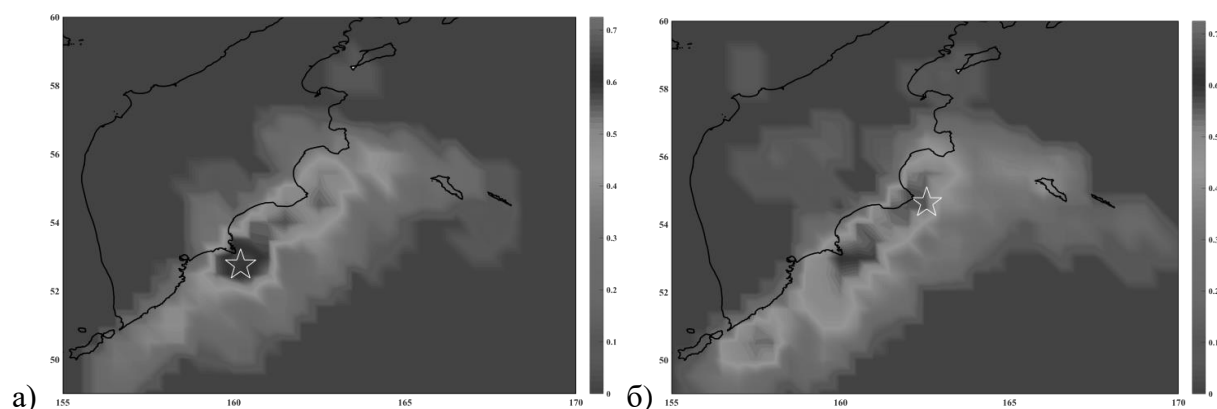


Рисунок 17.1 – а) значения меры μ_{Δ} по состоянию на 1 марта 1992 г., белой звездой показан эпицентр землетрясения 2 марта 1992 г. с $M_L = 6.6$ ($M_w^{GCMT} = 6.8$);

б) значения меры μ_{Δ} по состоянию на 1 декабря 1997 г., белой звездой показан эпицентр землетрясения 5 декабря 1997 г. с $M_L = 7.0$ ($M_w^{GCMT} = 7.8$)

Оценка эффективности разработанного подхода для мониторинга сейсмической активности проведена с помощью диаграммы ошибок [Shebalin et al., 2011] (рис. 17.2). Для этого рассматриваемые время и пространство разбиваются на ячейки. Прогноз землетрясения с $M_L \geq 6.5$ рассматривался как превышение мерой μ_{Δ} некоторого порога. Ошибки типа "пропуск цели" – землетрясения с $M_L \geq 6.5$, расположенные вне ячеек со сработавшим прогнозом. На диаграмме ошибок (рис. 17.2) по оси абсцисс показана вероятность случайного попадания землетрясения с $M_L \geq 6.5$ в ячейку с прогнозом, по оси ординат – доля ошибок типа "пропуск цели", диагональ – случайное угадывание [Дзедобоев, 2017а; Shebalin et al., 2011]. Для оценки случайного попадания сильного землетрясения в ячейку с прогнозом использована простейшая модель сейсмичности, в которой вероятность землетрясения пропорциональна числу зарегистрированных в данной пространственной ячейке землетрясений с магнитудой $M_L \geq 5.5$ [Kossobokov, Shebalin, 2003; Shebalin et al., 2014]. Чем больше отклонение диаграммы ошибок от диагонали, тем эффективнее алгоритм [Shebalin et al., 2011]. Из рисунка 17.2 видно, что предложенная методика эффективна. Представленные результаты отличаются от случайного угадывания. Таким образом в качестве критерия повышенного уровня сейсмической активности для территории Камчатки можно рассматривать превышение мерой μ_{Δ} порога 0.55.

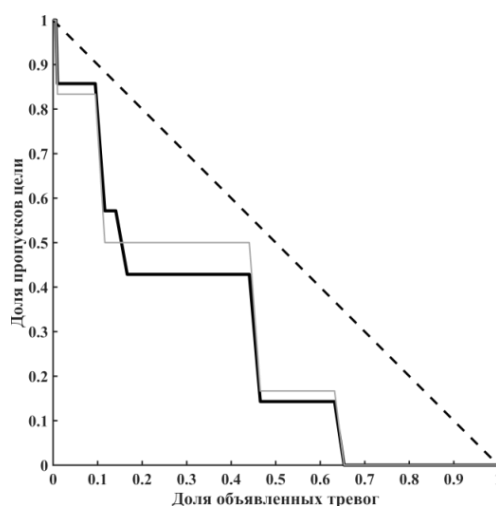


Рисунок 17.2 – Диаграмма ошибок для Камчатки. Утолщенной линией показана зависимость между процентом пропусков цели и процентом объявленных тревог для всех землетрясений с $M_L \geq 6.5$ в изучаемом регионе, тонкой – только для основных толчков с $M_L \geq 6.5$

17.2. Результаты применения подхода SARD для Кавказа

Подход SARD был также апробирован для территории Кавказа в пределах 40° с.ш. – 44° с.ш. и 41° в.д. – 51° в.д. Использовался объединенный каталог землетрясений, полученный из каталогов "Землетрясения в СССР" (1962–1991 гг.) и "Землетрясения Северной Евразии" (1992–2008 гг.) с глубинами гипоцентров не более 70 км. Для проведения мониторинга уровня активности сейсмического процесса использовались эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 3.0$. Отметим, что в связи с отсутствием однородного по магнитудам каталога для изучаемого региона были применены известные корреляционные связи между магнитудами [Bormann (ed.), 2012; Rautian et al., 2007]. Использовались следующие значения входных параметров: $q = -3.0$, период времени t_1 – 1 месяц, шаг сетки по долготе и широте – 0.5° , шаг по β – 0.05, Δ – 12 месяцев, $p = 2$.

Анализ полученных с помощью SARD результатов мониторинга уровня сейсмической активности Кавказа был проведен по данным о землетрясениях с 1990 г., поскольку начиная с этого времени каталог достаточно полон для всей изучаемой в работе территории.

За период 1990–2008 гг. на Кавказе, согласно используемому объединенному каталогу, произошло более 100 землетрясений с $M \geq 5.0$ без учета афтершоков. Большая часть из них произошла на фоне превышения мерой μ_Δ уровня 0.5.

На рисунке 17.3 в качестве примера показано пространственное распределение значений меры μ_Δ по состоянию на 1 декабря 1994 г. (рис. 17.3а) и 1 сентября 1999 г. (рис. 17.3б), белыми звездами показаны эпицентры землетрясений с $M > 5.0$, произошедшие 12 декабря 1994 г. и 19 сентября 1999 г. соответственно. На рисунке 17.3а эпицентр землетрясения с $M = 5.1$ расположен в зоне, для которой значения $\mu_\Delta > 0.55$ и являлись максимальными для всего представленного на рисунке региона на начало соответствующего месяца. Эпицентр землетрясения на рисунке 17.3б с $M = 5.4$ показан белой звездой и расположен в пределах зоны со значениями $\mu_\Delta > 0.65$.

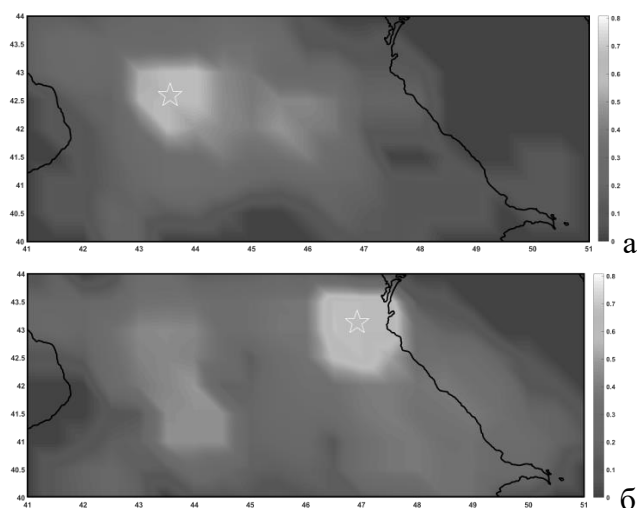


Рисунок 17.3 – а) значения меры μ_{Δ} по состоянию на 1 декабря 1994 г., белой звездой показан эпицентр землетрясения 12 декабря 1994 г. с $M = 5.1$; б) значения меры μ_{Δ} по состоянию на 1 сентября 1999 г., белая звезда – эпицентр землетрясения 19 сентября 1999 г. с $M = 5.4$

Для оценки эффективности подхода SARD к каталогу Кавказа была также построена диаграмма ошибок [Shebalin *et al.*, 2011] (рис. 17.4). Прогноз землетрясения с $M \geq 5.0$ рассматривался как превышение мерой μ_{Δ} некоторого порога. Ошибки типа "пропуск цели" землетрясения с $M \geq 5.0$ вне ячеек с прогнозом. Для оценки случайного попадания сильного землетрясения в ячейку с прогнозом использовались эпицентры землетрясений с $M \geq 4.0$. Из рисунка 17.4 видно, что предложенная методика приемлема, т.к. представленные результаты отличаются от случайного угадывания. В качестве критерия повышенного уровня сейсмической активности для территории Кавказа можно рассматривать превышение мерой μ_{Δ} порога 0.5.

Следует отметить, что результаты применения подхода SARD для территории Кавказа менее представительны, чем для Камчатки и тем более Калифорнии [Дзедзоев, 2017а]. Одной из вероятных причин может являться известная неоднородность каталога.

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

- Предложен новый подход SARD (Seismic Activity monitoRing by Discrete mathematical analysis) для мониторинга сейсмической активности. Он базируется на надежных и проверенных ДМА-методах и алгоритмах и осуществляет построение меры активности сейсмического процесса на базе нечеткой математики.
- Показана возможность использования подхода SARD для территории полуострова Камчатка и региона Кавказа.
- Оценка эффективности подхода SARD проведена с помощью диаграммы ошибок. Показано, что эффективность разработанного метода для мониторинга сейсмической активности высока. Полученные результаты отличаются от случайного угадывания.

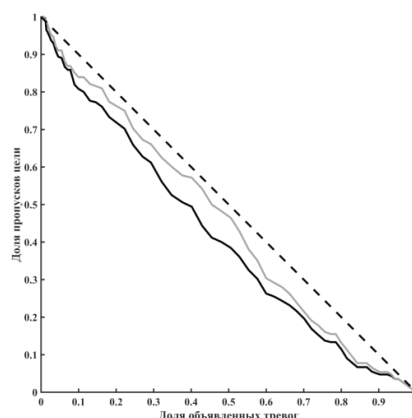


Рисунок 17.4 – Диаграмма ошибок для Кавказа. Утолщенной линией показана зависимость между процентом пропусков цели и процентом объявленных тревог для всех землетрясений с $M \geq 5.0$ в изучаемом регионе, тонкой – только для основных толчков с $M \geq 5.0$

Список использованных источников

Абубакиров И.Р., Гусев А.А. и др. Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли, 2018, № 1, С. 158–172.

Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. и др. A-DPS (Adaptive Discrete Perfect Set). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662818. Заявка № 2017660009 от 05 октября 2017 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2017 г.

Агаян С.М., Соловьев А. А. Выделение плотных областей в метрических пространствах на основе кристаллизации // System Research and Information Technologies, 2004, № 2, С. 7–23.

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

Гвишиани А.Д., Белов С.В. и др. Геоинформационные технологии: методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология, 2008б, № 2, С. 3–14.

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

Дзедобов Б.А. SARD (Seismic Activity monitoring by Discrete mathematical analysis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661961. Заявка № 2017660014 от 05 октября 2017 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2017 г.

Дзедобов Б. А. О новом подходе к мониторингу сейсмической активности (на примере Калифорнии) // Доклады Академии наук, 2017а, Т. 473, № 2, С. 210–213. DOI: 10.7868/S0869565217080163.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов. <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>

Левина В.И., Ландер А.В. и др. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология, 2013, № 1, С. 41–64. DOI: 10.7868/S0203030613010057

Соловьев А.А., Гвишиани А.Д. и др. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли, 2014, № 2, С. 3–20. DOI: 10.7868/S0002333714020112

Федотов С.А., Соломатин А. В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких Охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7$, 7.7 и 8.3 // Вулканология и Сейсмология, 2015, № 2, С. 3–19. DOI: 10.7868/S0203030615020029.

Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R. et al. Discrete Perfect Sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis, 2014, Vol. 50, № 2, P. 176–190. DOI: 10.1007/s10559-014-9605-9.

Gvishiani A., Dobrovolsky M. et al. Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal, 2013, Vol. 12, № 1, P. 1–10.

Kossobokov V., Shebalin P. Earthquake Prediction // Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction, 2003, P. 141–207. DOI: 10.1007/978-3-662-05298-3_4

New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), ed. Bormann P. // Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, 2012.

Rautian T.G., Khalturin V.I. et al. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // Seismological Research Letters, 2007, Vol. 78, P. 579–590.

Shebalin P., Narteau C. et al. Short-term earthquake forecasting using early aftershock statistics // Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, Vol. 101, № 1, P. 297–312.

Shebalin P., Narteau C. et al. Combining earthquake forecast models using differential probability gains // Earth, Planets and Space, 2014, Vol. 66, № 1, P. 1–14. DOI: 10.1186/1880-5981-66-37

18. Проект РНФ №15-17-30020 "Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ-Крым и Алтай-Саяны-Прибайкалье"

Номер госрегистрации: 115080540013

Руководитель: г.н.с., чл.-корр. РАН Ал. А. Соловьев

В 2017 году изучен сегмент горного пояса Южной Сибири, включающий Алтай, Саяны и хребты Прибайкалья с целью определения мест возможного возникновения сильных (с магнитудой $M \geq 6$) землетрясений. Это один из наиболее сейсмоактивных регионов России, характеризующийся периодическими проявлениями сильной сейсмичности. По данным [Новый каталог..., 1977; Землетрясения в СССР...; Землетрясения Северной Евразии...] в период после 1900 г. здесь произошло 14 землетрясений в магнитудном диапазоне от 6 и выше.

Для рассматриваемого региона завершено построение схемы морфоструктурного районирования (МСР), которая использована в качестве основы для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. Методология построения схемы МСР описана, например, в [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010]. Исходными данными для ее составления послужили топографические и геологические карты в масштабах 1:500 000 – 1:1 000 000, а также космические снимки и литературные данные. Схема МСР, представленная на рисунке 18.1, отражает иерархическую блоковую структуру региона и местоположение морфоструктурных узлов, которые формируются в местах пересечения морфоструктурных линеаментов, ограничивающих блоки. В изученном регионе выделено пять территориальных единиц высшего (первого ранга). Это Алтай, Западный Саян, Восточный Саян, Тувинские горы и Байкал. Горная страна Байкал рифтового происхождения включает глубоководную Байкальскую впадину и окаймляющий ее с запада Байкальский хребет. Горно-складчатые сооружения Алтая, Саян и Тувинских гор представлены сложно сопрягающимися горными хребтами, между которыми широко развиты внутригорные котловины.

На схеме МСР выделено 97 пересечений морфоструктурных линеаментов, и с цифровых карт формата ГИС измерены значения их геолого-геофизических характеристик, включая данные по литосферным магнитным аномалиям. Для достижения цели исследования с помощью алгоритма "Кора-3" [Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010] выполнено распознавание пересечений морфоструктурных линеаментов региона, в окрестностях которых возможно возникновение землетрясений с магнитудой $M \geq 6$, т.е. все множество пересечений разделено на два класса: класс **В** (высокосейсмичные пересечения, в окрестностях которых возможны землетрясения с $M \geq 6$) и класс **Н** (низкосейсмичные пересечения, в окрестностях которых могут происходить только землетрясения с $M < 6.0$).

Алгоритм "Кора-3" относится к алгоритмам распознавания с обучением, и перед его применением среди объектов распознавания (пересечений линеаментов) выделена обучающая выборка (объекты, которые априорно считаются представителями классов **В** и **Н**) на основе региональных каталогов землетрясений за период 1900–2013 гг. К объектам обучения класса **В** отнесены пересечения, в 50-километровой окрестности

которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6$. Эпицентры таких землетрясений показаны на рисунке 18.1. К объектам обучения класса **Н** отнесены пересечения, в 50-километровой окрестности которых отсутствуют известные эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 5.0$. В результате отобрано 16 объектов обучения класса **В** и 51 объект обучения класса **Н**. Алгоритм "Кора-3" формирует решающее правило, на основе которого выполняется разделение объектов распознавания на классы **В** и **Н**, путем отбора характерных признаков классов **В** и **Н** [Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010] и последующего сравнения для каждого пересечения чисел характерных признаков класса **В** (n_1) и характерных признаков класса **Н** (n_2), которыми оно обладает. Если для пересечения $n_1 > n_2$, то оно относится к классу **В**, в противном случае оно относится к классу **Н**. В результате все пересечения из обучения класса **В** были отнесены к классу **В**, к этому классу отнесены также 14 пересечений, не входивших в обучающую выборку, и 3 пересечения из обучения класса **Н**. Суммарное число (33) пересечений, отнесенных к классу **В**, составляет 34% от общего числа (97) объектов распознавания, выделенных в рассматриваемом регионе. На рисунке 18.1 кругами показаны пересечения, отнесенные к классу **В** (потенциально сейсмоопасные для $M \geq 6.0$).

Для проверки достоверности полученной классификации был выполнен ряд контрольных экспериментов из числа описанных в работах [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010]. Их результаты свидетельствуют в пользу достоверности классификации.

Сравнение положений указанных на рисунке 18.1 пересечений, отнесенных к классу **В**, с эпицентрами землетрясений с $M \geq 6.0$ показывает их хорошее согласование. В пределах региона распознанные **В**-пересечения группируются в отдельных областях и вдоль границ горных систем. Группа таких пересечений образует высокосейсмичную зону на юго-востоке Алтая и вдоль его границ с Западным Саяном, котловиной Больших озер и Монгольским Алтаем. К высокосейсмичным отнесены пересечения (№№ 45, 49, 66, 67, 74, 75 и 78), расположенные на линеаменте первого ранга, который отделяет Западный и Восточный Саян от горных хребтов Хангая. Группа высокосейсмичных пересечений (№№ 38, 46, 70, 71 и 83) расположена на южной границе региона в пределах Монголии. На Байкале **В**-пересечения (№№ 78, 79, 87, 88 и 91) сконцентрированы на границах южной части Байкальской котловины. Зонами меньшего сейсмического потенциала оказались западный и северо-западный Алтай, внутренние области Западного Саяна, практически весь Восточный Саян и западное ограничение Байкальской впадины.

Характерные признаки классов **В** и **Н**, отобранные алгоритмом "Кора-3" свидетельствуют о повышенной контрастности новейших тектонических движений и усиленной тектонической раздробленности высокосейсмичных пересечений. Результаты исследования должны быть учтены при совершенствовании нормативной карты сейсморайонирования России. Отметим, что такие карты [Уломов, Шумилина, 2000] были получены ранее с использованием того же вероятностного подхода, что и карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP), в которых имеются существенные ошибки [Кособоков, Некрасова, 2011; Wyss et al., 2012]. Использование данных о высокосейсмичных пересечениях линеаментов региона Алтай-Саяны-Прибайкалье, полученных методами распознавания образов, создает возможность адекватнее выделить зоны высокой сейсмической опасности в этом регионе.

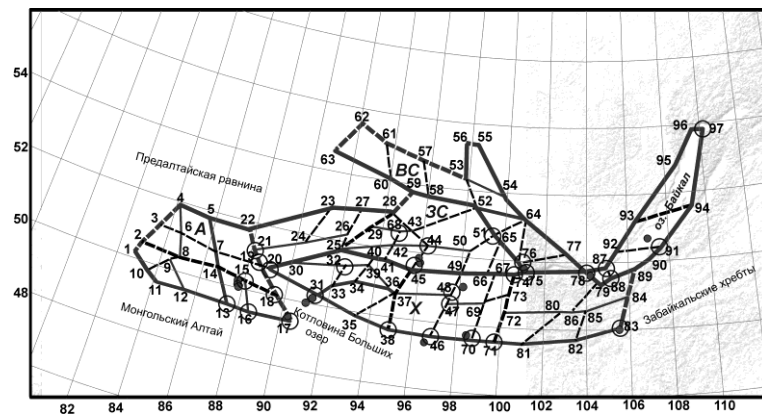


Рисунок 18.1 – Схема морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье и результаты распознавания сейсмоопасных пересечений морфоструктурных линейментов. Толстыми линиями показаны линейменты первого ранга, средними – второго, тонкими – третьего. Кругами показаны распознанные сейсмоопасные пересечения для $M \geq 6.0$. Точки – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$. Буквами обозначены: А – Алтай, ЗС – Западный Саян, ВС – Восточный Саян, Х – Хангай

На основе схемы морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье построена блоковая структура, отражающая реальную геометрию разломов и блоковое строение региона (рис. 18.2). Выполнено несколько десятков численных экспериментов с целью моделирования динамики блоковой структуры и возникающей при этом сейсмичности. В основе моделирования лежат следующие главные принципы [Ismail-Zadeh et al., 2007; Соловьев, 2011]: предполагается, что структура состоит из абсолютно жестких блоков, разделенных бесконечно тонкими плоскостями разломов; в плоскостях разломов и на подошвах блоков происходит вязкоупругое взаимодействие блоков между собой и с подстилающей средой; в каждый момент времени смещения и повороты блоков вычисляются из условия, чтобы вся блоковая структура находилась в квазистатическом равновесии. Землетрясения происходят в соответствии с моделью сухого трения в моменты времени, когда в какой-либо части разлома отношение напряжения к давлению превосходит заданный порог.

Из выполненных численных экспериментов с моделью выбран вариант, в который пространственное распределение эпицентров искусственных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ в определенной степени отражает распределение эпицентров таких землетрясений, зарегистрированных в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Сравнение положений эпицентров приведено на рисунке 18.2.

На рисунке 18.3 представлены кумулятивные графики повторяемости, построенные для каталога искусственных землетрясений и каталога реальных землетрясений рассматриваемого региона. Графики повторяемости имеют практически тот же самый наклон.

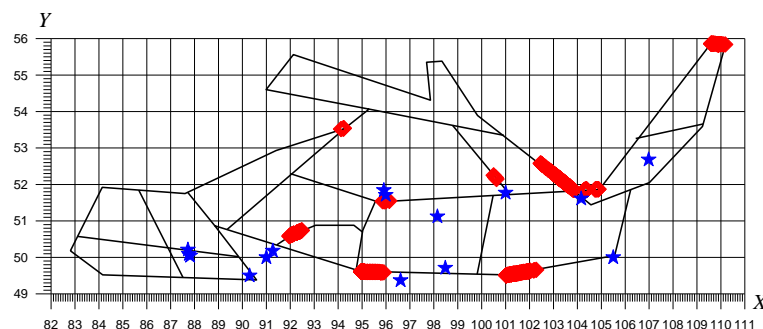


Рисунок 18.2 – Схема блоковой структуры региона Алтай-Саяны-Прибайкалье (линии пересечений плоскостей разломом с верхней плоскостью, ограничивающей структуру), использованной при численном моделировании, эпицентры полученных искусственных землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ (показаны красными ромбами) и эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 6$, зарегистрированных в регионе (показаны синими звездочками)

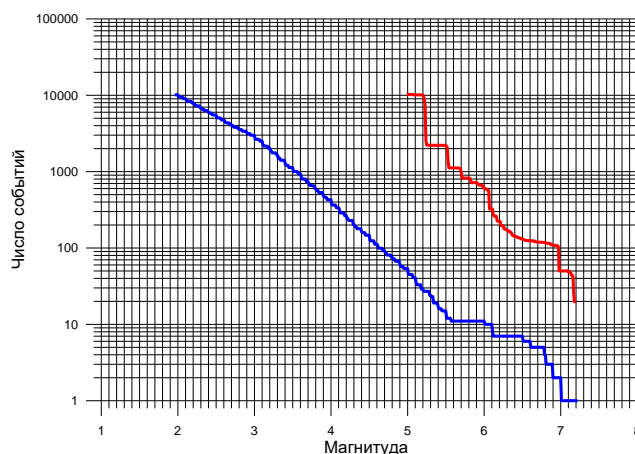


Рисунок 18.3 – Кумулятивные графики повторяемости, построенные для каталога искусственных землетрясений (красная линия) и реальной сейсмичности региона Алтай-Саяны-Прибайкалье (синяя линия)

Из рисунка 18.2 следует, что в результате моделирования не удалось воспроизвести сейсмичность западной части рассматриваемого региона и в некоторых других местах. Различия модельной сейсмичности и реальной могут быть объяснены среди прочих причин более сложной по сравнению с задаваемой в модели геодинамикой региона. В реальные процессы сейсмогенеза вовлечены и разломы более низких рангов, которые не рассмотрены в модели. Заданные в модели движения боковых границ блоковой структуры нуждаются в уточнении, чтобы адекватнее отразить движения литосферных блоков в рассматриваемом регионе.

Алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2013, 2016] применена для изучения объединенного региона Алтай-Саяны с целью распознавания мест возможного возникновения значительных ($M \geq 5.5$) землетрясений. Объекты распознавания сформированы на основе каталога землетрясений за период 1962–2009 г., полученного путем объединения каталогов "Землетрясения в СССР" (1962–1991 гг.) [Землетрясения в СССР...] и "Землетрясения Северной Евразии" (1992–2009 гг.) [Землетрясения Северной Евразии...]. Построенный каталог содержит

данные о 15 639 сейсмических событиях за рассматриваемый период. Каталог землетрясений полон для магнитуды 2.8 и выше. Этот порог использован для определения объектов распознавания (землетрясений с $M \geq 2.8$). Всего в каталоге оказалось 3 647 таких событий.

Система FCAZ представляет из себя последовательное применение алгоритмов DPS (Discrete Perfect Sets) и E^2XT , описанных в [Гвишиани и др., 2013, 2016]. В результате итерационного применения алгоритма DPS получены кластеры объектов распознавания (эпицентров землетрясений), показанные на рисунке 18.4. К этим кластерам эпицентров землетрясений применен алгоритм E^2XT , в результате чего получены плоские области, показанные на рисунке 18.4. Поскольку в эти области попадает большая часть (45 из 53) землетрясений региона с $M \geq 5.5$, то с существенной степенью достоверности их можно интерпретировать как зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$ в рассматриваемом регионе. Отметим, что 6 из 8 землетрясений, не попавших области, определенные алгоритмом E^2XT , произошли до начала активных сейсмологических наблюдений в регионе и локации их эпицентров могут иметь существенные ошибки.

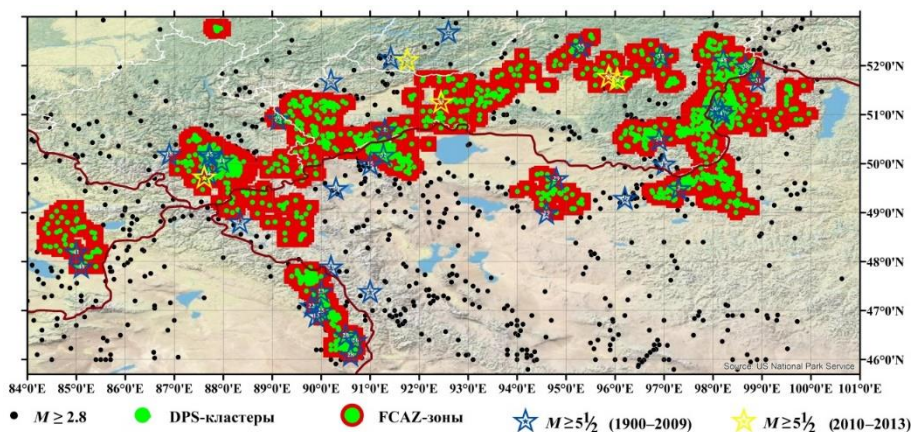


Рисунок 18.4 – Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Алтай-Саяны, распознанные системой FCAZ, и эпицентры известных землетрясений с $M \geq 5.5$. Черные точки – объекты распознавания (эпицентры землетрясений с $M \geq 2.8$).

Зеленые зоны – распознанные DPS-кластеры, красным цветом показаны границы плоских областей, полученных в результате применения алгоритма E^2XT . Звездочки – эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$

Путем подбора параметров алгоритмов DPS и E^2XT получены оптимальные зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ с наименьшим возможным количеством ошибок типа "пропуск цели" (6 пропусков). Из сравнения результатов следует, что площадь оптимальных FCAZ-зон примерно в 1.45 раза больше. При этом число пропусков цели сокращается всего на 25%, и следует ожидать возрастания числа ложных тревог. Из этих соображений сделан вывод о том, что результат, представленный на рисунке 18.4, является более приемлемым.

Приведенные результаты были получены с использованием данных о сейсмичности до 2009 г. включительно, и их достоверность проверена путем сравнения положений эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$, которые произошли после 2009 г. (показаны желтыми звездочками на рис. 18.4), с FCAZ-зонами. Всего в регионе произошло пять

таких землетрясений, и эпицентры четырех из них попадают внутрь FCAZ-зон.

Для региона Прибайкалье-Забайкалье с помощью алгоритмической системы FCAZ определены места возможного возникновения землетрясений для трех магнитудных порогов: $M \geq 5.5$, $M \geq 5.75$ и $M \geq 6.0$. Это выполнено путем итерационного сужения множества объектов распознавания. Зоны возможного возникновения землетрясений для рассматриваемого магнитудного порога распознаются внутри зон уже распознанных как опасные для меньшей пороговой магнитуды. Воспроизводимость исследования обеспечивается тем, что на всех этапах алгоритм распознавания остается неизменным.

В качестве объектов распознавания в Прибайкалье-Забайкалье использованы эпицентры из каталога землетрясений за период 1962–2010 гг., полученного объединением двух источников [Землетрясения в СССР...] и [Землетрясения Северной Евразии...]. Объединенный каталог содержит информацию о 35 708 сейсмических событиях. Исходя из оценки его полноты в качестве объектов распознавания использованы эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 2.7$. Таких землетрясений в каталоге оказалось 11 297.

На первом этапе исследования определены, показанные на рисунке 18.5, зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$. На рисунке показаны эпицентры 71 землетрясения с $M \geq 5.5$, произошедшего начиная с 1900 г. Из этих эпицентров только два (2.8%) находятся вне распознанных FCAZ-зон, что позволяет интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как области возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в регионе Прибайкалье-Забайкалье.

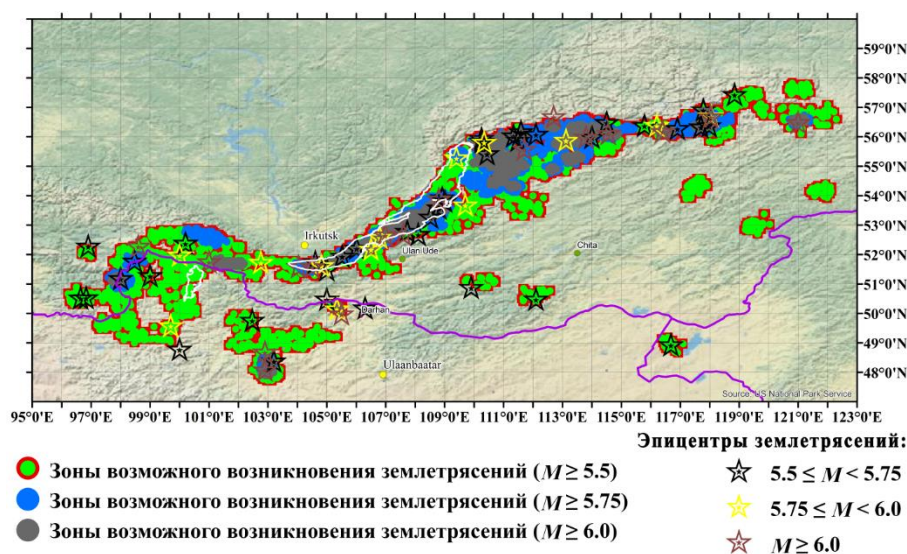


Рисунок 18.5 – Зоны возможного возникновения землетрясений в регионе Прибайкалье-Забайкалье и эпицентры сильных землетрясений

Принципиально новыми являются второй и третий этапы последовательного распознавания. На втором этапе исследуются места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$ при использовании в качестве объектов распознавания только 10 056 эпицентров землетрясений, вошедших в DPS-кластеры на первом этапе, т.е. внутри этих кластеров распознаются подкластеры, определяющие места возможного возникновения более сильных землетрясений. Полученные на втором этапе FCAZ-зоны

показаны на рисунке 18.5. На рисунке показаны эпицентры тридцати произошедших в регионе землетрясений с $M \geq 5.75$. Лишь три (10%) из них находятся за пределами FCAZ-зон. Это дает основание рассматривать распознанные зоны, как области возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.75$.

На третьем этапе распознаны зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$. В качестве объектов распознавания использованы 7 946 эпицентров, вошедших в DPS-кластеры на втором этапе. Полученные FCAZ-зоны и эпицентры семнадцати произошедших в регионе землетрясений с $M \geq 6.0$ представлены на рисунке 18.5. FCAZ-зоны достаточно хорошо согласуются с эпицентрами землетрясений с $M \geq 6.0$: только два (11.7%) эпицентра находятся вне этих зон.

Отметим новизну полученного результата, которая состоит в многократном применении алгоритмической системы FCAZ к последовательно сужаемому путем кластеризации множеству эпицентров достаточно слабых землетрясений региона. В результате построен новый итерационный алгоритм последовательного распознавания мест возможного возникновения значительных, сильных и сильнейших землетрясений, получивший название последовательный FCAZ или SFCAZ (Successive Formalized Clustering And Zoning).

На основе выполненного в 2016 г. расчета коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) для региона Алтай-Саяны и в Прибайкалье получены и картированы значения сейсмической опасности в терминах ожидаемого максимального ускорения на скальном основании (PGA), а также значения двух модельных рисков для населения.

Риск для населения в ячейке x размера 0.25×0.25 градуса вычисляется по двум формулам: $R_{ii}(x) = H(x) \cdot P(x) \cdot p(x)$ и $R_{iii}(x) = H(x) \cdot P(x) \cdot p(x) \cdot p(x) \cdot p(x)$, где $H(x)$ – оценка сейсмической опасности для ячейки x , $P(x)$ – численность населения в ячейке x , $p(x)$ – плотность населения для ячейки x . Первая оценка риска различает персональную уязвимость, линейно-пропорционально возрастающую с плотностью населения в данном месте. Вторая оценка уязвимости, пропорциональная квадрату плотности населения, также представляется довольно естественной в силу специфики техногенной среды, определяемой не только численностью, но и плотностью населения в районах его высокой концентрации (в качестве примера может служить этажность и категории типичных построек).

Результаты оценки сейсмической опасности и риска для региона Алтай-Саяны и в Прибайкалье показаны на рисунках 18.6 и 18.7. Величина риска представлена в условных единицах au (arbitrary units), шкала которых охватывает наивысшие семь десятичных порядков значений, так, что клетки, окрашенные в красный цвет, в 1 000 000 раз более опасны, чем окрашенные в синий. Схлопывание территории повышенного риска к областям наиболее высокой концентрации населения является довольно естественной и яркой демонстрацией того, как нелинейность в начальных условиях изменяет представление о сейсмическом риске. Следует отметить, что города с населением от 100 тыс. жителей находятся в верхней части распределения для каждого из рассмотренных рисков.

На рисунках 18.6b и 18.6d показаны результаты оценки сейсмической опасности в

рамках международной программы GSHAP [Giardini *et al.*, 1999; Shedlock *et al.*, 2000]. Сравнение показывает явную недооценку опасности в регионе Алтай-Саяны и в Прибайкалье на картах программы GSHAP.

Получены оценки сейсмической опасности PGA для 16 городов региона Алтай-Саяны и Прибайкалья с населением от 100 тысяч жителей, которые суммированы в таблице 18.1. На основе этих данных сейсмический риск для города вычисляется по приведенным выше формулам для $R_{ii}(x)$ или $R_{iii}(x)$, где в качестве ячейки рассматривается площадь S соответствующего города. Отношение оценок PGA показывает, что в 10 случаях (помечены жирным шрифтом в последнем столбце таблицы) из 16 результаты GSHAP значительно недооценивают сейсмическую опасность (в более чем 4 раза). Следует отметить, что при расчете рассматриваемых модельных рисков $R_{ii}(x)$ и $R_{iii}(x)$, отношение их значений, полученных по ОЗПЗ и GSHAP, будет совпадать с соответствующим отношением оценок сейсмической опасности PGA.

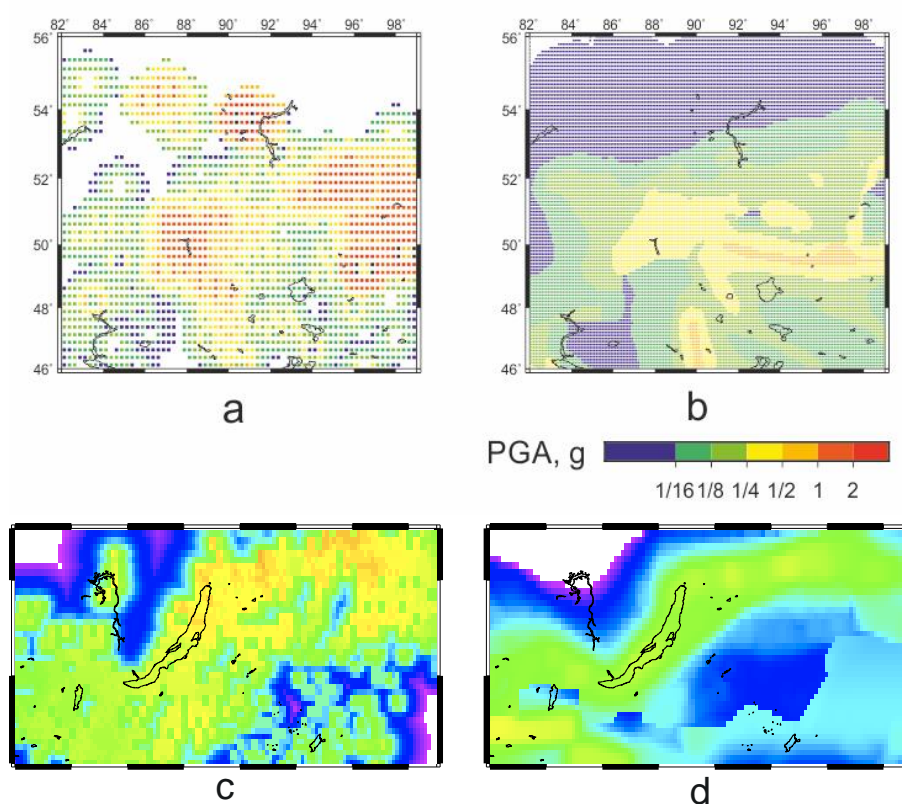


Рисунок 18.6 – Карты сейсмической опасности для региона Алтай-Саяны (a, b) и Прибайкалья (c, d) в терминах ускорения на скальном основании, PGA, с вероятностью превышения 10% за 50 лет: a, c) расчеты по ОЗПЗ; b, d) расчеты ОСР-97

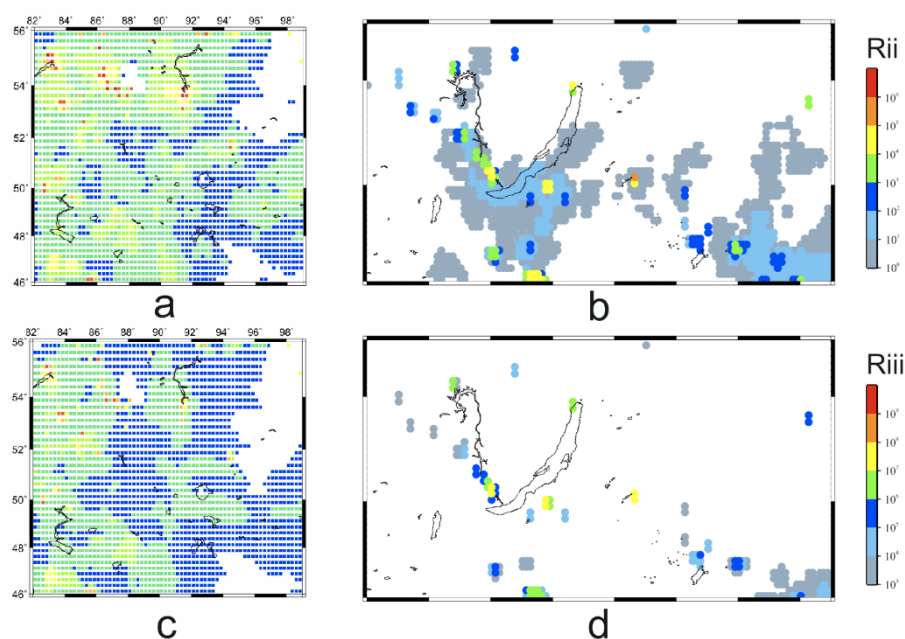


Рисунок 18.7 – Карты модельных сейсмических рисков R_{ii} и $R_{iіі}$ для региона Алтай-Саяны (а, с) и Прибайкалья (b, d)

Таблица 18.1 – Сейсмическая опасность в основных городах региона Алтай-Саяны-Прибайкалье с населением от 100 000 человек

Город	$P(x)$ (население, человек)	$S, \text{ км}^2$	PGA, g		Отношение
			GSNAP	ОЗПЗ	
Абакан	165214	112,4	0,06	2,12	35,38
Ачинск	109155	103,0	0,02	< 0,02	< 1
Барнаул	612401	321,0	0,04	0,05	1,13
Бийск	210115	291,7	0,10	0,04	0,42
Братск	231602	428,0	0,003	0,15	48,5
Иркутск	623736	277,0	0,16	0,73	4,55
Кемерово	532981	282,3	0,02	< 0,02	< 1
Красноярск	1083865	348,0	0,02	< 0,02	< 1
Кызыл	109918	97,4	0,20	3,97	19,41
Новокузнецк	547904	424,3	0,05	0,61	11,89
Новосибирск	1602915	505,6	0,02	0,29	11,71
Оскемен*	321251	540,0	0,06	0,24	4,27
Томск	524669	297,2	0,02	< 0,02	< 1
Улан-Батор	1401200	4704,4	0,09	1,56	17,78
Улан-Удэ	431922	347,6	0,12	1,56	13,19
Чита	347088	534,0	0,03	1,16	46,26

Созданная ранее на основе ГИС технологий База данных по результатам оценок сейсмической опасности пополнена данными по региону Алтай-Саяны-Прибайкалье. С помощью этой базы данных выполнено комплексное сравнение и системный анализ

результатов распознавания мест сильных землетрясений, полученных для региона Алтай-Саяны-Прибайкалье на основе его МСР и с помощью алгоритмической системы FCAZ. Выполнено также сравнение этих результатов с аналогичными результатами, полученными для региона Кавказ-Крым. Основной вывод из этого анализа состоит в том, что определение мест возможного возникновения сильных землетрясений позволяет существенно уточнить оценки сейсмической опасности для сейсмоактивных регионов и вносит вклад в формирование информационной основы для разработки мер по сокращению ущерба для населения и объектов промышленной инфраструктуры от сейсмических воздействий.

Геофизический центр РАН и Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН провели с 3 по 7 июля 2017 года Школу молодых ученых "Методы комплексной оценки сейсмической опасности". Проведение Школы финансировалось Российским научным фондом (РНФ) в рамках проекта РНФ № 15-17-30020. В школе приняли участие 40 слушателей, из которых 36 – студенты и молодые ученые (в возрасте до 35 лет). Слушатели представляли 21 научное и образовательное учреждение.

Четырнадцать российских и шесть иностранных ученых прочитали для слушателей Школы 31 лекцию. Лекторы представляли Геофизический центр РАН, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", Университет г. Триеста (Италия), Парижский институт физики Земли (Франция), Национальный институт океанографии и экспериментальной геофизики (Италия), Университет г. Потсдама (Германия), Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова Национальной академии наук Республики Армения (г. Гюмри, Армения).

Во время Школы состоялись непосредственные научные дискуссии между слушателями и лекторами, что дало возможность слушателям глубже вникнуть в применение предлагаемых методов оценки сейсмической опасности, а также обсудить их собственные исследования и научные проекты.

В рамках выполнения проекта РНФ № 15-17-30020 в г. Санкт-Петербург с 8 по 13 октября 2017 проведена Международная научная конференция "Global Challenges and Data Driven Systems", которая явилась очередным научным мероприятием, регулярно (раз в два года) организуемым Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) Международного совета по науке.

В работе конференции приняли участие ученые из 35 стран. Программа Конференции включала 25 научных сессий. На пленарных заседаниях с ключевыми лекциями выступили видные ученые: Фред Робертс (Fred Roberts), директор Центра продвинутого анализа данных (CCICADA, США); Павел Кабат (Pavel Kabat), директор Международного института прикладного системного анализа (IIASA, Австрия); Барбара Райан (Barbara Rayan), директор секретариата Межправительственной группы по земным наблюдениям (GEO, Швейцария); Владимир Мау, ректор Академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (РАНХиГС, Россия).

В работе Конференции приняли участие Президент CODATA Дж. Боултон (G. Boulton), Исполнительный директор CODATA С. Ходсон (S. Hodson) и Генеральный секретарь Международного союза по геодезии и геофизике А. Исмаил-Заде.

Список использованных источников

Гвишиани А.Д., Горшков А.И. и др. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности, 1988, С. 174.

Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А. и др. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли, 2013, № 6, С. 3–19.

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

Гельфанд И.М., Губерман Ш.А. и др. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли, 1976, № 9, С. 3–91.

Горшков А. И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе, М.: КРАСАНД, 2010, С. 472.

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

Землетрясения Северной Евразии, ... год (ежегодники 1992–2010 гг.). Обнинск: ГС РАН, 1997–2014.

Кособоков В.Г., Некрасова А. К. Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // Вопросы инженерной сейсмологии, 2011, Т. 38, № 1, С. 65–76.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977, С. 536.

Соловьев А. А. Моделирование динамики систем блоков и разломов и сейсмичности // Труды Института математики и механики УрО РАН, 2011, Т. 17, № 2, С. 174–190.

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

Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M. and Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map // Annali di Geofisica, 1999, 42, 6: 1225–1228.

Ismail-Zadeh A., Le Mouél J.-L. et al. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in the Tibet-Himalayan region // Earth and Planetary Science Letters, 2007, 258, 3–4: 465–485.

Shedlock K.M., Giardini D. et al. The GSHAP Global Seismic Hazard Map // Seismological Research Letters, 2000, 71, 6: 679–686.

Wyss M., Nekrasova A. et. al. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*, 2012, 62, 3: 927–935.

19. Проект РНФ №16-17-00121 "Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы"

Номер госрегистрации: АААА-А16-116030110009-6

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

В ходе работ по проекту получены важные результаты о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений и их влиянии на наведенные токи в промышленных линиях электропередач.

В июне 2017 г. на обсерватории "Санкт-Петербург" Ленинградской области был установлен новый векторный магнитометр POS-4 производства лаборатории квантовой магнитометрии Уральского Государственного Технического Университета, приобретенный на средства гранта. Также были установлены система сбора данных и настроена передача данных в ГЦ РАН. В октябре 2017 г. было проведено исследование, направленное на определение разности значений модуля вектора магнитного поля, измеряемых магнитометрами GSM-19 и POS-4. По результатам проведенных испытаний принято решение о пригодности магнитометра POS-4 к дальнейшей эксплуатации. В 2018 г. предполагается установка прибора на побережье Белого моря вблизи полярного круга на территории биологической станции МГУ.

Продолжена разработка и внедрение нового волнового УНЧ индекса для характеристики уровня турбулентности в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера [Pilipenko et al., 2017]. Физической основой этого индекса является тот факт, что процессы переноса энергии в пограничных областях магнитосферы имеют турбулентный характер, который при наземных и спутниковых наблюдениях отражается в появлении волновой активности в УНЧ диапазоне (1–10 МГц) – частотном диапазоне естественных магнитосферных МГД волноводов и резонаторов. Для расчета глобального наземного индекса создана база данных, скорректированных на техногенные помехи, включающая наблюдения за 25 лет на всех существующих в мире магнитометрах. Кроме того, аналогичный УНЧ индекс, характеризующий уровень низкочастотной магнитной турбулентности и волновой активности на геостационарной орбите и в солнечном ветре, рассчитан по данным спутников GOES, WIND, ACE. Значения УНЧ индекса к настоящему времени рассчитаны для периода 1991–2017, но эта база данных продолжает уточняться и расширяться. Индекс уже используется в различных областях космической геофизики (более 100 скачиваний с сайта за 2017 г.). База данных и детальное описание УНЧ индекса находятся в свободном доступе через специально разработанный сайт <http://ulf.gcras.ru/>.

Для контроля устойчивости навигационных систем и радиосвязи важно иметь надежные методы мониторинга положения аврорального овала. Это диктует необходимость усовершенствования методов мониторинга положения аврорального овала. Резкая активизация аврорального овала происходит при суббурях, при этом суббуря развивается как серия "детонаций", сопровождаемых усилением авроральной светимости, интенсификации ионосферного электроджета и всплеска мощности сигналов Pi2. Martines-Bedenko et al. [2018] рассмотрели снимки наложенных ультрафиолетовых

(УФ) авроральных изображений со спутников POLAR и IMAGE и мощность УНЧ волн в полосе частот Pi2 (5–30 мГц). Обнаружено, что широтное положение западного электроджета и мощности Pi2, в основном, приурочены к полюсной границе аврорального овала (зоны УФ свечения). Этот результат соответствует механизму переноса УНЧ сигналов из магнитного хвоста магнитосферы до ионосферы вдоль границы плазменного слоя. На основании полученных результатов предложен дополнительный простой способ мониторинга полюсной границы аврорального овала по наземным геомагнитным данным по максимуму в широтном распределении мощности Pi2 колебаний. Наличие нескольких взаимодополняющих моделей аврорального овала позволит более надежно указывать условия, при которых для заданного региона возможны сбои в системах спутниковой навигации и другие потенциально опасные явления.

Решение поставленных в проекте задач по расчету и предсказанию геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в технологических системах не сводится просто к "инженерному" применению результатов космической физики, а требует выяснения фундаментальных вопросов о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Заметным проявлением космической погоды является всплеск ГИТ в наземных технологических системах, вызванный воздействием на околоземную среду межпланетных ударных волн. Для полного геофизического описания влияния на околоземную среду таких волн *Belakhovsky et al.* [2017] рассмотрели комплексные наблюдения магнитосферного и ионосферного откликов на межпланетную ударную волну. Помимо наземных и спутниковых магнитометров, фотометров и риометров, впервые также рассмотрены вариации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы по данным приемников глобальной навигационной спутниковой системы GPS. Обнаружен $\leq 10\%$ положительный импульс ПЭС ионосферы. SC сопровождался всплеском поглощения космического шума, регистрируемого на сети риометров, что свидетельствует о высыпании в атмосферу энергичных магнитосферных электронов. SC также вызвал импульсное усиление дневных полярных сияний по данным камеры NORUSCA и сканирующего фотометра на Шпицбергене. Радар EISCAT наблюдал связанное с SC увеличение электронной плотности в нижней ионосфере (рис. 19.1).

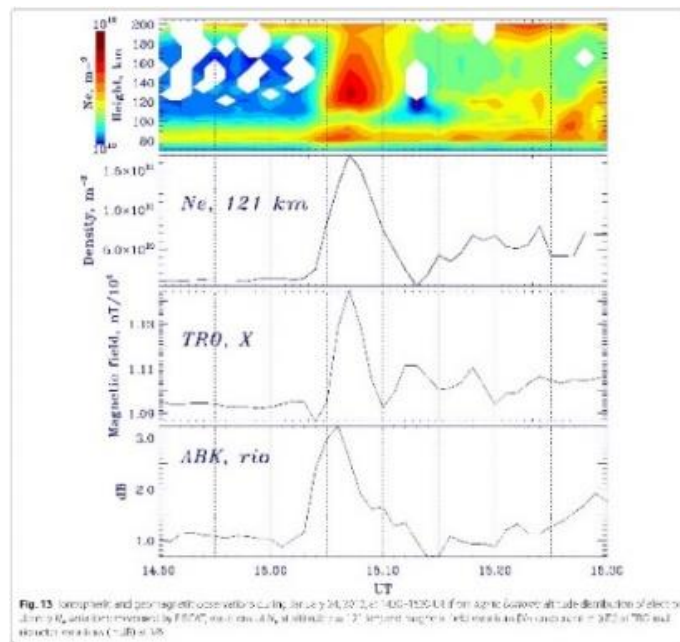


Рисунок 19.1 – Ионосферные и геомагнитные наблюдения во время начала магнитной бури (SC) 24.01.2012: распределение электронной плотности в ионосфере по высоте по данным ионосферного радара EISCAT, плотность электронов N_e на высоте $h=121$ км по радарным данным, магнитное поле на наземной станции TR0, и риометрическое поглощение на станции IVA

На основе такой комплексной информации может быть построена теория реакции магнитосферы и ионосферы на межпланетную ударную волну. Во время SC кратковременный и интенсивный всплеск ГИТ с амплитудой до ~ 30 А был зарегистрирован на всех станциях сети (рис. 19.2). Операторами ЛЭП этот всплеск воспринимался как короткое замыкание в линии. Изменения ГИТ во времени аналогичны изменениям производной поля dX/dt на близлежащей магнитной станции. Во время SC уровень dX/dt достигает ~ 180 нТ/мин. Интенсивность ГИТ, вызванная SC, примерно в два раза выше, чем ГИТ во время последующей суббури, хотя амплитуда SC (~ 400 нТ) меньше, чем амплитуда связанной с суббурей магнитной бухты (~ 600 нТл).

Рассмотрены возмущения сигналов навигационной спутниковой системы GPS при начале суббури [Kozyreva et al., 2017]. Обнаружено, что начало суббури вызывает резкий рост интенсивности вариаций фазы навигационных сигналов, характеризуемой производной полного электронного содержания (ПЭС), $dTEC$. Резкий всплеск риометрического поглощения, вызванный высыпанием энергичных электронов, сопровождался увеличением ПЭС, достигающим до нескольких TECu. Сопоставление 2D карт пространственного распределения спектральной мощности магнитных флуктуаций в диапазоне Pc5 и ионосферных цинтилляций $dTEC$ во время развития суббури показывает хорошее согласие между ними. Как магнитные, так и ионосферные флуктуации преимущественно концентрируются внутри границ аврорального овала, определенных по модели OVATION. Таким образом, сигналы спутниковых навигационных можно использовать для изучения пространственно-временной эволюции ионосферной проекции суббури.

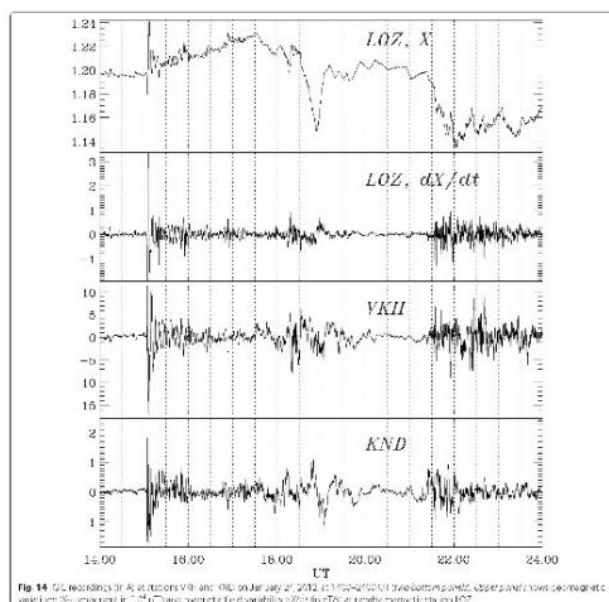


Рисунок 19.2 – Регистрация ГИТ в ЛЭП во время магнитной бури 24.01.2012 по данным пунктов VKH и KND (две нижние панели). Вариации магнитного поля ΔX и производной поля во времени dX/dt на ближайшей магнитной станции LOZ даны на двух верхних панелях

Данные системы регистрации ГИТ в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии, и данные магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик вариабельности геомагнитного поля [Пилипенко и др., 2018]. Векторная техника представления вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля ΔB и его производной dB/dt для магнитной бури 17 марта 2013 года показала гораздо большую вариабельность величины dB/dt по сравнению с ΔB . Количественная оценка вариабельности с помощью введенного RB-параметра подтвердила, что вариации геомагнитного поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока для расчета ГИТ. Ионосферные токи флуктуируют не только в направлении В-З, но и в направлении С-Ю. Таким образом, ГИТ направлены во всех направлениях и представляют опасность для энергетических систем, вытянутых не только в В-З, но в С-Ю направлениях. Сделан вывод, что генерация интенсивных ГИТ в значительной степени связана не с глобальными геомагнитными возмущениями большой амплитуды (магнитные бухты, главная фаза бури, начало суббури), а с локальными быстрыми вариациями сравнительно небольшой амплитуды, наложенными на глобальные возмущения. Механизмы этих быстрых локальных возмущений изучены явно недостаточно.

Для основной магнитосферной структуры на высоких широтах – аврорального овала, характерно наличие высокого уровня турбулентности плазмы, что значительно снижает устойчивость радиосвязи и точность навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Это диктует необходимость усовершенствования методов мониторинга положения аврорального овала. К настоящему времени предложены модели овала, основанные либо на оптических наблюдениях со спутников, либо на определении продольных токов между ионосферой и магнитосферой по данным спутниковых

магнитометров, либо по энергетическим характеристикам высыпающих частиц. Задача определения динамики границ овала по данным наземных магнитных станций остается нерешенной, несмотря на отдельные обнадеживающие результаты. Резкая активизация аврорального овала происходит при суббурях, при этом суббуря развивается как серия "детонаций", сопровождаемых усилением авроральной светимости, интенсификации ионосферного электроджета и всплеска мощности сигналов Pi2. *Martines-Bedenko et al.* [2017] рассмотрели снимки наложенных ультрафиолетовых (УФ) авроральных изображений со спутников POLAR и IMAGE и мощность УНЧ волн в полосе частот Pi2 (5–30 МГц) (рис. 19.3).

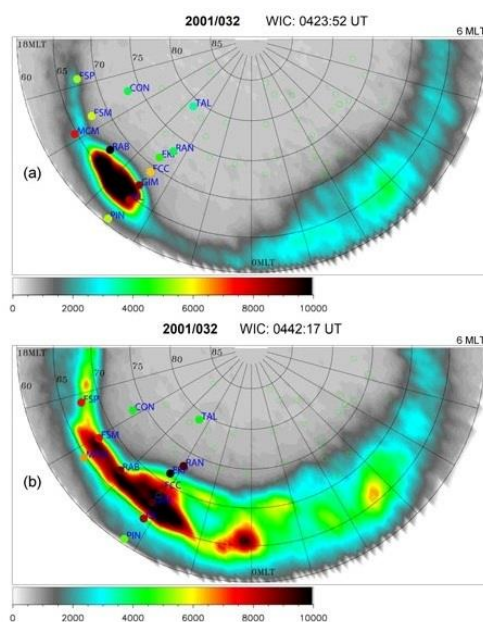


Рисунок 19.3 – Две последовательных суббуревых активизации 01.02.2001 (день 032): интенсивность свечения аврорального овала по данным УФ камеры спутника IMAGE и мощность Pi2 пульсаций (дана цветовой кодировкой каждой станции)

Обнаружено, что широтное положение западного электроджета и мощности Pi2, в основном, приурочены к полюсной границе аврорального овала (зоны УФ свечения) (рис. 19.4). Этот наблюдательный результат соответствует механизму переноса УНЧ сигналов из магнитного хвоста до ионосферы вдоль границы плазменного слоя. На основании полученных результатов предложен дополнительный простой способ мониторинга полюсной границы аврорального овала по наземным геомагнитным данным по максимуму в широтном распределении мощности Pi2 колебаний.

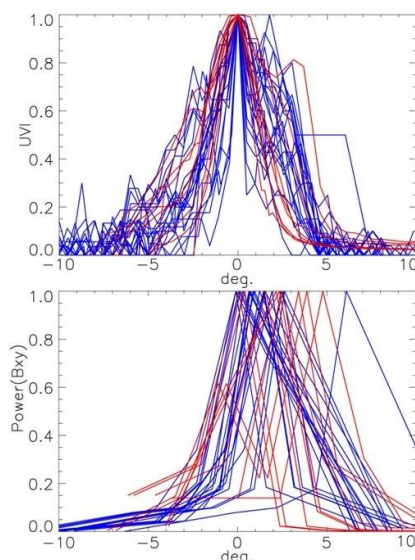


Рисунок 19.4 – Верхняя панель: Распределение по широте интенсивности аврорального УФ свечения в моменты времени, совпадающие с появлением Pi2 пульсаций. Распределение центрировано к единой широте максимума. Красные линии соответствуют событиям, зарегистрированным на спутнике POLAR, синие - на спутнике IMAGE. Нижняя панель: распределение по широте спектральной мощности Pi2 пульсаций

Разработано веб-ориентированное приложение (<http://geomag.gcras.ru/dataserv-ionomodel.html>) для расчета и визуализации результатов моделирования электродинамических параметров северной или южной полярной ионосферы. Веб-интерфейс приложения позволяет задавать входные параметры модели: компоненты межпланетного магнитного поля; Кр-индекс геомагнитной активности; индекс солнечной активности F10.7. Выходными файлами являются двумерные распределения трех моделируемых параметров в координатах геомагнитная широта – местное геомагнитное время. Серверная часть написана на языке Python с применением фреймворка Django, за расчет модели отвечает внешний модуль, реализованный на языке Fortran. Исходный код веб-приложения расположен по адресу <https://github.com/Smokyline/dataserv-ionomodel-ru>.

Ведется работа по расширению функционала программно-алгоритмических средств для комплексного анализа обсерваторских и спутниковых геомагнитных наблюдений. Предложен новый алгоритм калибровки данных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ с целью предоставления оценок среднеквадратических отклонений (СКО) ошибок данных [Lesur et al., 2017]. Процедура калибровки задается как нелинейная обратная задача, обеспечивающая оценки базисных значений в трех ортогональных направлениях наряду с ожидаемыми СКО. Для этой обратной задачи оценивается статистика ошибок данных по двум сериям абсолютных наблюдений. Алгоритм сравнивался с традиционной процедурой расчета базисных линий. С точки зрения моделирования магнитного поля результаты свидетельствуют о том, что даже на изолированных обсерваториях имеют место очень локализованные возмущения на широком диапазоне временных частот, достигающие 1 нТл. Обнаруженные СКО заключают в себе возмущения масштаба нескольких сот метров длительностью менее

1 дня. Кроме этого, была разработана программа визуализации и анализа геомагнитных данных, синхронно зарегистрированных на геомагнитных обсерваториях и спутниками SWARM (на которую получено о государственной регистрации).

Создана и развивается современная система регистрации и публикации геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier), адрес – <http://esdb.wdcb.ru>. Данная система регистрации и публикации геофизических данных является структурой для постоянной идентификации и управления интеллектуальным контентом и метаданными, связи пользователей с поставщиками данных, способствует развитию культуры цитирования данных. В 2017 г. система была расширена за счет присуждения DOI массивам значений ULF-индекса, рассчитанным в ходе выполнения проекта.

Все научные результаты, полученные в отчетном году, выложены в свободный доступ на сайте <http://ulf.gcras.ru/>.

Список использованных источников

Пилипенко В.А., Белаховский В.Б., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь на электроэнергетические системы, Физика Земли, №1, 56–68, 2018.

Belakhovsky V.B., V.A. Pilipenko, Ya.A. Sakharov, D.L. Lorentzen, S.N. Samsonov, Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012, Earth, Planets and Space, 69:105, 2017.

Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Engebretson M.J., GPS-TEC response to the substorm onset, GPS Solutions, 21(3), 927-936, 2017.

Lesur V., Heumez B., Telali A., Lalanne X., Soloviev A., Estimating error statistics for Chambon-la-Forêt observatory definitive data, Annales Geophysicae, 35, 939-952, 2017.

Martines-Bedenko V.A., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Moldwin M.B., Time-spatial correspondence between Pi2 wave power and ultra-violet aurora bursts, Russian J. Earth Science, 17, no. 4, ES4003, 1-14, 2017.

Martines-Bedenko V.A., V.A. Pilipenko, M. Hartbinger, M.J. Engebretson, A.N. Willer, Correspondence between the latitudinal ULF wave power distribution and auroral oval in conjugate ionospheres, Sun and Geosphere, 13/1, 41-47, 2018.

Pilipenko V.A., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N., The magnetic field variability and geomagnetically induced currents in electric power lines during magnetic storm March 17, 2003, Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, 34-37, 2017.

20. Проект РНФ № 17-17-01215 "Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа"

Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990128-8

Руководитель: зам. директора по науке, чл.-корр. РАН Ан. А. Соловьев

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

20.1. Анализ методов диагностики геомагнитных бурь с помощью матричных детекторов космических лучей

Для разработки методов ранней диагностики корональных выбросов масс, способных вызывать мощные магнитные бури в магнитосфере Земли, был проведен анализ по зарубежным и отечественным публикациям существующих методов обнаружения геомагнитных бурь и на основе наблюдений с помощью матричных систем детектирования космических лучей. В настоящее время подобные исследования проводятся с помощью глобальной сети многонаправленных мюонных телескопов (GMDN) и широкоапертурных мюонных годоскопов. Методика основана на раннем обнаружении анизотропии космических лучей (КЛ), вызванной изменением их потока при прохождении через область возмущенного межпланетного магнитного поля (ММП).

Корональный выброс массы (КВМ) во время вспышки на Солнце, наблюдаемый в солнечной короне, распространяется и взаимодействует с межпланетной средой (солнечным ветром) и может образовывать структуру, части которой отличаются своими магнитными параметрами и химическим составом частиц. Такие части КВМ представляют собой оболочку (область быстрых изменений магнитного поля), магнитное облако или области обедненной плотности и увеличенного магнитного поля с предшествующими межпланетными (МП) ударными волнами. Их взаимодействие с магнитным полем Земли вызывает также ударные геомагнитные возмущения на Земле. В настоящее время существует несколько моделей взаимодействия первичных космических лучей (ПКЛ) с возмущениями ММП, вызванными прохождением КВМ.

Дрейфовая модель переноса ПКЛ лучей в гелиосфере предсказывает двунаправленный широтный градиент плотности ПКЛ, указывающий в противоположных направлениях на противоположных сторонах гелиосферного токового слоя. Пространственное распределение плотности ПКЛ можно определить по измерению анизотропии потока ПКЛ на Земле, поскольку диффузионный перенос потока ПКЛ отражает локальный пространственный градиент плотности ПКЛ. Анизотропия потока ПКЛ проявляется в виде суточной анизотропии и анизотропии "север-юг" интенсивности, регистрируемой наземными детекторами. Анализируя годовую среднюю анизотропию, наблюдаемую несколькими мюонными детекторами, были выявлены долгосрочные вариации радиального и широтного градиентов плотности ПКЛ в гелиосфере, а также вариации средних длин пробега ПКЛ, рассеянных на магнитных неоднородностях ММП. Эти исследования предоставляют важную информацию о крупномасштабном распределении ПКЛ и позволяют провести критические тесты физических моделей для модуляции ПКЛ в гелиосфере. На основе анализа суточной анизотропии, наблюдаемой

с несколькими мюонными детекторами, было подтверждено существование двунаправленного широтного градиента, предсказанного дрейфовой моделью. Градиент изменялся с изменением солнечной магнитной полярности примерно в каждый максимум солнечных пятен.

Был проведен анализ моделей возможных прекурсоров магнитных бурь, которые получаются из данных матричных мюонных детекторов. В дополнение к Форбуш-эффектам, совпадающим по времени с геомагнитными бурями, существуют некоторые прекурсоры, которые могут наблюдаться мюонными детекторами значительно ранее (от 8 до 25 часов), чем существующее предупреждение за 0,5–1 час при обнаружении возмущения ММП космическим аппаратом ACE. Эти предикторы бывают двух типов: конус потерь (LC) анизотропии (т. е. дефицит) и повышенная дисперсия потока мюонов. КВМ, распространяясь в направлении Земли, генерирует межпланетные ударные волны. Позади ударной волны имеется обедненная область (ФП). Численное моделирование распределения питч-углов заряженных частиц, проходящих через ударную волну, показывает уменьшение интенсивности частиц в узком конусе потерь по направлению движения (рис. 20.1). Другим типом прекурсора является изменение интенсивности и увеличение ее флуктуаций (прекурсор повышения вариации (EV)). Возможным механизмом этого прекурсора является отражение от межпланетной ударной волны налетающих частиц КЛ с большими питч-углами.

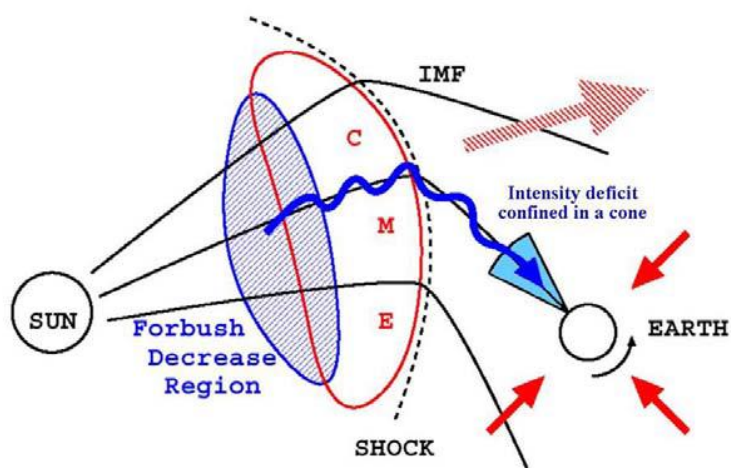


Рисунок 20.1 – КВМ и анизотропия космических лучей

Подход, используемый для анализа прекурсоров LC, заключается в следующем. Для анализа используется темп счета мюонов КЛ, скорректированный на изменение атмосферного давления. Прекурсор LC наблюдается как дефицит интенсивности, когда направление движения в направлении Солнца контролируется мюонным детектором. Чтобы обеспечить точный анализ событий LC и улучшить наблюдения прекурсоров, необходимо должным образом удалить вклад от суточной анизотропии, которая всегда существует в пространстве с амплитудой, сравнимой с дефицитом интенсивности из-за анизотропии LC. В результате получается двумерный набор вычисленных коррекций интенсивности по возможным направлениям мюонных телескопов.

Для представления анизотропии конуса потерь используются несколько подходов:

– Результаты для всех каналов направлений многонаправленного телескопа представляются в виде двумерной карты цветных контуров, где широта направления прихода, проходящая от северных (верхних) и южных (нижних) направлений в поле зрения масштабируется вдоль вертикальной оси, а долгота от восточного (правого) и западного (левого) направлений находится на горизонтальной оси. Кроме того, на карте отображаются контурные линии питч-угла, измеренного от наблюдаемого направления ММП; питч-угол вычисляется для КЛ, падающих на каждый канал направлений, с медианной первичной энергией, соответствующей этому каналу.

– Другим способом представления интенсивности мюонов относительно возможных направлений интенсивности в пределах апертуры детектора является использование двумерной карты с измерениями вдоль двух осей координат времени и питч-угла. В результате получается двумерное распределение по питч-углу интенсивности КЛ относительно времени, наблюдаемого мюонным телескопом во время геомагнитной бури. Питч-угол каждого направления мюонного телескопа определяется как угол между силовой линией ММП на Солнце и направлением j -го направления телескопа в i -м мюонном детекторе сети GMDN. Обычно величина анизотропии изображается кругами с соответствующими диаметрами. Открытые и сплошные круги представляют собой, соответственно, избыток и дефицит интенсивности CR по отношению к ожидаемой интенсивностью в соответствии с используемой моделью.

– В мюонных годоскопах, которые регистрируют каждый мюон, проходящий через детектор в режиме реального времени, анализ угловых вариаций осуществляется по мюонограммам, которые представляют собой графические отображения матрицы изменений углового распределения интенсивности событий за определенный промежуток времени (текущая матрица) относительно нормировочной матрицы за предшествующие 24 часа, в единицах статистических погрешностей (рис. 20.2). Каждая угловая матрица формируется из углового распределения направлений всех мюонов, зарегистрированных в течение единичного интервала экспозиции. Для каждой угловой ячейки матрицы проводится барометрическая коррекция значений, используя барометрические коэффициенты для каждой ячейки матрицы, а также вводятся поправки на температуру. Для анализа анизотропии углового распределения потока мюонов используется получаемый в режиме реального времени вектор локальной анизотропии, представляющий собой сумму единичных векторов зарегистрированных треков частиц, нормированную на число треков, его три проекции и длину. Дополнительную информацию позволяет получить разница текущего вектора анизотропии и некоторого среднего его значения, вычисленного по ранее набранным данным. Разница этих векторов (относительный вектор анизотропии) и его горизонтальная проекция показывают, в каком направлении и в какой степени произошла деформация углового распределения потока частиц. Для анализа вариаций периодических сигналов во временных рядах темпа счёта и характеристик зенитно-угловых распределений выполняется вейвлет-обработка последовательности мюонных матриц с использованием вейвлета Морле.

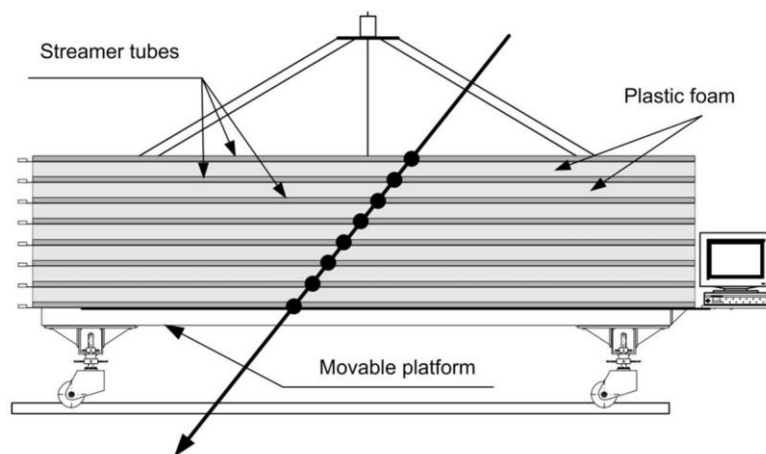


Рисунок 20.2 – Схема регистрации одиночной частицы СМ УРАГАН

20.2. Анализ технических решений матричных детекторов мюонов космических лучей

Анализ осуществлялся с целью сопоставления возможностей различных мюонных детекторов для анализа гелиосферных и магнитосферных возмущений. Рассматривались угловое разрешение детекторов, их чувствительность к вариациям зенитно-углового распределения потока мюонов. Исследовались возможности детекторов по локализации возмущений потока мюонов в угловом пространстве.

Многонаправленные мюонные телескопы (ММТ) и мюонные годоскопы (МГ) позволяют отслеживать вариации интегральной интенсивности и интенсивности с различных направлений. Детекторы с высоким угловым разрешением позволяют локализовать ту область на небесной сфере, из которой наблюдается возмущение. Дополнительную информацию для анализа может дать исследование вариаций формы углового распределения потока мюонов.

Возможности мюонных детекторов зависят от их конструкции. Для исследования вариаций потока атмосферных мюонов нет необходимости точного восстановления трека одиночной частицы. Приоритетным при выборе конструкции детектора является большая площадь регистрации, простота в изготовлении и эксплуатации.

Для одновременной регистрации потока частиц с различных направлений используются многонаправленные мюонные телескопы (ММТ), которые представляют собой, по крайней мере, две плоскости из нескольких независимых сцинтилляционных счётчиков. Количество выделяемых направлений у ММТ, входящих в глобальную сеть мюонных детекторов (GMDN): Hobart – 25 (5×5), Nagoya – 36 (6×6), Kuwait – 121 (11×11) и São Martinho – 49 (7×7). Треки частиц выделяются двойными совпадениями сигнала от любого верхнего счётчика с сигналом от любого нижнего счётчика. Существенным недостатком таких систем является отсутствие информации о треках мюонов, поэтому регистрируется только тем счета в пределах телесного угла, определяемого апертурой того или иного направления ММТ.

Мюонные годоскопы (МГ), в отличие от ММТ, имеют более сложную конструкцию. Их отличительной особенностью являются, несколько двухкоординатных XY-плоскостей, которые обеспечивают регистрацию трека частицы в пространстве. Каждая XY-плоскость

состоит из взаимоперпендикулярных плоскостей X- и Y-стрипов. Совпадение сигналов с X- и Y-стрипов выделяет в пространстве координату точки прохождения частицы. По сравнению с ММТ в МГ большая плотность регистрирующих элементов. Реконструкция трека делается по координатам, полученным от каждой XY-плоскости. Материал, из которого состоит стрип, может быть различным. В МГ ТЕМП (МИФИ) стрип представляет собой узкий длинный сцинтилляционный счетчик, в МГ УРАГАН (МИФИ) стрип – узкая алюминиевая пластина, на которую наводится электрический сигнал со стриммерных трубок. МГ могут отличаться количеством координатных плоскостей, количеством и размером стрипов. В сцинтилляционных МГ выделяемое направление частицы строго проходит через внутренний объём стрипов, что приводит к дискретности реконструированного углового распределения.

В МГ УРАГАН реконструкция трека осуществляется проведением прямой методом МНК через координаты полученных в событии точек, что приводит к получению квазинепрерывного углового распределения. В некотором смысле, мюонный годоскоп УРАГАН, имеющий восемь двух-координатных плоскостей, является "идеальным" годоскопом, восстанавливающим в режиме реального времени полный поток мюонов из верхней полусферы, и имеющем практически непрерывную апертуру. Такой годоскоп позволяет строить мюонографии – "снимки" верхней полусферы в мюонном свете и выделять "образы" анизотропии мюонов КЛ, вызванной различными процессами модуляций ПКЛ.

В течение первого этапа было проведено сопоставление возможностей многонаправленных мюонных телескопов и мюонных годоскопов для анализа гелиосферных и магнитосферных возмущений. Сопоставление проводилось по мюонным детекторам с различными конструкциями: количества, размеров и расположения регистрирующих сцинтилляционных счётчиков (стрипов). Результаты сопоставления показывают, что: 1) угловые разрешения ММТ выделяемых отдельных направлений значительно хуже, чем угловые разрешения МГ; 2) чувствительность к вариациям зенитно-углового распределения потока мюонов в ММТ и МГ при использовании вектора анизотропии такая же, как и у идеальных координатно-трековых детекторов таких же размеров (УРАГАН), и определяется исключительно статистической обеспеченностью данных; 3) чувствительность к локальным возмущениям в потоке мюонов при использовании вектора относительной анизотропии у ММТ и МГ такая же, как и у идеальных координатно-трековых детекторов таких же размеров, и определяется исключительно статистической обеспеченностью данных; 4) точность определения направлений на локальные возмущения в потоке мюонов, ограничена угловым разрешением детектора. Использование для локализации возмущения только одной ячейки матрицы однозначно включает в себя неопределённость, обусловленную угловым разрешением детектора. Но использование совокупности значений многих ячеек может позволить достичь точности лучше, чем угловое разрешение; 5) данные мюонных годоскопов позволяют выделять зоны локальной анизотропии и проследивать динамику их изменений. Для получения таких же данных с помощью ММТ, необходимо использовать сеть детекторов, расположенных в различных точках земного шара, и осуществлять анализ данных с помощью метода "глобальной съемки", в котором

неизбежно присутствуют неопределенности, связанные с функционированием и калибровкой различных мюонных телескопов; 6) с помощью мюонных годоскопов возможно восстановление энергетического спектра форбуш-понижений по данным только одного годоскопа, что затруднительно в случае ММТ из-за небольшого числа выделяемых направлений; 7) при одинаковых площадях регистрации детекторы с лучшим угловым разрешением для анализа возмущений имеют преимущество.

20.3. Анализ моделей солнечных корональных выбросов

Модели солнечных корональных выбросов масс (КВМ) в рамках первого этапа проекта необходимы для разработки алгоритмов цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа (МГ) в интересах решения задачи ранней диагностики геомагнитных бурь. Произведённый анализ вариантов моделей КВМ направлен на решение основной задачи, состоящей в установлении свойств и параметров КВМ и их связей с матрицами наблюдений МГ. Материалы анализа базируются на достаточно полной подборке зарубежных и отечественных публикаций. Первая группа вариантов моделей описывает исходное состояние областей солнечной атмосферы, в которых зарождаются КВМ, исследует равновесие и неустойчивости плазмы в магнитном поле короны. Вторая группа моделей служит для интерпретации динамических и кинематических характеристик КВМ, наблюдаемых в поле зрения коронографов. Третья группа моделей предназначена для анализа распространения КВМ, структуры их магнитного поля в межпланетном пространстве, взаимодействия с солнечным ветром, изменения их формы и объема.

Обычно, КВМ появляется в виде яркого выпуклого образования (рис. 20.3). По мере его развития реализуется петлеобразная фронтальная часть, обрамляющая протяженную темную полость, в середине которой располагается яркое компактное ядро. Нередко в ядре видна волокнистая скрученная структура. Угловые размеры КВМ, в среднем, составляют около $40\text{--}50^\circ$, однако бывают выбросы типа "гало", которые заполняют все 360° вокруг диска. Это те КВМ, которые имеют источник близкий к центру солнечного диска и перемещаются в направлении Земли или в противоположном направлении.

Наблюдаются КВМ со скоростями в широких пределах от 20 км/с до 2500 км/с, в среднем ~ 500 км/с. Медленные КВ обычно движутся с ускорением порядка 10 м с^{-2} , но в некоторых случаях ускорение достигает 1500 м с^{-2} , что в пять раз превышает значение ускорения свободного падения на Солнце. Масса вещества, вовлеченного в КВМ меняется в пределах $10^{14}\text{--}10^{16}$ г со средним значением около $2 \cdot 10^{15}$ г. Соответственно, средняя кинетическая энергия КВМ составляет $\sim 10^{30}$ эрг.

В ряде случаев КВМ имеют вид конуса с вершиной в центре Солнца и полусферической внешней поверхностью, напоминающей рожок мороженого – "ice-cream cone model". Такая форма и угловой размер сохраняются в течение длительного времени перемещения КВМ. Направление оси конуса определяется путем подгонки параметров модели к измерениям в разных точках. С помощью данной модели удаётся прогнозировать приход КВМ к Земле.

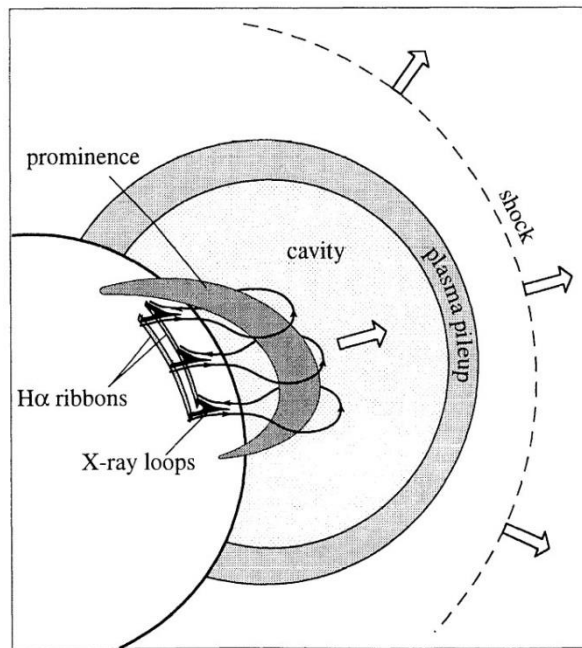


Рисунок 20.3 – схематическое изображение структуры коронального выброса, состоящего из протуберанца, образующего ядро, темной полости вокруг него, внешней фронтальной петли из собранной сжатой корональной плазмы и возбужденной ударной волны

Установлено, в результате анализа моделей, что: 1. можно выделить зону, связанную с короной Солнца, размером $\approx 0.05\text{--}0.2$ а.е., в которой КВМ имеют небольшие угловые размеры для наблюдений с орбиты Земли и их можно, с определёнными допущениями, рассматривать в виде перемещающихся почти точечных областей, и зону в гелиосфере размером $\approx 0.2\text{--}1.0$ а.е., в которой угловые размеры КВМ становятся значительны и зависят от параметров плазмы окружающего солнечного ветра; 2. условные центры рассматриваемых областей перемещаются по траекториям, которым можно поставить в соответствие модельные параметрические функции.

20.4. Постановка задачи идентификации корональных выбросов на основе матричных данных широкоапертурных трековых систем с высоким угловым разрешением

Первая составляющая состояла в разработке метода оценивания аппаратной функции МГ, связывающей исходные функции распределения мюонных потоков с функциями наблюдений МГ-матриц. На основе анализа последовательностей исходных минутных матриц от МГ было установлено, что вид аппаратной функции МГ зависит от двух аргументов – азимутальных и зенитных углов и обладает двойной симметрией по азимутальному углу. Были сформированы поправочные коэффициенты для учёта влияния атмосферных изменений температуры и давления на МГ-матрицы. С учётом вида и коэффициентов был предложен метод нахождения оценки аппаратной функции, основанный на специальном усреднении исходных матриц, и, соответственно, формировании нормализованных МГ-матриц. На основе нормализованных матриц

вычислялись первичные оценки функций угловых распределений мюонных потоков (рис. 20.4).

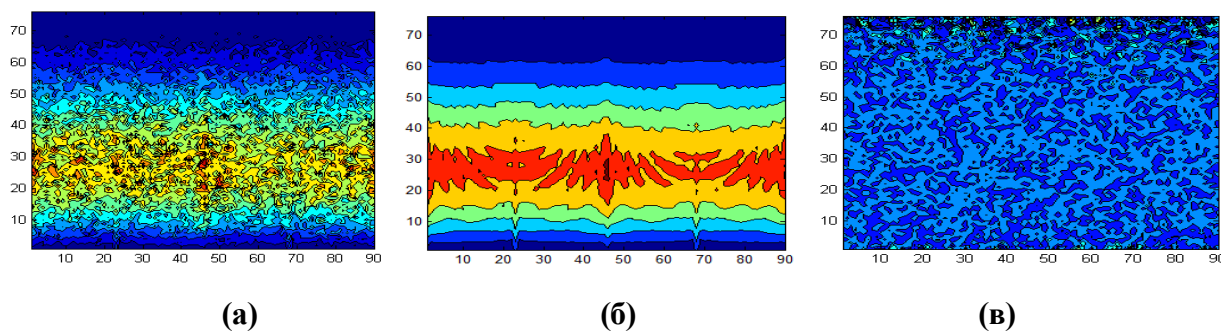


Рисунок 20.4 – Вид исходной (ненормализованной) функции (а), оценка аппаратной функции (б), оценка нормализованных наблюдений МГ (в)

Вторая составляющая состояла в разработке метода вычисления усреднённых интегральных коэффициентов интенсивности мюонных потоков для временных рядов исходных МГ-матриц. Был сформирован алгоритм вычисления последовательности коэффициентов интегральной интенсивности мюонных потоков, усреднённых по всем азимутальным и зенитным углам. На основе данного показателя оказались возможными распознавания снижений интенсивностей (Форбуш-эффекты) мюонных потоков во времени. Были выполнены необходимые вычислительные эксперименты с реальными МГ-матрицами и произведены сравнения их результатов с последовательностями Dst-индексов геомагнитной активности. Так, рассматриваемый коэффициент был вычислен на основе часовых МГ-матриц для июня 2015 г.; Dst-индекс для этого периода показал наличие геомагнитных бурь, начала которых приходились, примерно, на 08.06.2015 и 22.06.2015. Вычисленный коэффициент распознавал возникающие Форбуш-эффекты за 1–1.5 дня раньше, чем соответствующие Dst-индексы. Потенциально разработанный метод и показатель может быть применён для ранней диагностики геомагнитных бурь.

Третья составляющая состояла в разработке метода вычисления секционированных коэффициентов интенсивности мюонных потоков для временных рядов нормализованных МГ-матриц. Было предложено секционирование МГ-матриц и сформирован алгоритм вычисления последовательностей и введённых секционированных коэффициентов, усреднённых по соответствующим азимутальным и зенитным углам. Произведены предварительные вычислительные эксперименты с реальными МГ-матрицами. Потенциально разработанный метод секционированных коэффициентов может быть применён для оценивания угловых положений аномальных областей с КВМ.

Четвёртая составляющая состояла в разработке системы математических моделей для матриц МГ. Рассматриваемые модели предназначались для установления алгоритмических связей между функциями реализованных наблюдений для матриц МГ и функциями исходных распределений интенсивностей мюонных потоков. В моделях предполагался учёт параметров движений КВМ. Построенные модели были, в значительной степени, приближёнными и они предназначались для отработки алгоритмов цифровой обработки МГ-наблюдений. Была предложена модель для плоского случая (рис. 20.5а), базирующаяся на уравнениях взаимных движений элементов системы Солнце-КВМ-Земля-МГ и параметрах КВМ, гипотезе о равномерно расширяющейся сферической

области КВМ и равномерном прямолинейном движении её центра. Для фиксированного момента времени модель реализовывалась в виде одномерного зашумлённого МГ-массива, номера его ячеек определялись дискретными азимутальными углами. Возможный Форбуш-эффект в МГ-массиве реализовывался в виде лунки; её ширина и глубина определялись координатами и величиной радиуса КВМ. Разработанная модель была реализована на примерах задач вычисления угловых положений, координат центра и радиуса КВМ. Была предложена модель для пространственного случая в виде зашумлённой МГ-матрицы; Форбуш-эффекты моделировались с помощью лунок, аналогично плоскому случаю (рис. 20.5б).

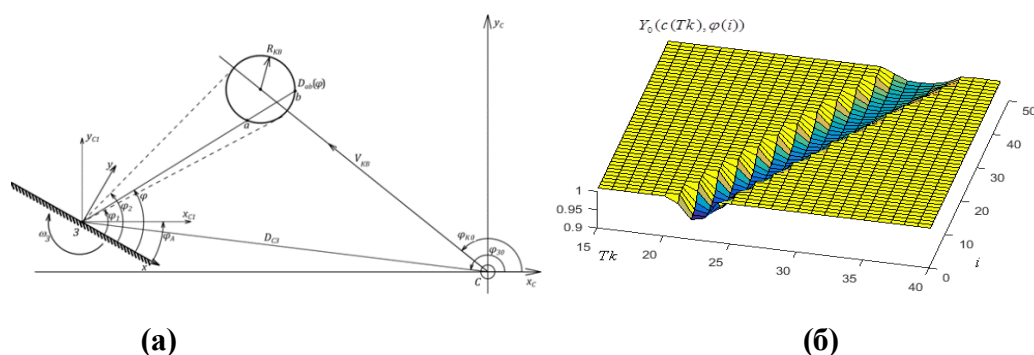


Рисунок 20.5 – Геометрическая схема движений элементов системы Солнце-КВМ-Земля-МГ (а), последовательность информационных массивов МГ для движущегося КВМ (б)

Пятая составляющая состояла в разработках: 1. метода двумерной фильтрации для устранения шумовых погрешностей в МГ-матрицах, базирующегося на двумерных локальных моделях; 2. метода фильтрации суточных колебаний в МГ-матрицах, основанный на применении двумерного фильтра Баттерворта. Предложенный метод двумерной фильтрации, был основан на построении аппроксимационных скользящих локальных моделей. Для его реализации был разработан алгоритм построения последовательностей двумерных скользящих локальных кусочно-линейных моделей. Получены результаты тестирования алгоритма на модельных наблюдениях для задач распознавания Форбуш-эффектов. Произведено оценивание погрешностей алгоритма на основе статистического моделирования. Разработана математическая технология оптимизации параметров предложенного двумерного фильтра. Её реализация основывалась на вычислении функции остатков для исходной и отфильтрованной МГ-матриц, вычислении для неё двумерной автоковариационной матрицы и введении специального функционала. На основе максимизации введённого функционала вычислялись оптимальные параметры фильтра. Статистическое моделирование подтвердило эффективность предложенного фильтра. Рассмотрение существующих вариантов двумерных фильтров позволило сделать вывод о его новизне. Была реализована задача фильтрации шумов в МГ-матрицах от годоскопа "УРАГАН" (рис. 20.6). Произведённые вычислительные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного фильтра при распознавании Форбуш-эффектов. Предложенный метод фильтрации суточных колебаний в МГ-матрицах был основан на применении двумерного

фильтра Баттерворта. Произведённые вычислительные эксперименты на модельных МГ-матрицах в предварительном порядке подтвердили его работоспособность.

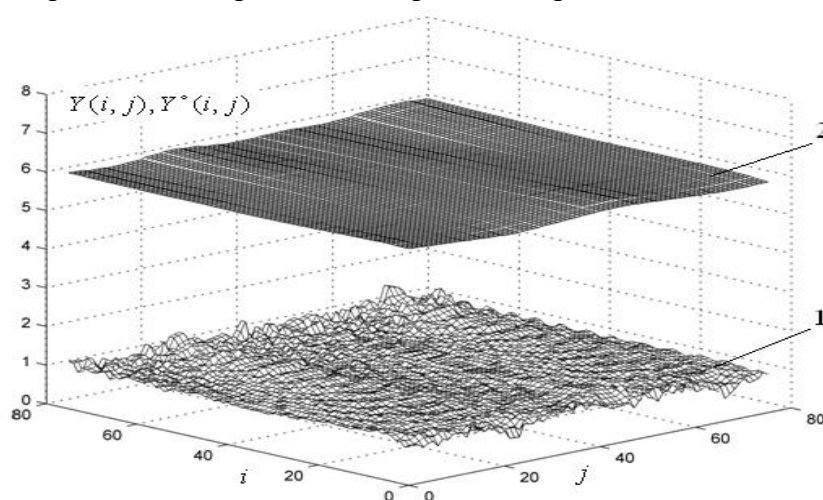


Рис. 20.6 – Экспериментальные наблюдения от МГ(1) и отфильтрованные наблюдения (2)

Шестая составляющая состояла в формировании постановки задачи идентификации КВМ на основе временных рядов исходных МГ-матриц с использованием распознавания Форбуш-эффектов во времени. В соответствии с рассмотренной постановкой, для эталонного временного интервала, с наблюдениями в которых заведомо отсутствовали Форбуш-эффекты, и которому соответствовало несколько исходных МГ-матриц, вычислялась оценки математических ожиданий и соответствующие верхние и нижние границы доверительных интервалов, которые размещались в верхней и нижней эталонной матрицах. Размерности вычисленных эталонных матриц совпадали с размерностями исходных матриц. Далее, на временном интервале, который примыкал к эталонному, производились для соответствующих исходных матриц вычисления скользящих математических ожиданий и соответствующих скользящих верхних и нижних границ доверительных интервалов, которые размещались в последовательностях верхних и нижних скользящих матриц. Затем, осуществлялась скользящая процедура принятия решений на основе сравнения эталонных и скользящих доверительных интервалов для каждой из ячеек рассматриваемых матриц. Рассматривались непересечения или пересечения доверительных интервалов. Если имело место непересечение, то принималось решение, что в ячейке реализовывался Форбуш-эффект; если имело место пересечение, то принималось противоположное решение. Предложенный подход был протестирован на основе статистического моделирования. Была сформирована последовательность зашумлённых исходных матриц с Форбуш-эффектами в виде лунок, параметры которых не менялись во времени. Подсчитывалось усреднённое отношение числа непересечений к общему числу ячеек в исходной матрице, которое сравнивалось с задаваемым порогом. Результаты статистического моделирования подтвердили работоспособность предложенного подхода для задачи распознавания Форбуш-эффектов и, соответственно, идентификации КВМ.

Седьмая составляющая состояла в формировании постановки задачи идентификации КВМ на основе временных рядов нормализованных МГ-матриц. Здесь также

идентификация КВМ реализовывалась на основе распознавания Форбуш-эффектов. В соответствии с рассмотренной постановкой задавался временной интервал с соответствующей последовательностью нормализованных МГ-матриц. Далее, эти матрицы подвергались двумерной фильтрации. С использованием предварительных оценок постоянного уровня для нормализованных МГ-матриц вычислялись двумерные функции разностей уровня и результаты фильтрации, которые размещались в разностных МГ-матрицах. Затем, осуществлялась скользящая процедура принятия решений на основе сравнения значений разностных МГ-матриц с заданным порогом для каждой из ячеек разностных МГ-матриц. Если имело место превышение порога, то принималось решение, что в ячейке реализовывался Форбуш-эффект; если имело место превышение, то принималось противоположное решение. Предложенный подход был протестирован путём проведения серии вычислительных экспериментов. Была сформирована последовательность зашумлённых нормализованных матриц с Форбуш-эффектами в виде лунок, параметры которых не менялись во времени. Подсчитывалось усреднённое отношение числа превышений к общему числу ячеек в разностной МГ-матрице, которое сравнивалось с задаваемым порогом. Полученные предварительные результаты позволили сделать вывод, что предложенный подход явился работоспособным для распознавания Форбуш-эффектов и, соответственно, идентификации КВМ.

20.5. Постановка задачи ранней диагностики геомагнитных бурь и экстремальных событий на основе матричных данных мюонного годоскопа

Предложен метод ранней диагностики геомагнитных бурь, базирующийся на временной функции оценки расстояния между Землёй и КВМ, и на сформированной технологии принятия решений. Разработан алгоритм диагностики, производящий оценку параметров модельных функций движения КВМ с использованием оптимизации функционала обобщённой триангуляции. Обеспечено вычисление функции оценки расстояния; реализована процедура принятия диагностических решений путём сравнения значения минимума функции оценки расстояния с заданным безопасным расстоянием Земля-корональный выброс масс.

Оценивание эффективности разработанного алгоритма ранней диагностики произведено с помощью статистического моделирования. Сделаны оценки вероятностей ошибок первого и второго рода при реализации решений по ранней диагностике геомагнитных бурь.

20.6. Разработка модели движений протонов космических лучей, образующих мюоны, треки которых попадают в апертуру мюонного годоскопа

Модель была разработана для случая невозмущенной гелиосферы. Гелиосферные возмущения изменяют состояние ММП. Это приводит к изменению траекторий заряженных ПКЛ, достигающих атмосферы Земли. При этом может измениться поток атмосферных мюонов, образующийся при взаимодействии ПКЛ с ядрами атомов атмосферы. Для сопоставления траекторий мюонов, зарегистрированных в наземном

детекторе, с траекториями первичных космических лучей в гелиосфере был разработан метод построения обратных траекторий. На обратной траектории частиц от детектора в межпланетное пространство можно выделить следующие области: атмосфера, магнитное поле Земли и межпланетное магнитное поле. В этих областях движение частицы происходит в соответствующих магнитных полях. Для мюона обратная траектория строится от детектора до высоты, на которой происходит его генерация. Далее мюон заменяется первичной частицей, например, протоном или ядром гелия, и строится обратная траектория для неё. При прохождении частиц внутри атмосферы необходимо учитывать энергетические потери. Использовался пошаговый метод построения обратной траектории, так как на каждом шаге следует отслеживать параметры атмосферы и магнитного поля. При построении обратной траектории используются следующие системы координат: 1) система координат детектора; 2) локальная система координат; 3) система координат WGS84 (World Geodetic System 1984), высота отсчитывается вверх вдоль нормали к земному эллипсоиду в точке. WGS84 используется системами глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС. 4) система координат GEO (Geographic coordinate system) – геоцентрическая система. 5) система координат HEEQ (Heliocentric Earth Equatorial).

При взаимодействии первичных частиц образуются быстрораспадающиеся пионы и каоны, создающие поток атмосферных мюонов. Вероятность взаимодействия зависит от плотности атмосферы и длины проходимой частицами траектории. Энергетические потери – ионизационные и радиационные, также зависят от плотности и длины траектории. Следовательно, из всего множества характеристик атмосферы для построения обратной траектории требуется знать плотность в любой её точке. Такую возможность предоставляет эмпирическая модель атмосферы NRLMSISE-00, по которой можно получить плотность в любой точке (в геодезических координатах WGS84) для номера дня относительно начала года и времени суток. Эта модель хорошо отражает сезонные и суточные изменения. Высота, на которой происходит взаимодействие (зона генерации), зависит от траектории первичной частицы. При построении обратной траектории эта высота оценивается численным интегрированием плотности вдоль направления обратного движения мюона до границы атмосферы. Также оцениваются ионизационные и радиационные потери мюонов. Шаг вдоль траектории Δr для мюона выбирается достаточно малым, не более 150 м. Таким образом, при построении обратной траектории определяются высота зоны генерации, и учитываются энергетические потери. Для моделирования движения в магнитном поле родительской частицы используются различные модели. Магнитное поле Земли имеет сложное пространственное распределение. Нужно было выбрать модель, позволяющую получить оценку вектора магнитного поля во всей области магнитосферы для конкретного момента времени. Такую возможность предоставляют модели магнитного поля Земли Н. А. Цыганенко TS05 (дальнее поле) и GEOPACK-2008 (ближнее поле). При построении обратной траектории необходимо проверять выход частицы за пределы магнитосферы. Это делается с помощью специальных подпрограмм GEOGSW_08 и SHUETAL_MGNP_08. После выхода за пределы магнитосферы частица оказывается в межпланетном магнитном поле (рис. 20.7). В отличие от характеристик атмосферы и магнитосферы, которые можно частично

приблизить к реальным, распределение магнитного поля в межпланетном пространстве неизвестно. Только в местах расположения космических аппаратов оборудованных, соответствующей аппаратурой, можно получить реальный вектор магнитного поля. Была использована модель межпланетного магнитного поля, предложенная Р. Lipari. Исходными параметрами моделей, которые легли в основу подготовленных программ расчета обратных траекторий являются: 1. Дата и время в UTC, 2. Координаты детектора на поверхности Земли, 3. Заряд мюона (положительный или отрицательный), 4. Кинетическая энергия мюона в детекторе, 5. Направление движения мюона в детекторе, 6. Толщина атмосферы для определения зоны генерации, 7. Тип родительской частицы (протон или альфа), её заряд и масса, 8. Кинетическая энергия родительской частицы, 9. Параметры межпланетного магнитного поля. Разработанный метод построения обратных траекторий, позволяет детально анализировать прохождение мюонов в атмосфере, протонов в магнитосфере и гелиосфере. Описанный метод будет использоваться для разнообразных целей: построение асимптотических направлений для наземных мюонных и нейтронных детекторов; анализ гелиосферных и магнитосферных возмущений; анализ вариаций потока мюонов.

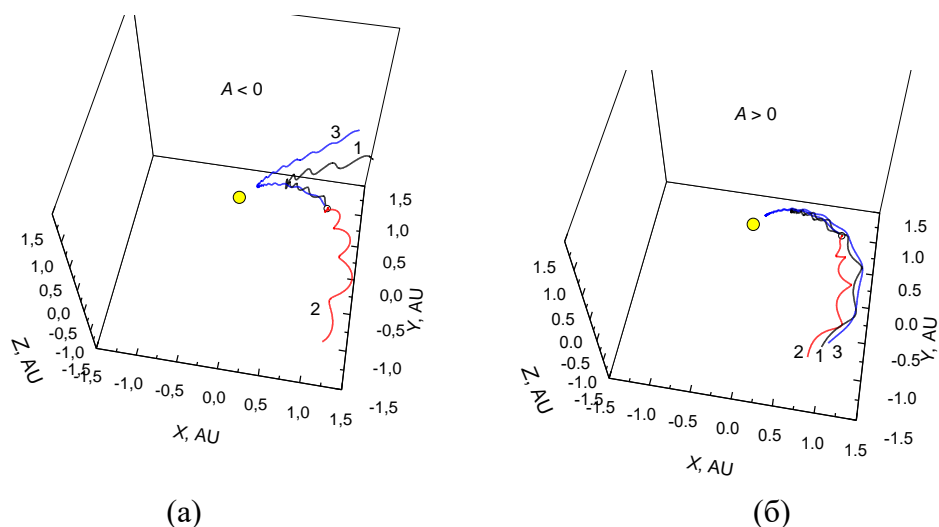


Рисунок 20.7 – Пример обратных траектории протонов в ближней гелиосфере (до 1.5 а.е.) для вертикальных мюонов, регистрируемых в трех точках России: 1 – Апатиты, 2 – Хабаровск, 3 – Москва. Полярность Солнца: а) отрицательная; б) положительная

21. Международная деятельность ГЦ РАН в 2017 году

В 2017 г. Геофизический центр РАН вел активную международную деятельность в кооперации с зарубежными коллегами и институтами-партнерами.

11 сентября 2017 г. Директор ГЦ РАН академик Алексей Джерменович Гвишиани избран членом Европейской Академии ("Academia Europaea") по секции EARTH & COSMIC SCIENCES. Европейская Академия – общественная неправительственная организация, призванная объединить ведущих учёных всех европейских стран. Была создана в 1988 году и включает в себя секции по всем основным разделам естественных и гуманитарных наук. Главная цель Европейской Академии – продвижение и распространение передового опыта в различных научных областях знаний.

А. Д. Гвишиани также вносит большой вклад в работу Международного института прикладного системного анализа (IIASA) и в 2017 г. был назначен заместителем председателя Совета IIASA.

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав исполнительных комитетов международных организаций. Заместитель директора по науке, член-корреспондент РАН Соловьев Анатолий Александрович является вице-председателем Комиссии по данным и информации (UCDI) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) и российским национальным делегатом в Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG). Главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований, д.ф.-м.н. Лукьянова Р.Ю. является членом исполнительного комитета (ИК) международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). За отчетный год была проведена серия совещаний, где была разработана новая редакция устава IAGA, обсуждались вопросы организации очередных конференций, выдвижения кандидатур на премии, издания монографии и другие вопросы. Заместитель директора по развитию, к.г.-м.н. Рыбкина Алёна Игоревна является членом ИК Комитета по данным для науки и технологий CODATA (The Committee on Data for Science and Technology ICSU). В 2017 г. важнейшим достижением стало совместное проведение первой региональной конференции CODATA, которая прошла в г.Санкт-Петербург при активной поддержке ГЦ РАН.

Совместно с CODATA сотрудниками лаборатории инновационных проектов ГЦ РАН была организована международная научно-практическая конференция "Global Challenges and Data-Driven Science", посвященная проблеме доступа, использования и анализа больших данных. Среди организаторов мероприятия выступили Комитет по данным для науки и технологий Международного совета по науке ICSU-CODATA, Российский научный фонд, Геофизический центр РАН, КСА инновационная группа, Научно-производственная корпорация МЕХАНОБР-ТЕХНИКА, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Международный союз геодезии и геофизики (IUGG), а также Международный совет социальных наук (ISSC).

В конференции приняли участие более 150 человек, среди которых известные ученые и признанные эксперты из 34 стран. Всего было сделано более 160 научных

докладов, проведено несколько рабочих совещаний и научно-практических семинаров. Конференция включала в себя 3 панельных дискуссии, 2 воркшоп, несколько бизнес-встреч. Докладчики затронули широкий спектр вопросов: от проблем хранения и передачи больших данных до роли больших данных в концепции умных городов. Выступающие ученые рассказали о значении больших данных в исследовании океана, агрокультуры, предсказании рисков природных катастроф. На практической секции были подняты вопросы использования больших данных в области металлургии, урбанистики и педагогики. Участники обсудили быстрый рост накопления больших данных и составили прогноз их будущего развития.

За отчетный период д.ф.-м.н. Лукьянова Р.Ю. вела активную работу в рамках программы для приглашенных исследователей Академии Финляндии и Центра компетенций Университета Оулу по изучению верхней атмосферы Земли и солнечной активности. Результатом работ 2017 г. была подготовка и публикация нескольких статей в высокорейтинговых международных журналах в соавторстве с финскими учеными, а также подготовка нескольких презентаций на международных и российских научных конференциях. Она также принимала активное участие в рабочей группе по исследованию верхней атмосферы-ионосферы с помощью метеорных радаров Международном институте космических исследований (МИКИ-ISSI), Берн, Швейцария. В группу входят исследователи из Финляндии, Германии, США, Японии, Швеции, Канады, Южной Кореи и России. Представители всех стран представляли данные своих метеорных радаров, в том числе, расположенных в Антарктике. Российские же данные в настоящее время недоступны. Основной целью 2017 года стало найти ресурсы для представления на мировом уровне российских данных зондирования. С этой целью было налажено Сотрудничество с Росгидрометом. Проект является двухгодичным и будет продолжаться в следующем году.

В кооперации с Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA) к.г.-м.н. А. И. Рыбкина в 2017 году участвовала в программе "Инициатива Арктического будущего" (AFI – Arctic Futures Initiative). Рыбкиной А.И. был разработан сводный отчет по новому исследовательскому проекту "Арктический регион – геологические данные и моделирование". В нем представлены сводные данные по Арктическим территориям, полученные из отчетов арктических прибрежных государств в Комиссию Организации Объединенных Наций по границам континентального шельфа (далее – Комиссия). Данный проект координируется Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA). В настоящее время правовые разграничения арктической территории становятся все более важными для мирового сообщества. Растет интерес к уникальным и значительным месторождениям нефти и газа в Арктике, а также к возможности открытия навигационных маршрутов, включая Северный морской путь. Разработанный документ представляет собой комплексный, многоплановый и междисциплинарный обзор проблем, связанных с арктическим регионом, с геологической, экономической и политической позиций, уделяя особое внимание материалам Комиссии. Арктические исследования активно развиваются вместе с новыми инновационными технологиями и по мере получения новых данных наша задача внести

свой вклад в развитие всесторонних исследований с целью обеспечения устойчивого будущего Арктики.

Программа INTRAMAGNET в 2017 году также получила большое развитие со стороны ГЦ РАН. Полученные в 2016 г. на обсерватории "Санкт-Петербург" (IAGA-код SPG) данные МПЗ были приведены в соответствие требованиям, предъявляемым к качеству окончательных данных международной сетью наблюдений INTERMAGNET. Окончательные минутные данные обсерватории, подготовленные ГЦ РАН, были одобрены и опубликованы на официальном сайте сети INTERMAGNET. В рамках участия в программе зам. директора по науке чл.-корр. РАН А. А. Соловьев принял участие в работе комиссии по магнитным обсерваториям (Космическое агентство ЮАР (SANSA, г. Херманус)) и представил заявку ГЦ РАН на включение обсерватории "Климовская" (Архангельская обл.) в международную сеть INTERMAGNET.

В 2017 году для продления аккредитации Мировых центров данных ГЦ РАН подготовлены и переданы в Научный комитет Мировой системы данных Международного совета по науке для продления аккредитации в качестве регулярных членов Мировой системы данных 3-х годовичные отчеты о деятельности МДЦ по солнечно-земной физике и физике твердой земли. Кроме того, в 2017 г. МДЦ по солнечно-земной физике передал большой массив геомагнитных данных МДЦ по геомагнетизму в Эдинбурге (подразделение Британской геологической службы).

Лаборатория электронных публикаций в 2017 году также уделила больше внимание освещению результатов международной деятельности:

- Журнал "Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН", издал тезисы Международной научно-практической конференции Global Challenges and Data-Driven Science (8–13 октября 2017 г., Санкт-Петербург, Россия).

- Непосредственно работу конференции освещал журнал "Вестник ОНЗ РАН" – сотрудник лаборатории Д. Д. Савинова выступала в роли корреспондента журнала.

Несомненно, важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах среди которых стоит отметить следующие:

- 24 января 2017 г. с.н.с. лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов принял участие во 2-м заседании Рабочей группы БРИКС по геопространственным технологиям (BRICS WG-GS) и 1-м семинаре БРИКС по геодезии, организованных на полях Всемирного геопространственного форума 2017 г., который проходил 23–25 января 2017 в г. Хайдарабад, Индия. Р. И. Красноперов был членом официальной делегации от Российской Федерации и представлял Российскую академию наук на данном мероприятии.

- С 9 по 15 апреля 2017 г. состоялась экспедиция сотрудников ГЦ РАН в Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. ак. А. Назарова (ИГИС) Национальной академии наук Республики Армения, расположенный в г. Гюмри, Армения. В ходе командировки были выполнены геомагнитные исследования на территории геофизического полигона ИГИС НАН РА (пос. Гюлагарак, область Лори) с целью определения мест, пригодных для возведения

абсолютного и вариационного павильонов планируемой совместной обсерватории стандарта INTERMAGNET.

- С 17 по 21 июня 2017 г. прошел международный воркшоп "Inter-Union Workshop on 21st Century Scientific and Technical Data: Developing a roadmap for data intergration", организованный Комитетом по данным для науки и технологий (ICSU CODATA). Данный воркшоп стал первым мероприятием по тематике создания унифицированных стандартов данных, с момента утверждения рабочей группы CODATA "Coordinating Data Standards amongst Scientific Unions" в 2016 г. На мероприятии было около 25 участников представителей разных областей знаний. В работе воркшопа приняла участие зам. директора по развитию, к.г.-м.н. Рыбкина А.И.

- С 10 по 15 июля 2017 г. в Иркутске прошел Второй генеральный симпозиум VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact), на котором зам. директора по науке, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев выступил с приглашенным докладом

- 20–26 августа 2017 г. м.н.с. лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований Д. В. Кудин принял участие в третьей летней школе молодых ученых IAGA-2017, которая состоялась в научном центре южно-африканского космического агентства (SANSA) при поддержке Международного агентства геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) в г. Херманус, ЮАР. В ходе школы участники работали над несколькими групповыми проектами, Д. В. Кудин принимал участие в работе над проектом QFH-антенны для получения спутниковых снимков с метеоспутников. По итогам работы Д. В. Кудин получил сертификат о посещении школы IAGA-2017.

- С 27 августа по 1 сентября 2017 г. прошла Совместная научная ассамблея трех международных ассоциаций: физический наук об океане (IAPSO), метеорологии и атмосферных наук (IAMAS) и геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG), которая состоялась в г. Кейптауне, ЮАР. Данное научное мероприятие, проходящее раз в четыре года (через два года после очередной Генеральной ассамблеи IUGG), собрало ведущих ученых и специалистов в области наук о Земле. В работе Ассамблеи приняли участие более 1 тыс. делегатов из более чем 60 стран мира. От лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований в работе Ассамблеи приняли участие: зам. директора по науке ГЦ РАН чл.-корр. А. А. Соловьёв; г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова; с.н.с., к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров.

- С 3 по 7 сентября прошла международная конференция Регионального комитета по средиземноморской неогеновой стратиграфии (Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy – RCMNS). Тематика конференции в этом году была посвящена изучению физических основ развития Средиземноморского бассейна в неогене ("Exploring a "physical laboratory": the Mediterranean Basin"). В работе конференции с докладом приняла участие зам. директора по развитию, к.г.-м.н. Рыбкина А.И.

- В августе 2017 года в рамках научной Ассамблеи Международной Ассоциации геомагнетизма и аэронавтики (МАГА), проходившей в Кейптауне, ЮАР, д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова представила приглашенный доклад, посвященный измерениям параметров глобальной атмосферно-ионосферной электрической цепи в Арктике и Антарктике.

Список научных публикаций и свидетельств о регистрации результатов интеллектуальной деятельности за 2017 г.

Монографии и главы в книгах

1. **Кафтан В.И.**, Докукин П.А. Геодезические спутниковые измерения, обработка и деформационный анализ. М.: РУДН. 2017. 272 с. <http://library.miit.ru/methodics/04022015/14-207.pdf>.
2. **Шестопалов И.П.** Нейтроны земного происхождения и глобальная тектоническая зона – "Локсодрома Волкова". Система "Планета Земля". 120 лет со дня рождения и 75 лет со дня гибели Юрия Васильевича Кондратюка (Александра Игнатьевича Шаргея) (1897–1942). Москва, 2017. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30722909>.
3. Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Kopelevich O.V., Kudryavtsev V.N., Lavrova O.Yu., **Lebedev S.A.** et al. Chapter 132: Ocean Remote Sensing in Russia. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2017. DOI:10.1016/B978-0-12-409548-9.10412-9.

Статьи в журналах и сборниках

1. **Алёшин И.М.**, Иванов С.Д., Корягин В.Н., Кузьмин Ю.О., Передерин Ф.В., Широков И.А., Фаттахов Е.А. Оперативная публикация данных наклономеров серии НШ на основе протокола SEEDLINK // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 31–41. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29677254>
2. Астапов И.И., Барбашина Н.С., **Богоутдинов Ш.Р.**, Борог В.В., Веселовский В.Г., **Гетманов В.Г.**, **Гвишиани А.Д.**, Дмитриева А.Н., Мишутина Ю.Н., Осетрова Н.В., Петрухин А.А., **Сидоров Р.В.**, **Соловьёв А.А.**, Шутенко В.В., Яшин И.И. Исследование анизотропии потока мюонов во время негеоэффективных корональных выбросов масс 2016 года // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. № 8. Принята к публикации.
3. **Гвишиани А.Д.**, **Агаян С.М.**, **Дзебоев Б.А.**, **Белов И.О.** Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 1 С. 86–92. (**Gvishiani A.D.**, **Agayan S.M.**, **Dzeboev B.A.**, **Belov I.O.** Recognition of strong earthquake-prone areas with a single learning class // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 474. № 1. P. 546–551.)
4. **Гвишиани А.Д.**, **Дзебоев Б.А.**, **Белов И.О.**, **Сергеева Н.А.**, **Вавилин Е.В.** Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье–Забайкалье // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 704–710. DOI:10.7868/S0869565217360178. (**Gvishiani A.D.**, **Dzeboev B.A.**, **Belov I.O.**, **Sergeyeva N.A.**, **Vavilin E.V.** Successive Recognition of Significant and Strong Earthquake-Prone Areas: The Baikal–Transbaikalia Region // Doklady Earth Sciences. 2017. Vol. 477. Part 2. P. 1488–1493. DOI:10.1134/S1028334X1712025X)
5. **Гетманов В.Г.**, Пущаенко В.Р. Цифровая обработка параллельных наблюдений от векторных и скалярных датчиков // Датчики и системы. 2017. № 2 (211). С. 28–34. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28839221>
6. **Гетманов В.Г.**, **Гвишиани А.Д.**, **Сидоров Р.В.**, **Соловьёв А.А.**, **Богоутдинов Ш.Р.**, Яшин И.И., Дмитриева А.Н., Ковыляева А.А., Астапов И.И. Фильтрация наблюдений угловых распределений мюонных потоков от годоскопа УРАГАН // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. № 8. Принята к публикации.

7. Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д., Сидоров Р.В., Соловьёв А.А., Богоутдинов Ш.Р., Яшин И.И., Дмитриева А.Н., Ковыляева А.А., Астапов И.И. Математическая модель наблюдений от мюонного годоскопа с учётом кинематики и геометрии корональных выбросов масс // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. № 8. Принята к публикации.
8. Горшков А.И., Соловьёв А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6, С. 21–27. (Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Zharkikh Yu.I. A Morphostructural Zoning of the Mountainous Crimea and the Possible Locations of Future Earthquakes // Journal of Volcanology and Seismology. 2017. Vol. 11. No. 6. pp. 407–412. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30672690> DOI:10.7868/S0203030617060025 DOI:10.1134/S0742046317060021)
9. Ишков В.Н. Солнце в августе–сентябре 2016 г. // Земля и Вселенная. 2017. № 1. С. 47–49.
10. Ишков В.Н. Солнце в апреле–мае 2017 г. // Земля и Вселенная. 2017. № 5. С. 44–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29958820>
11. Ишков В.Н. Солнце в декабре 2016 г.–январе 2017 г. // Земля и Вселенная. 2017. № 3 С. 88–90. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29256481>
12. Ишков В.Н. Солнце в июне–июле 2017г. // Земля и Вселенная. 2017. № 6. С. 16–19. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30513723>
13. Ишков В.Н. Солнце в октябре–ноябре 2016 г. // Земля и Вселенная. 2017. № 2. С. 29–31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29008972>
14. Ишков В.Н. Солнце в феврале–марте 2017 г. // Земля и Вселенная. 2017. № 4. С. 40–42. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30513723>
15. Ишков В.Н., Забаринская Л.П., Сергеева Н.А. Современное представление солнечных баз данных на примере каталога солнечных протонных событий 23 цикла СА // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 6. (Ishkov V.N., Zabarinskaya L.P., Sergeyeva N.A. Modern representation of databases on the example of the Catalog of Solar proton events 23 cycle of Solar activity // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. V. 57. No. 6. pp. 684–690. DOI:10.1134/S0016793217060044 <https://elibrary.ru/item.asp?id=30645883>)
16. Колесников И.Ю., Морозов В.Н., Татаринев В.Н., Татаринова Т.А. Напряженно-деформированное энергетическое районирование геологической среды для размещения экологических инфраструктурных объектов // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2017. № 2 (20). С. 77–88. https://elibrary.ru/download/elibrary_29991879_26661813.pdf
17. Коликов К.С., Татаринев В.Н. Геоинформационные технологии – инструмент повышения эффективности и безопасности горного производства // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 2. С. 1. DOI:10.2205/2017BS045
18. Липина А.В., Маневич А.И. Перспективные направления в проектировании сетей пунктов сбора информации при инженерно-геологических исследованиях намывных массивов, откосных сооружений и их оснований // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 1. С. 387–395. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28352152>
19. Лукьянова Р.Ю., Богоутдинов Ш.Р. Крупномасштабные неоднородности зимней полярной верхней ионосферы по данным спутников SWARM // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 6. С. 448–458. (Lukianova, R.Y., Bogoutdinov, S.R. Large-scale irregularities of the winter polar topside ionosphere according to data from Swarm satellites. Cosmic Research. 2017. 55(6). P. 436–445. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30685007> DOI:10.7868/S0023420617060073)
20. Лукьянова Р.Ю. Электрический потенциал в ионосфере земли: численная модель // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 5, С. 122–132 /переводная/ (Lukianova, R.Y. Electric potential in the earth's ionosphere: a numerical model // Mathematical Models and Computer Simulations. 2017. 9(6). pp. 708–715. DOI:10.1134/S2070048217060114)

21. **Маневич А.И.,** Макаров В.А., Пащенко П.Н. Перспективы математического моделирования как составной части геомеханического мониторинга на шахтах с целью повышения эффективности управления газовыделением // Горный информационно-аналитический бюллетень. Июнь 2017. № 6. С. 91–100. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29416331>
22. **Маневич А.И., Татаринев В.Н.** Применение искусственных нейронных сетей для прогноза современных движений земной коры // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. DOI:10.2205/2017BS045
23. Матросова А.Ю., Андреева В.В., Чернышов С.В., Рожкова С.В., **Кудин Д.В.** Обнаружение ложных путей в последовательностных схемах // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 10. С. 170–178.
24. **Морозов В.Н., Татаринев В.Н.** Системный подход при прогнозе геодинамической устойчивости массива при подземной изоляции радиоактивных отходов // Проблемы и решения в экологии горного дела. 2017. С. 29–36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29710345>
25. **Морозов В.Н., Маневич А.И.** Моделирование напряжённо-деформированного состояния эпицентральной зоны землетрясения (Кумамото, Япония) 16 апреля 2016 г. М 7,3 // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. № 6. С. 48–54.
26. **Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринев В.Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон коровых землетрясений // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2017. № 70. С. 84–91.
27. **Нечитайленко В.А.** Мультимедийные и интерактивные лекции в науке и образовании // Вестник ОНЗ РАН. 2017. Т. 9. DOI:10.2205/2017NZ000350
28. **Одинцова А.А., Рыбкина А.И., Гвишиани А.Д., Самохина О.О., Астапенкова А.А.** "Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и веб-сервис" // Геоинформатика. 2017. № 4. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30741594>
29. **Пятыгин В.А., Морозов В.Н., Татаринев В.Н.** Применение онтологии для оценки устойчивости участков земной коры в районах размещения объектов использования атомной энергии // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. DOI:10.2205/2017BS045
30. Рудаков В.П., Цыплаков В.В., Цыплаков А.В., **Шестопалов И.П.** О вариациях подпочвенного радона и нейтронных потоков в условиях московской синеклизы накануне землетрясения в Охотском море 24 мая 2013 года // Физика Земли. 2017. № 6. С. 60–64 (Rudakov V.P., Tsyplakov V.V., Tsyplakov A.V., **Shestopalov I.P.** On the subsoil radon and neutrino flux variations in the conditions of the Moscow syncline on the eve of the earthquake in the Sea of Okhotsk on May 24, 2013 // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. Vol. 53. No. 6, pp. 860–863. ИФ 0,387, ISI, SCOPUS <https://elibrary.ru/item.asp?id=30076888> DOI:10.1134/S1069351317060052)
31. **Соловьёв А.А., Лукьянова Р.Ю., Добровольский М.Н., Сидоров Р.В., Краснощёков Р.И., Кудин Д.В., Груднев А.А.** Сбор и систематизация информации для базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. BS5003. DOI:10.2205/2017BS044
32. Ческидов В.В., Куренков Д.С., **Маневич А.И.** Современные методы и средства оперативного контроля на горных предприятиях для обеспечения экологической и промышленной безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. Июнь 2017. 6. С. 188–199. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29416346>
33. Belakhovsky V.B., **Pilipenko V.A.,** Sakharov Ya.A., Samsonov S.N. Geomagnetic and ionosphere tec response to the abrupt increase of Solar wind density // Physics of Auroral Phenomena 2017. V. 40. № 1 (41). P. 100–103.

34. Belakhovsky V.B., **Pilipenko V.A.**, Sakharov Y.A., Lorentzen D.L., Samsonov S.N. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012 3. Space Science // Earth, Planets and Space. 2017. 69(1). Paper № 105. DOI:10.1186/s40623-017-0696-1
35. **Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Sergeyeva N.A., Rybkina A.I.** Formalized clustering and significant earthquake-prone areas in the Crimean Peninsula and Northwest Caucasus // Izvestiya – Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53, № 3. P. 353–365. (**Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Сергеева Н.А., Рыбкина А.И.** Формализованная кластеризация и зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений на Крымском полуострове и Северо-Западе Кавказа // Физика Земли. 2017. 3. С. 33–42. DOI:10.7868/S0002333717030036)
36. **Dzeboev B.A.** A new approach to monitoring seismic activity: California case study // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 473, № 1. P. 338–341. (**Дзебоев Б.А.** О новом подходе к мониторингу сейсмической активности (на примере Калифорнии) // Доклады Академии наук. Апрель 2017. 2. 473. С. 210–213. DOI:10.1134/S1028334X17030126)
37. Ivanov I.O., Borog V.V., Kryanev A.V., **Getmanov V.G., Sidorov R.V.**, Iop. Comparison of abilities of two trend definition techniques for experimental data time series processing. V International Conference on Problems of Mathematical and Theoretical Physics and Mathematical Modelling, 2017 // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 788. № 1. P. 012017. DOI:10.1088/1742-6596/788/1/012017
38. **Kaftan V.**, Melnikov, A. Local Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from GNSS Observation Data. World multidisciplinary Earth sciences symposium (WMESS 2017) // IOP Conference Series-Earth and Environmental Science. V. 95. Paper #. DOI:10.1088/1755-1315/95/3/032030
39. **Kaftan V.I., Sidorov V.A.**, Ustinov A.V. A comparative analysis of the accuracy attainable for the local monitoring of Earth's surface movements and deformation using the GPS and GLONASS navigation satellite systems // Journal of Volcanology and Seismology. 2017. 11 (3). pp. 217–224. (**Кафтан В.И., Сидоров В.А., Устинов А.В.** Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS И ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. 2017. 3. С. 50–58. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29389400> DOI:10.1134/S0742046317030034)
40. Kiseleva S.V., Korinevich L., **Lebedev S.A.** Assessment of the renewable energy potential in the Republic of Adygeya // Ecologica Montenegrina. 2017. V. 14. P. 143–151. <https://biotaxa.org/em/article/view/34078/30170>
41. **Kossobokov V.G.** Testing an Earthquake Prediction Algorithm: The 2016 New Zealand and Chile Earthquakes // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174, № 5. P. 1845–1854. DOI:10.1007/s00024-017-1543-9
42. **Kossobokov V.G.**, Nekrasova A.K. Characterizing Aftershock Sequences of the Recent Strong Earthquakes in Central Italy // Pure and Applied Geophysics. 2017. 174 (10), pp. 3713–3723. DOI:10.1007/s00024-017-1624-9
43. Kozyreva O.V., **Pilipenko V.A.**, Zakharov V.I., Engerbretson M.J., GPS-TEC response to the substorm onset // GPS Solutions. 2017. 21 (3). P. 927–936. DOI:10.1007/s10291-016-0581-6
44. **Lebedev S.A.**, Kostyanoi A.G., Bedanokov M.K., Akhsalba A.K., Berzegova R.B., Kravchenko P.N. Climate changes of the temperature of the surface and level of the Black Sea by the data of remote sensing at the coast of the Krasnodar Krai and the Republic of Abkhazia // Ecologica Montenegrina. 2017. V. 14. P. 14–20. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30370501>
45. **Lukianova R.Y.**, Uvarov V.M., Coisson P-D. High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions // Adv. Space Res. 2017. DOI:10.1016/j.asr.2016.10.010

46. **Lukianova R.**, Kozlovsky A., Lester M., Climatology and inter-annual variability of the polar mesospheric winds inferred from the meteor radar observations over Sodankylä (67N, 26E) during solar cycle 24 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2017. DOI:10.1016/j.jastp.2017.06.005
47. **Lukianova R.**, Holappa L., Mursula K. Centennial evolution of monthly solar wind speeds: Fastest monthly solar wind speeds from long-duration coronal holes // *Journal of Geophysical Research – Space Physics*. 2017. V. 122. № 3. P. 2740–2747. DOI:10.1002/2016JA023683
48. **Lushnikov A.A.**, Zagaynov V.A., **Lyubovtseva Yu.S.** Formation of aerosols in the lower troposphere // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2017. 17. ES4001. DOI:10.2205/2017ES000604
49. Lesur V., Heumez B., Telali A., Lalanne X., **Soloviev A.** Estimating error statistics for Chambon-la-Forêt observatory definitive data // *Annales Geophysicae*. 2017. 35(4). pp. 939–952. DOI:10.5194/angeo-35-939-2017
50. **Lushnikov A.A.** Exactly solvable model of polymerization // *Chemical Physics*. 2017. Online. 493. P. 133–139. DOI:10.1016/j.chemphys.2017.06.016
51. Mursula K., Holappa L., **Lukianova R.** Seasonal solar wind speeds for the last 100years: Unique coronal hole structures during the peak and demise of the Grand Modern Maximum // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. № 1. P. 30–36. DOI:10.1002/2016GL071573
52. Martines-Bedenko V.A., **Pilipenko V.A.**, Engebretson M.J., and Moldwin M.B. Time-spatial correspondence between Pi2 wave power and ultra-violet aurora bursts // *Russian Journal of Earth Sciences*. DOI:10.2205/2017ES000606
53. **Odintsova A.**, **Gvishiani A.**, **Rybkina A.** The world's largest oil and gas industrially explored deposits: Rosa database and GIS project // *Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН*. 2017. Т. 5. № 1. С. 69. DOI:10.2205/CODATA2017
54. **Pilipenko V.A.**, Kozyreva O.V., Engebretson M.J., **Soloviev A.A.** ULF Wave Power Index for Space Weather and Geophysical Applications // *VarSITI Newsletter*. 2017. Vol. 12. P. 4–6.
55. **Pilipenko V.A.**, Kozyreva O.V., Engebretson M.J., **Soloviev A.A.** ULF wave power index for space weather and geophysical applications: A review // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2017. V. 17. № 2. P. 1–13. DOI:10.2205/2017ES000597
56. Rodkin M.V., **Kaftan V.I.** Post-seismic relaxation from geodetic and seismic data // *Geodesy and Geodynamics*. 2017. 8(1). pp. 13–16. DOI:10.1016/j.geog.2017.01.001
57. Rostovtseva Y.V., **Rybkina A.I.** The Messinian event in the Paratethys: Astronomical tuning of the Black Sea Pontian // *Marine and Petroleum Geology*. 2017. Vol. 80. P. 321–332. DOI:10.1016/j.marpetgeo.2016.12.005
58. **Rybkina A.I.**, Rostovtseva Y.V. New evidence of the age of the Black Sea Pontian substage // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2017. V. 17. ES5004. DOI:10.2205/2017ES000613
59. **Sidorov R.**, **Soloviev A.**, **Krasnoperov R.**, Kudin D., **Grudnev A.**, Kopytenko Y., Kotikov A., Sergushin P. Saint Petersburg magnetic observatory: From Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 2017. 6(2). pp. 473–485. DOI:10.5194/gi-6-473-2017
60. **Soloviev A.A.**, Gorshkov A.I. Modeling the dynamics of the block structure and seismicity of the Caucasus // *Izvestiya – Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 3. P. 321–331. (**СОЛОВЬЕВ А.А.**, Горшков А.И. Моделирование динамики блоковой структуры и сейсмичности Кавказа // *Физика Земли*. 2017. № 3. С. 3–13. DOI:10.1134/S1069351317030120)
61. **Soloviev A.**, Chulliat A., **Bogoutdinov Sh.** Detection of secular acceleration pulses from magnetic observatory data // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2017. V. 270, pp. 128–142. DOI:10.1016/j.pepi.2017.07.005
62. **Tatarinov V.N.**, **Kaftan V.I.**, Seelev I.N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes // *Atomic Energy*. 2017. V. 121. Issue 3. P. 203–207. DOI:10.1007/s10512-017-0184-5

63. Zhrebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Medvedev A.V., Alsatkin S.S., Oinats A.V., **Lukianova R.Y.** Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*. 2017. 60(2), pp. 444–451. DOI:10.1016/j.asr.2016.12.008

Тезисы докладов и материалы конференций

1. **Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н.** Краткое введение в ДМА // Материалы школы молодых ученых "Современные проблемы геофизики и геоэкологии (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды)". Майкоп-2017. http://ebooks.wdcb.ru/2017/DMA/Agayan_DMA_17.pdf
2. **Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Рыбкина А.И.** Алгоритмическая система FCAZ в задаче распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в регионе Алтай–Саяны // VII Международный симпозиум "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов", к 80-летию со дня рождения выдающегося ученого, основателя и первого директора ИС РАН Юрия Андреевича Трапезникова (18.10.1936–13.04.1999). Бишкек: ИС РАН. 19–24 июня 2017 г. Устный. <http://goo.gl/JMRabi>
3. **Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Татаринов В.Н.** Алгоритмическая кластеризация в оценке сейсмической опасности при размещении объектов ядерного топливного цикла // Проблемы и решения в экологии горного дела. 2017. С. 42–48. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30356808>
4. **Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.** Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 30-летию ИПНГ РАН. Сер. "Труды ИПНГ РАН (Москва): серия "Конференции"". Институт проблем нефти и газа РАН; ООО "Аналитик"; научный редактор А.Н. Дмитриевский. 2017. С. 46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30314975>
5. **Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Лукьянова Р.Ю.** Аппаратно-программная система МАГНУС для мониторинга и детектирования экстремальных возмущений геомагнитного поля // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 6–9 июня 2017 г. Отв. ред.: В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. 6 июня 2017 г. Россия, Москва: ГЕОС. С. 24–25. <http://geospheres.ru/documents/074.pdf>
6. **Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Лукьянова Р.Ю.** Система мониторинга геомагнитной активности МАГНУС // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории северной Евразии. Материалы международной конференции. 2017. С. 24.
7. **Дзедобоев Б.А., Агаян С.М., Красноперов Р.И., Жарких Ю.И., Николов Б.П.** Распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на Камчатке на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений // VII Международный симпозиум "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов", к 80-летию со дня рождения выдающегося ученого, основателя и первого директора ИС РАН Юрия Андреевича Трапезникова (18.10.1936–13.04.1999). Тезисы докладов. 19–24 июня 2017 г., Бишкек: ИС РАН, 2017. С. 342–345. <http://goo.gl/JMRabi>
8. **Дзедобоев Б.А., Агаян С.М., Красноперов Р.И., Николов Б.П.** Мониторинг сейсмической активности на базе алгоритмов дискретного математического анализа // Школа молодых ученых "Методы комплексной оценки сейсмической опасности" (Fuzzy recognition based on

- Discrete Mathematical Analysis) 19–24 июня 2017 г. Тезисы докладов. Бишкек: НС РАН, 2017. С. 173–175. **S.M. Agayan, S.R. Bogoutdinov, R.I. Krasnoperov.** <http://goo.gl/JMRabi>
9. **Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А.** Тектоническая и магматическая эволюция Марианской островной дуги // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. – М.: ИО РАН. 2017. С. 121–125.
 10. **Красноперов Р.И.** Веб-ориентированная интеллектуальная ГИС для комплексного изучения геологогеофизических данных // Международное совещание "Состояние и перспективы развития государственного геологического картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа". 18–21 апреля 2017. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ. Тезисы конференции. http://www.vsegei.ru/ru/conf/summary/ggk17/20-04/20_04_2017_15.zip
 11. **Лебедев С.А.,** Костяной А.Г., Беданов М.К., Ахсалба А.К., Берзегова Р.Б. Климатические изменения температуры поверхности и уровня Черного моря по данным дистанционного зондирования у побережья Краснодарского края и республики Абхазия // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Куижева С.К., Овсянникова Т.А., Беданов М.К., Демина Т.М., Шевякова О.П. 2017. С. 35–41. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29664692>
 12. **Маневич А.И.** Применение искусственных нейронных сетей для прогноза современных движений земной коры в районах размещения экологически опасных объектов // 72-е Дни науки Горного института НИТУ "МИСиС". 4–6 апреля 2017 г. Москва, НИТУ "МИСиС". Устный доклад. <https://goo.gl/3d6xzf>
 13. **Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Нисилевич М.В.** Информационные базы геолого-геофизических данных и моделей глубинного строения активных и пассивных окраин Евразии // Материалы IV Международной научно-практической конференции "Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий". Май 2017. Майкоп, Россия. С. 117–125. <https://elibrary.ru/download/34562356.pdf>
 14. **Соловьев А.А.,** Смирнов А.Г. Распознавание пониженной магнитной активности в обсерваторских данных методами ДМА для уточнения моделей главного магнитного поля Земли // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 44-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. 2017. С. 335–339. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28891371>
 15. **Татаринов В.Н.** Системный подход к оценке геоэкологической безопасности объектов ядерного топливного цикла // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции, Майкоп, 15–18 мая 2017 г. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29360877>
 16. **Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Маневич А.И., Татарина Т.А.** Новые геодезические данные о цикличности геодинамических движений в зоне контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Куижева С.К., Овсянникова Т.А., Беданов М.К., Демина Т.М., Шевякова О.П. 2017. С. 182–189. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29710398>
 17. **Устинов А.В., Кафтан В.И.** Технология мониторинга перемещений гидротехнических сооружений в процессе компенсационного нагнетания // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Тезисы докладов. 2017. С. 251–252.
 18. **Учайкин Е.О., Кудин Д.В.,** Бородин П.Б., Гвоздарев А.Ю., Кудрявцев Н.Г. К вопросу о перспективах развития вариационных магнитометров на базе кварцевых датчиков // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных

информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Куижева С.К., Овсянникова Т.А., Беданков М.К., Демина Т.М., Шевакова О.П. 2017. С. 215–221. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29717458>

19. Astapov I., Osetrova N., Dmitrieva A., Kovylyayeva A., Yashin I., **Bogoutdinov S., Getmanov V., Sidorov R., Soloviev A.** Investigation of geoeffective cmes in 2014–2016 according to the data of muon hodoscope Uragan // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 78. DOI:10.2205/CODATA2017 DOI:10.2205/CODATA2024
20. Dmitrieva A., Astapov I., **Getmanov V., Gvishiani A.,** Kovylyayeva A., **Sidorov R.,** Smirnov A., Yashin I. Specific features of corrections for meteorological effects in matrix data of muon hodoscope uragan // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 74. DOI:10.2205/CODATA2017
21. **Dzeboev B., Agayan S., Belov I., Krasnoperov R., Vavilin E.** Algorithmic system fcaz and strong earthquake-prone areas in the Russian Far East // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 97. DOI:10.2205/CODATA2017
22. **Dzeboev B., Agayan S., Belov I., Krasnoperov R., Vavilin E.** Discrete mathematical analysis and its application for Monitoring of seismic activity // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 96. DOI:10.2205/CODATA2017
23. **Getmanov V.G., Gvishiani A.D., Sidorov R.V.** A technology for filtering geomagnetic field observations using local approximation models // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 87. DOI:10.2205/CODATA2017
24. **Gvishiani A., Agayan S., Dzeboev B., Belov I.** Algorithm barrier with single learning class for strong earthquake-prone areas recognition // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 95. DOI:10.2205/CODATA2017
25. **Gvishiani A., Dzeboev B., Sergeeva S., Belov I., Rybkina A., Samokhina O.** Background seismicity data processing aimed at strong earthquake-prone areas determination // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 94. DOI:10.2205/CODATA2017
26. **Ishkov V.N.** From understanding principles to space weather forecast: experience of 3 solar cycles // Book of Abstracts: 9 Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere". Sunny Beach, Bulgaria, May 30–June 3, 2017. 2017, May. Bulgaria, Sofia, Space Research and Technologies Institute, Sofia, Bulgarian Academia of Sciences. P. 10.
27. **Ishkov V.N., Zabarinskaya L.P., Sergeeva N.A.** The collection and compile data on SPE for the period 19th–23rd cycles of solar activity // Book of Abstracts: 9 Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere". June 2017. Sunny Beach, Bulgaria. P. 04. <http://ws-sozopol.stil.bas.bg/> <https://goo.gl/MeMMRv>
28. **Krasnoperov R., Soloviev A., Zharkikh J., Nikolov B., Agayan S., Grudnev A.** Integration of modern methods of intellectual data analysis in gis environment // Geoinformatics Research Papers Proceedings of the Geophysical Center RAS (Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 105. DOI:10.2205/CODATA2017)
29. **Lukianova R., Gvishiani A.** Geomagnetic survey for directional drilling of deep wells in the Arctic Region // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 12. DOI:10.2205/CODATA2017
30. **Odintsova A.A., Gvishiani A.D., Rybkina A.I.** The world's largest oil and gas industrially explored deposits: ROSA database and GIS project // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 69. DOI:10.2205/CODATA2017
31. **Rybkina A., Reissell A.** Arctic territory – data and modeling // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 1. DOI:10.2205/CODATA2017
32. **Sergeyeva N., Kedrov E., Zabarinskaya L., Nisilevich M., Agayan S.** Creation of a modern system of registration, publication and citation of geophysical data // Kedrov E. (Ed.) 2017. Book

- of Abstracts of the International Conference “Global Challenges and Data-Driven Science”. Geoinf. Res. Papers Ser., 5, BS1002. 107 of 172. DOI:10.2205/CODATA2017
33. **Sergeyeva Nataliya A. and Zabarinskaya Ludmila P.** Open Access to Geophysical Data. EGU General Assembly 2017 // Geophysical Research Abstracts. 04.2017. Vienna, Austria. Vol. 19, EGU2017-6734, 2017. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.6734S>
 34. **Soloviev A.** Progress in handling and analysis of ground-based geomagnetic data streams for advanced monitoring of the Earth's magnetic environment // VarSITI – Variability of the Sun and its Terrestrial Impact. Second VarSITI General Symposium. Abstracts. 2017. P. 130–131.
 35. **Soloviev A.** Recent achievements in geomagnetic data analysis for advanced monitoring of the Earth's magnetic field // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 30. DOI:10.2205/CODATA2017
 36. **Soloviev A., Nikolov B.** GIS-oriented database for seismic hazard assessment for seismically active regions of Russia // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 31. DOI:10.2205/CODATA2017
 37. **Soloviev A.A.** Modeling the block structure dynamics and seismicity in the Caucasian Region // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 46. DOI:10.2205/CODATA2017
 38. **Tatarinov V., Seelev I., Tatarinova T.** The results of GNSS observations in the area of the underground disposal of radioactive waste (Yenisei Ridge). 2017. IMCET 2017 // New Trends in Mining – Proceedings of 25th International Mining Congress of Turkey, pp. 534–541. DOI:10.1016/j.geog.2017.01.001
 39. **Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Tatarinova T.A.** Modern geodynamics of South Yenisei Ridge to results of the GPS/GLONASS observations. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium/ WMESS 2017. 11–15 September. Prague // IOP Earth & Environmental Sciences. DOI:10.1088/1755-1315/95/3/032024
 40. **Uchaikin E., Kudryavtsev N., Kudin D.** Data analysis, event recognition and applications // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2017. Т. 5. № 1. С. 169. DOI:10.2205/CODATA2017
 41. **Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Nisilevich M., Gumeniuk M., Krilova T.** Improvement of access to the geomagnetic measurement data // Kedrov E. (Ed.) 2017. Book of Abstracts of the International Conference “Global Challenges and Data-Driven Science”. Geoinf. Res. Papers Ser., 5, BS1002. 84 of 172. DOI:10.2205/CODATA2017
 42. **Zabarinskaya Ludmila P. and Sergeyeva Nataliya** Subduction processes related to the Sea of Okhotsk // EGU General Assembly 2017. Geophysical Research Abstracts. 04.2017. Vienna, Austria. Vol. 19. EGU2017-6812, 2017. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.6812Z>

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662818 "A-DPS (Adaptive Discrete Perfect Set)"
 Авторы: Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Дзедобоев Б.А.
 Заявка № 2017660009 от 05.10.2017г.
 Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2017г.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661961 "SARD (Seismic Activity monitoRing by Discrete mathematical analysis)"
 Авторы: Дзедобоев Б.А.
 Заявка № 2017660014 от 05.10.2017г.
 Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 октября 2017г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017660308 "Программа АПК "Магнус" для онлайн-доступа к магнитным данным спутников Swarm"
Авторы: Добровольский М.Н., Соловьев А.А.
Заявка № 2017617250 от 24.07.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20 сентября 2017г.
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620942 "База данных по крупнейшим месторождениям углеводородов "ROSA (РОСА)"
Авторы: Одинцова А.А., Рыбкина А.И., Самохина О.О., Астапенкова А.А.
Заявка № 2017620394 от 02.05.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 18 августа 2017 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017617080 "Программа прогноза современных деформаций земной коры с использованием нейросетевых методов"
Авторы: Маневич А.И., Татаринов В.Н., Пятгин В.А.
Заявка № 2017614048 от 02.05.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 29 июня 2017 г.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617020 "Toolbox "Кластерный анализ" для работы в среде ArcGIS"
Авторы: Соловьев А.А., Красноперов Р.И., Жарких Ю.И., Николов Б.И.
Заявка № 2017612569 от 29.03.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 июня 2017г.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017615543 "Программа визуализации обсерваторских данных на видео-стенде"
Авторы: Богоутдинов Ш.Р.
Заявка № 2017611407 от 20.02.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2017г.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017614261 "Программа для визуализации и сравнительного анализа исходных обсерваторских и спутниковых геомагнитных наблюдений и индикаторов геомагнитной активности из базы данных ГЦ РАН"
Авторы: Соловьев А.А., Кудин Д.В.
Заявка № 2017611210 от 14.02.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10 апреля 2017г.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017614016 "Linear Density Distribution"
Авторы: Смирнов А.Г., Булычев А.А.
Заявка № 2017611209 от 14.02.2017г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 апреля 2017г.

Публикация данных

1. **Pilipenko V.A., Kozyreva O., Engerbretson M.** (2017), ULF wave index database.ESDB repository, GC RAS, Moscow. Earth Science Database.