

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геофизический центр
Российской академии наук

О Т Ч Е Т

О ВЫПОЛНЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ
на 2016 год

Москва
2017

GEOPHYSICAL CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS
FOR 2016

Results of the State Task

Moscow
2017



The present edition contains information about the work of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS) in 2016. The full list of GC RAS employees' publications in 2016 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)

O. V. Alexanova

Approved for publishing on 11.09.2017

Layout Production:

O. V. Alexanova, E. O. Kedrov

Citation: *Soloviev, A. A., T. A. Tatarinova, Eds. (2017), Report of Geophysical Center of RAS for 2016: Results of the State Task, Geoinf. Res. Papers, BS1001, <https://doi.org/10.2205/2017BS042>*

<https://doi.org/10.2205/2017BS042>

<http://ebooks.wdcb.ru/2017/2017BS042/2017BS042.pdf>

ISSN: 2308-5983

© 2015 Geophysical Center RAS



В настоящем издании содержатся сведения о выполнении государственного задания на 2016 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.

О. В. Алексанова

Утверждено к печати 11.09.2017 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

О. В. Алексанова, Э. О. Кедров

Соловьев, А. А., Т. А. Татарина, Ред. (2017), Отчет о выполнении государственного задания на 2016 год. Исследования по геоинформатике, BS1001, <https://doi.org/10.2205/2017BS042>

<https://doi.org/10.2205/2017BS042>

<http://ebooks.wdcb.ru/2017/2017BS042/2017BS042.pdf>

ISSN 2308-5983

© ГЦ РАН, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2016 году.....	7
2. Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твердой Земли и солнечно-земной физике	13
3. Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов	27
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.....	44
6. Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию	50
7. Новые математические методы моделирования геофизических процессов	56
8. Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России.....	65
9. Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе.....	71
10. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем	76
11. Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий.....	82
12. Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли	87
13. Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений.....	94
14. Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных.....	101

15. Проект организации международной конференции «Системный анализ данных для изучения природных опасностей»	106
16. Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа	112
17. Интеллектуальный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных с использованием передовых технологий сферической визуализации	119
18. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений	127
19. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря по данным спутниковой альтиметрии	132
20. Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа.....	138
21. Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ–Крым и Алтай–Саяны–Прибайкалье	143
22. Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы	153
23. Международная деятельность ГЦ РАН.....	162
Список научных публикаций и свидетельств о регистрации результатов интеллектуальной деятельности за 2016 г.	164

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2016 году

Научная деятельность подразделений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) в 2016 году была сосредоточена на выполнении государственного задания ГЦ РАН №007-00119-16-02, утвержденного 11.11.2016 г., которое включало в себя работы по четырем темам НИР и восьми проектам Программ Президиума и ОНЗ РАН. Кроме этого выполнялись работы по пяти грантам РФФИ, по одному гранту Президента РФ, двум проектам РНФ и по одному проекту в рамках реализации Федеральной целевой программы.

Эти работы проводились по следующим приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ:

- 3. Информационно-телекоммуникационные системы;
- 6. Рациональное природопользование;
- 8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика.

Разделам перечня критических технологий РФ:

- 19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее 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 IV. «Информатика и информационные технологии»:
 - Подраздел 39. «Архитектура, системные решения, программное обеспечение, стандартизация и информационная безопасность информационно-вычислительных комплексов и сетей новых поколений, системное программирование».
- Раздел IX. «Науки о Земле»:
 - Подраздел 128. «Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы»;
 - 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 136. «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий»;
- 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:

1. Тема № 01201456271 «Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твердой Земли и солнечно-земной физике» (0145-2014-0001). Руководители – в.н.с., к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева; г.н.с., д.т.н. В. И. Кафтан; зав. лаб., к.ф.-м.н. Э. О. Кедров; зав. сектором, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина.
2. Тема № 01201456270 «Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов» (0145-2014-0002). Руководители – зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринов; г.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов.
3. Тема № 115021010261 «Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли» (0145-2014-0014). Руководитель – г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова.
4. Тема № 115012960029 «Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях» (0145-2014-0015). Руководитель – г.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников.

А также по проектам Программ Президиума и ОНЗ РАН:

1. Проект «Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России» 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. Ответственный исполнитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов.
2. Проект «Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий» программы ОНЗ РАН № III.8 «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов. Ответственный исполнитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов.
3. Проект «Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли»

программы ОНЗ РАН № III.8 «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов. Ответственный исполнитель: зам. директора по науке, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев.

4. Проект «Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений» программы ОНЗ РАН № III.8 «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель: г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов.
5. Проект «Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию» 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.
6. Проект «Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе» программы Президиума РАН I.32П «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани. Ответственный исполнитель: г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова.
7. Проект «Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием данных геомагнитного спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем» программы Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани. Ответственный исполнитель: г.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова.
8. Проект «Новые математические методы моделирования геофизических процессов» программы Президиума РАН I.33П «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани. Ответственный исполнитель: г.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников.

Перечень научных исследований за счет средств от приносящей доход деятельности в 2016 г. включал в себя:

1. Соглашение №14.607.21.0058 о предоставлении субсидии. Выполнение прикладных научных исследований по лоту шифр 2014-14-579-0057 по теме «Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных» (шифр заявки «2014-14-579-0057-8862») в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Заказчик: Министерство образования и науки Российской Федерации. Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.

2. Грант РФФИ №16-05-20339 Г Проект организации международной конференции «Системный анализ данных для изучения природных опасностей». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.
3. Грант РФФИ №15-05-07436 «Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.
4. Грант РФФИ №15-35-20983 «Интеллектуальный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных с использованием передовых технологий сферической визуализации». Руководитель: зам. директора по науке ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев.
5. 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: с.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев.
6. Грант РФФИ №16-35-50059 мол_нр «Исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря по данным спутниковой альтиметрии» Руководитель: в.н.с., д.ф.-м.н. С. А. Лебедев.
7. Грант Президента РФ МК-4555.2016.5 «Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа». Руководитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзебоев.
8. 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.
9. 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.

Важнейшими результатами научных исследований 2016 года, утвержденными на заседании Ученого совета ГЦ РАН №41 от 02.12.2016 г., стали следующие:

1.1. Включение обсерватории «Санкт-Петербург» в международную сеть геомагнитных наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ

Геомагнитная обсерватория «Санкт-Петербург» (международный IAGA-код SPG) официально включена в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ и стала десятой полномасштабной обсерваторией РФ, осуществляющей регистрацию геомагнитных данных в соответствии с высшим международным стандартом качества.

Функционирование и развитие обсерватории обеспечивается совместно ГЦ РАН и СПбФ ИЗМИРАН. Высокое качество результирующих данных обеспечивается за счет автоматизированной интеллектуальной системы оперативной обработки, разработанной в ГЦ РАН. Тем самым решен вопрос осуществления мониторинга геомагнитной обстановки в районе одного из крупнейших мегаполисов, что вносит вклад в укрепление национальной безопасности. Данные новой обсерватории продолжают старейшие ряды наблюдений магнитного поля, начатые в Санкт-Петербурге в 1834 году.



Рисунок 1.1 – Геомагнитная обсерватория «Санкт-Петербург» официально включена в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ

1.2. Создание аналитической системы для мониторинга магнитного поля Земли

В ГЦ РАН разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), обеспечивающий оперативный сбор, координированное хранение и оперативную интеллектуальную обработку наземных и спутниковых наблюдений магнитного поля Земли. Реализована автоматизированная система, включающая очистку обсерваторских данных от техногенных помех, подготовку данных стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, распознавание и многокритериальную классификацию экстремальных геомагнитных явлений, моделирование электромагнитных параметров и визуализацию результатов. В АПК используются современные математические методы и алгоритмы, включающие элементы искусственного интеллекта.

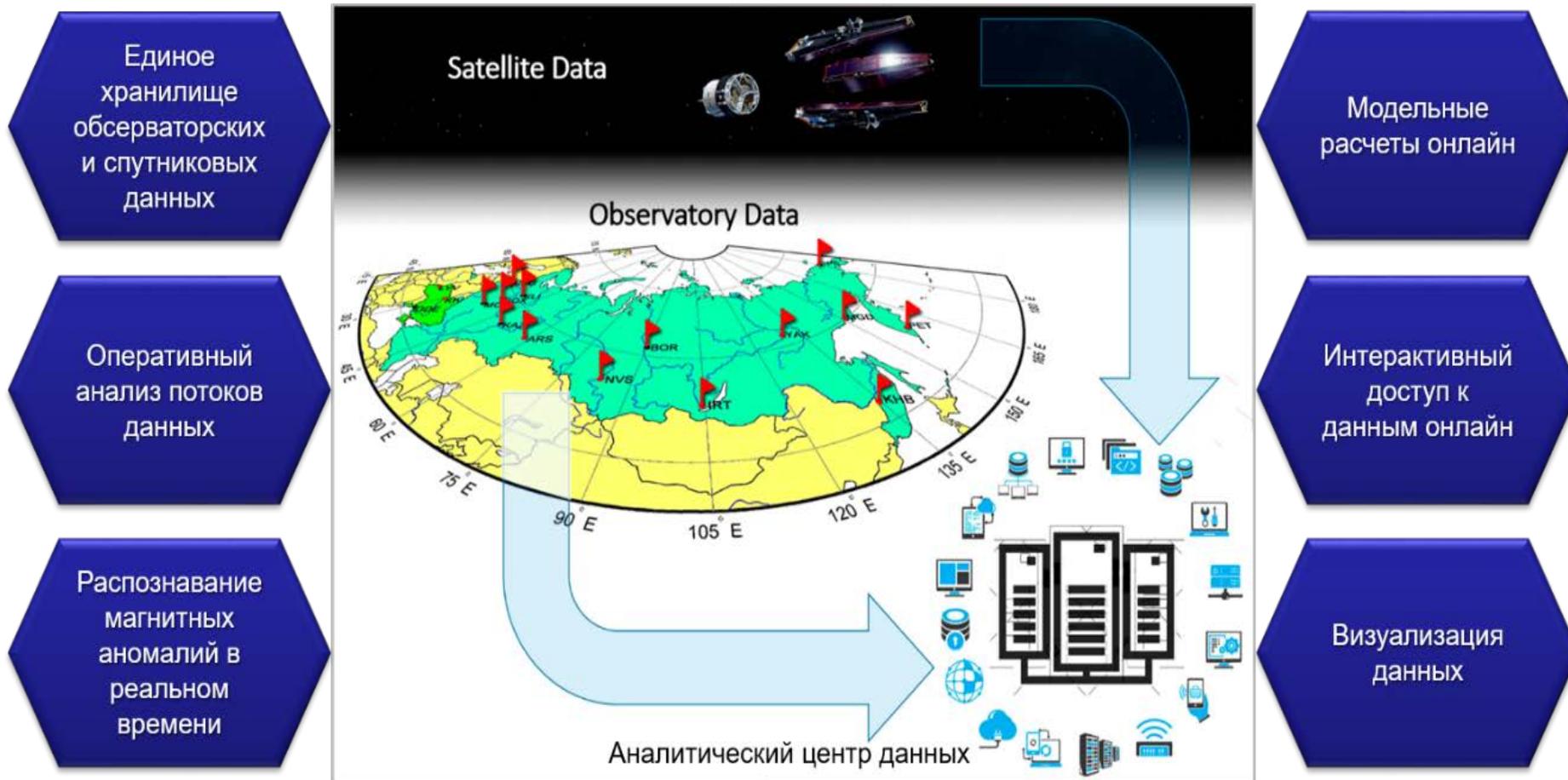


Рисунок 1.2 – Аналитическая система для мониторинга магнитного поля Земли

2. Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твердой Земли и солнечно-земной физике

Номер госрегистрации: 01201456271 (0145-2014-0001)

Руководители: в.н.с., к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева; г.н.с., д.т.н. В. И. Кафтан; зав. лаб., к.ф.-м.н. Э. О. Кедров; зав. сектором, к.г.-м.н. А. И. Рыбкина; в.н.с., д.ф.-м.н. С. А. Лебедев

2016 год является заключительным годом выполнения НИР, объектом исследований которой являются информационные ресурсы Мировых центров данных (МЦД) по физике твердой Земли (ФТЗ) и солнечно-земной физике (СЗФ), базы электронных публикаций и Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии Геофизического центра РАН. Цель работы – увеличение объема, повышение качества и интеграция данных и информации по наукам о Земле ГЦ РАН и включение их в Мировую систему данных Международного совета по науке. НИР направлена на разработку и использование новых информационных технологий, обеспечивающих свободный и удобный доступ к данным, базам данных и базам электронных публикаций, развитие технологий электронных публикаций, технологий сферической визуализации геопространственных данных, геоинформационных технологий, на совершенствование системы управления данными, расширение и повышение качества информационных ресурсов, находящихся в свободном доступе на сайтах ГЦ РАН и включенных в Мировую систему данных.

2.1. Новые информационные технологии доступа к данным, новый пользовательский интерфейс, расширение информационных ресурсов в свободном доступе. Совершенствование управления данными в МЦД по СЗФ и ФТЗ

В 2016 г. выполнена работа по использованию новых технологических решений для организации данных, баз данных и увеличения объемов доступных в сети Интернет качественных информационных ресурсов и обеспечения свободного и удобного доступа к данным. Перед Мировыми центрами данных на этом этапе стояла задача (кроме сбора) долговременного гарантированного хранения и распространения данных по всем дисциплинам, проведения пересмотра и реорганизации архивов данных по разделу «Солнечная активность и межпланетная среда».

Создана реляционная база данных «Геомагнетизм» с СУБД MySQL, работающая онлайн с данными среднечасовых значений элементов геомагнитного поля. Формирование БД позволяет модернизировать систему хранения больших объемов разных видов геомагнитных данных, модифицировать интерфейс доступа к данным. Пользователю предоставляется удобное и простое средство поиска данных по ряду

параметров и вывод данных в нужном ему формате. Разработана форма запроса к БД (рис. 2.1), позволяющая пользователю произвести выбор необходимых данных, используя либо картографический интерфейс – интерактивную карту, либо список кодов обсерваторий, либо ввод географических координат. Программа по обработке запроса написана на PHP и JavaScript, обрабатывает входные параметры и предоставляет результат выборки на экран монитора в одном из трех наиболее используемых выходных форматов: WDC, CSV или IAGA-2002. Пользователь имеет возможность сохранить полученный массив данных на свой компьютер. В БД хранится таблица, содержащая основную информацию об обсерваториях, которая предоставляется пользователю вместе с данными. Написаны программы для предбазовой подготовки данных.

В настоящее время БД работает в тестовом режиме и включает данные среднечасовых значений геомагнитного поля по 42 обсерваториям РФ и стран СНГ.

Рисунок 2.1 – Форма запроса к базе данных «Геомагнетизм»

При дальнейшем расширении база данных будет включать минутные значения компонент геомагнитного поля (41 обсерватория), среднегодовые значения компонент геомагнитного поля (55 обсерваторий) и значения *K*-индекса геомагнитной активности (34 обсерватории).

Продолжалось выполнение проекта по переводу данных обсерваторий РФ и стран СНГ, хранящихся в архивах МЦД по СЗФ в виде бумажных документов (таблиц, графиков, публикаций), в электронные документы (файлы в формате PDF). В 2016 г. переводились в электронный вид данные по дисциплине «Ионосферные явления». Переводу данных предшествует большая работа по подготовке архивного материала:

систематизация данных по времени, видам наблюдений и геофизическим параметрам. Все созданные документы формата PDF проходят два раза процедуры проверки и редактирования с использованием ПО ScanSoft PaperPort. Составляется каталог электронных документов и формируется база данных. В 2016 г. переведено в электронный вид ~ 50 000 документов – данные станций: Мурманск (1960–1986 гг.), Алма-Ата (1957–1989 гг.), Ашхабад (1957–1968 гг.), Москва (1959–1964 гг., только радиошумы), Горький (1957–1985 гг.). Часть данных, прошедшая окончательную проверку, опубликована на веб-сайте Центра http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/. Также отредактированы и размещены на веб-сайте таблицы среднечасовых значений геомагнитного поля 19 обсерваторий http://www.wdcb.ru/stp/data/magn_hour.val/, переведенные в электронный вид в 2015 г. в формате PDF и в кодах ASCII. Создание такого массива данных в электронном виде является хорошим вкладом в информационные ресурсы Мировой системы данных.

В 2016 г. проведена работа по подготовке новых данных к публикации на веб-сайтах МЦД. Все новые информационные ресурсы в электронной форме, поступившие в МЦД, регистрируются в регистрационной системе МЦД – базе данных (СУБД Access). Специально разработанное ПО обеспечивает проверку качества новых наборов цифровых данных. Создаются метаданные, описания и сопроводительные документы для каждого набора данных. Проводится резервное копирование данных. После выполнения этих процедур наборы данных публикуются на веб-сайте или размещаются в архиве.

Дополнены вновь поступившими в 2016 г. данными массивы среднечасовых и минутных значений геомагнитного поля ряда обсерваторий. Получены, переведены в электронный вид и опубликованы значения *K*-индекса геомагнитной активности за длинные периоды 1993–1999 гг. и 2006–2016 гг. обсерватории Воейково СПбФ ИЗМИРАН. Цифровые изображения магнитограмм обсерваторий Арти (1972, 1973, 1975–1978 гг.), Ашхабад (1957–1962 гг.), Иркутск (1957–1978 гг.), Борок (1957–1972 гг.), Владивосток (1957–1972 гг.), переданные в МЦД по СЗФ из Геологической службы США, проверены, систематизированы и опубликованы (http://www.wdcb.ru/stp/magnetogr_list.ru.html). Коллекция данных о магнитных бурях дополнена тремя новыми каталогами, переведенными в электронный вид (формат PDF). Проведена полная проверка и актуализация базы данных вариационных измерений минутных значений компонент геомагнитного поля на 22 высокоширотных обсерваториях совместно с авторами БД [1].

Представлены на сайте результаты вертикального зондирования ионосферы на станциях РФ и стран СНГ за период 1957–1990 гг., преобразованные в отдельные файлы за год для каждого параметра ионосферы в формате WDC. Дополнены ионосферные данные станции «Москва» за период 11.2015–10.2016 гг.

Раздел «Сейсмология» дополнен поступившими из Геофизической службы РАН Сейсмологическим каталогом и бюллетенем за период 11.2014–11.2015 гг. Дополнен данными за этот период каталог землетрясений, доступный пользователям через интерактивную форму запроса на веб-сайте МЦД по ФТЗ. Дополнены каталоги землетрясений данными за 2009 г. регионов Крым и Карпаты, данными за 2007–2009 гг. регионов Азербайджан, Армения и Северный Кавказ. Также продлены на 2008–2009 гг. каталоги регионов Алтай и Саяны, Прибайкалье и Забайкалье.

Проведена реконструкция раздела веб-сайта «Солнечная активность и межпланетная среда» (http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.ru.html). Для каждого вида наблюдений за Солнцем создана отдельная интернет-страница (рис. 2.2). Проанализированы и дополнены данные по каждому виду наблюдений, подготовлены новые описания данных и форматов, созданы метаданные для включения данных в Портал Мировой системы данных.



Рисунок 2.2 – Одна из интернет-страниц раздела веб-сайта «Солнечная активность»

Проведена большая работа по подготовке к публикации на веб-сайте Каталога солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности 1996–2008 гг. [2], содержащего данные о 142 солнечных протонных событиях. Для обеспечения удобной работы с каталогом такого большого объема (в каталоге 745 страниц) реализован современный подход к организации и оформлению информации. Использовано ПО Adobe Acrobat Professional для создания системы списков и перекрестных ссылок, обеспечивающей возможность переходов между отдельными частями Каталога и быстрый поиск нужных событий и их характеристик.

Для работы с геолого-геофизическими данными, имеющими географическую привязку, наиболее эффективным является применение современных географических информационных систем (ГИС). Наиболее удобным вариантом представления геопространственных данных является их публикация в формате картографических веб-сервисов. Это позволяет, используя современные веб-технологии, обращаться непосредственно к тематическим слоям данных без необходимости установки специализированного программного обеспечения.

Выполнены работы по расширению функциональных возможностей геопортала ГИС (gis.gcras.ru). Расширена база геопространственных данных Интеллектуальной ГИС

«Данные наук о Земле по территории России» и картографические веб-сервисы. Сервис «Геология» обновлен данными о мощности осадочного чехла. В сервис «Геофизика» добавлены данные по эпицентрам землетрясений для шести сейсмических регионов.

2.2. Развитие технологий электронных публикаций как составной части интеграции данных и информации по наукам о Земле

Развитие технологий электронных публикаций значительно увеличивает возможности представления результатов научных исследований, обогатив их возможностью включения, наряду с традиционным текстом и графикой, различных мультимедийных приложений и включений, динамического и интерактивного контента, средств визуализации данных и процессов и, наконец, естественную интеграцию в сетевые информационно-поисковые системы и базы знаний.

В рамках выполнения заданий НИР получили дальнейшее развитие методы и инструменты отображения и публикации динамического и интерактивного научного контента. Разработано ПО для трансляции статей для электронных изданий с одновременной автоматической генерацией XML метаописаний для включения в фонды Национальной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и регистрации в системе CrossRef. Разработан специальный программный пакет ELXPAPER (ELectronic eXtended paper style) [3, 4], обеспечивающий как подготовку статей, так и генерацию версий статей в современных форматах – для электронных книг, смартфонов, iPad, iPhone, мобильных устройств. В 2016 г. разработана новая версия 1.5 этого ПО пакет «TEX2XHTML», зарегистрированный в Роспатенте, для конверсии LaTeX к HTML5 и EPUB3 с добавлением новых классов обрабатываемых объектов (индексов и плавающих объектов). Программа конверсии «TEX2XHTML» разработана для журналов и книг, публикуемых ГЦ РАН, и может быть легко адаптирована к другим форматам издания. Пакет находится в свободном доступе по адресу: http://eos.wdcb.ru/tools/elxpaper_1.5.zip.

Разработанная технология успешно используется в практике редакционной подготовки изданий Геофизического центра РАН [5], в первую очередь Russian Journal of Earth Sciences (RJES). Каждая из опубликованных в RJES статей, начиная с июня 2012 г., представлена в четырех форматах: (i) основная версия (version of record) в формате PDF; (ii) версия в формате HTML5; (iii) версия в формате EPUB3; а также (iv) версия в формате PDF, адаптированная для малых экранов (е-ридеров и смартфонов).

На протяжении всего периода проводились редакционно-техническая подготовка и издание двух онлайн-журналов – Russian Journal of Earth Sciences (<http://rjes.wdcb.ru/>), Вестник ОНЗ РАН (<http://onznews.wdcb.ru/>) и сериального электронного издания Geoinformatics Research Papers (<http://ebooks.wdcb.ru/>, Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН). В 2016 г. опубликовано 5 выпусков журнала «Russian Journal of Earth Sciences», 3 статьи и 209 кратких сообщений в «Вестнике ОНЗ РАН», 11 отчетов и книг в «Geoinformatics Research Papers».

Наряду с развитием технологий электронных публикаций развиваются технологии документирования мультимедийных научных лекций в удобном для пользователей

формате, сопровождаемом дружелюбным интерфейсом. Разработана и успешно использовалась технология подготовки интерактивных лекций в формате Adobe Flash, которая позволяла, наряду со статическими слайдами, включать в лекцию такие объекты, как анимации, включая интерактивные; средства масштабирования слайдов и их фрагментов; указатели разного рода, позволяющие акцентировать внимание пользователя на тех или иных элементах; динамические переходы между слайдами; динамические текстовые пояснения и комментарии; динамические средства выделения отдельных объектов на слайде или видео; гипертекстовые ссылки; переходы по оглавлению и др.

В 2016 г. для подготовки интерактивных лекций пришлось перейти от технологии Flash к формату HTML5, в связи с тем, что технология Adobe Flash перестала поддерживаться передовыми производителями смартфонов и планшетов. Осуществлена актуализация ранее разработанных программ управления интерактивными лекциями и программ подготовки интерактивных лекций в формате HTML5 с добавлением новых классов мультимедийных объектов, включаемых в лекцию – управляемых JavaScript анимаций, анимаций на базе canvas, фрагментов видео, интерактивных карт типа Google Maps и т.п. Немаловажным является также то, что для создания HTML5 лекции не требуется коммерческое матобеспечение, для просмотра и работы с такой лекцией пригоден любой современный браузер из большой пятерки (Internet Explorer, Firefox, Opera, Chrome, Safari).

В 2016 г. была опубликована в Вестнике ОНЗ РАН и зарегистрирована в CrossRef (DOI: 10.2205/2016ISR011) интерактивная лекция В.О. Михайлова и др. «Изучение косейсмических и постсейсмических процессов на основе анализа данных спутников ГРЕЙС» <http://onznews.wdcb.ru/scipresonline/onpres1601/> (рис. 2.3).

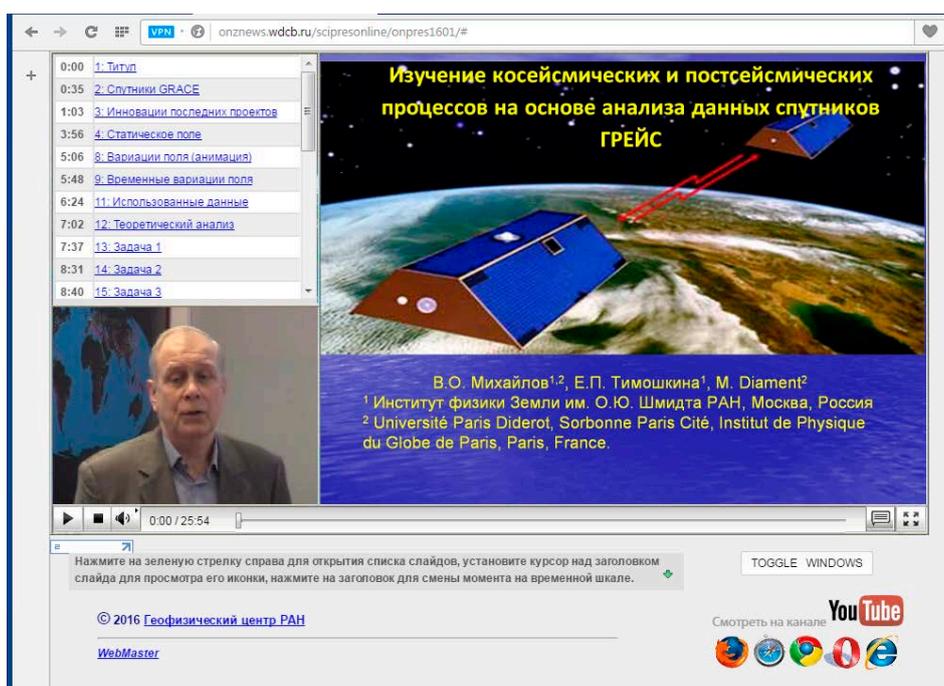


Рисунок 2.3 – Интерактивная лекция «Изучение косейсмических и постсейсмических процессов на основе анализа данных спутников ГРЕЙС»

Продолжалось выполнение проекта «База данных по наукам о Земле» по созданию 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. Идет процесс формирования «Базы данных по наукам о Земле» – ESDB (Earth Science DataBase) и создание ПО для регистрации баз и наборов данных. В 2016 г. зарегистрированы в системе CrossRef с идентификатором DOI три базы данных (база данных из 6 каталогов солнечных протонных событий за 1970–2008 гг., база цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984–2000 гг., база геомагнитных данных обсерватории Санкт-Петербург) и 25 наборов данных. Созданы страницы отклика (response pages) для каждой базы данных и каждого каталога, размещенные в центральном репозитории ESDB <http://esdb.wdcb.ru/> (рис. 2.4)

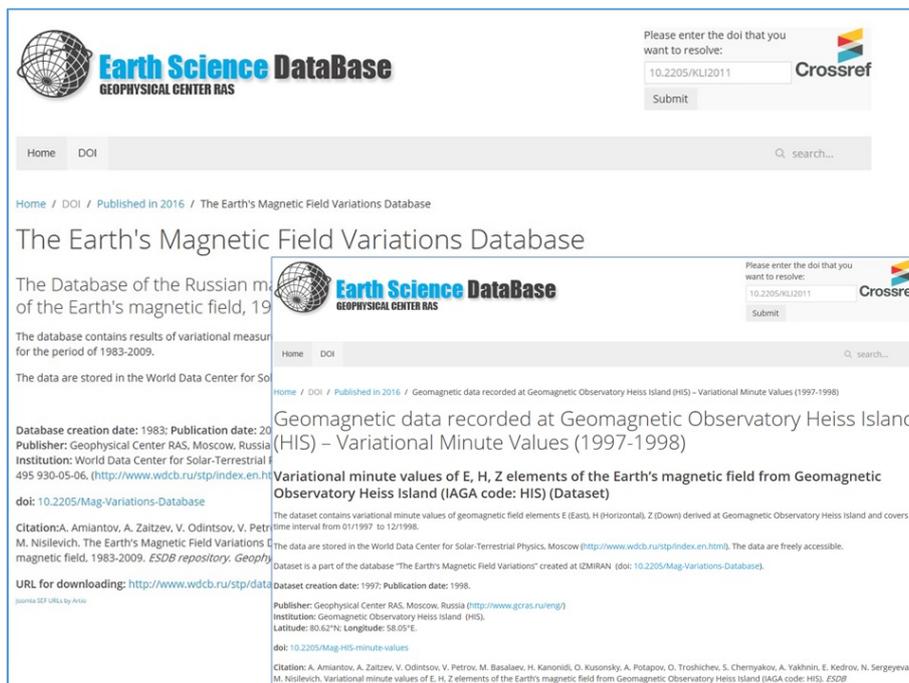


Рисунок 2.4 – Страницы отклика для базы данных и одного из набора данных

Страницы отклика содержат подробное описание данных, адрес URL нахождения данных, образец цитирования данных. Начата разработка и создание интерактивной формы заполнения XML-файла для регистрации данных в системе CrossRef с идентификатором DOI.

Три научных издания, выпускаемые Геофизическим центром РАН, и проект, направленный на развитие цитирования данных, дают возможность отечественным ученым публиковать не только статьи, но и данные, на основе которых были проведены исследования. Развитие культуры цитирования геофизических и других данных в России позволит повысить значимость данных, получаемых из российских источников, в работе отечественных и зарубежных ученых.

2.3. Создание веб-версии программного обеспечения «Орбус» на базе JavaScript для эффективной организации доступа к базе данных сферической визуализации онлайн

В 2016 г. на базе ПО «Орбус» [6] разработан веб-сервис, не требующий от конечных пользователей установки дополнительного геоинформационного программного обеспечения. Все цифровые слои пространственной базы данных «Орбус» (набор карт) хранятся централизованно на ГИС-сервере ГЦ РАН с обеспечением доступа в многопользовательском режиме. В качестве основы веб-интерфейса Орбуса использовалась библиотека Cesium (Цезиум). Cesium написана на языке программирования JavaScript с открытым исходным кодом для создания объемных изображений земной поверхности и карт, в виде свободно распространяемого установочного пакета, в который входят документация, необходимые программные зависимости, примеры приложений. Также в веб-версии была реализована возможность просмотра не только статических данных, но и динамически изменяющихся во времени. Это значительно повышает эффективность визуального анализа картографического материала. В частности, многовековое изменение магнитного поля Земли прослеживается в динамике значительно проще. Кроме того, в веб-приложение возможно подгружать данные из интернет-источников, например, OpenStreetMap, OpenWeatherMap, из ArcGIS и др. Эта функция значительно увеличивает круг потенциальных пользователей и расширяет список задач, для решения которых данный веб-интерфейс может быть использован. На рис. 2.5 представлена визуализация через Cesium спутниковых данных Европейского космического агентства, миссии SWARM, предназначенной для изучения магнитного поля Земли.

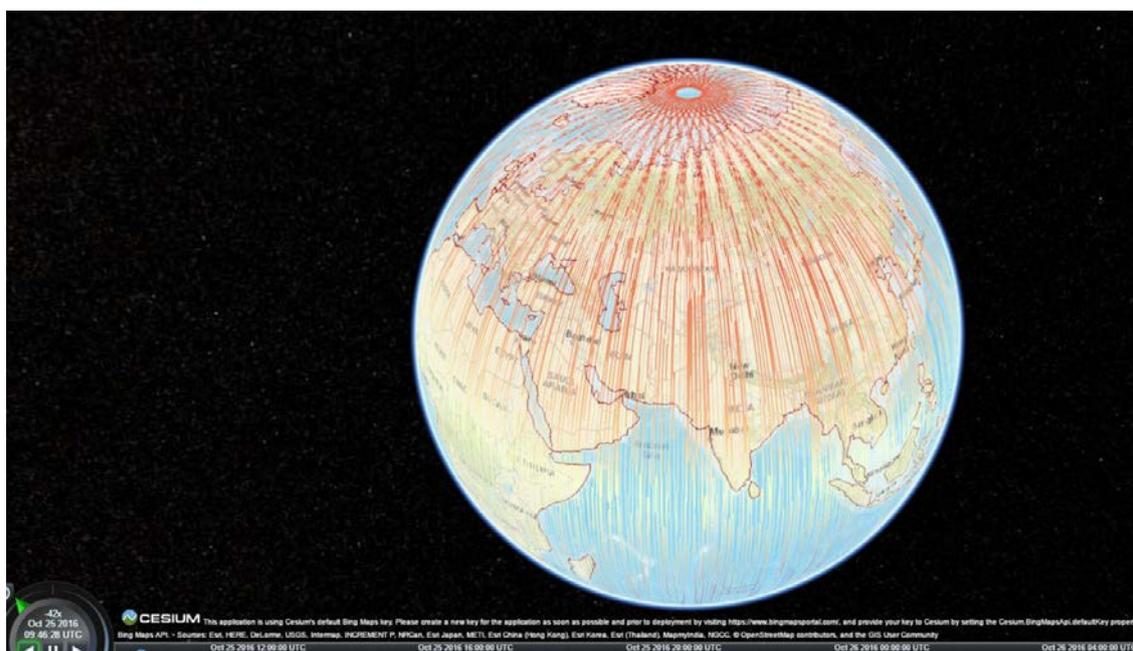


Рисунок 2.5 – Визуализация спутниковых данных миссии SWARM

2.4. Построение геодинамических моделей глубинного строения пассивных континентальных окраин России вдоль Северного Ледовитого океана

На протяжении большого промежутка времени (с 1998 по 2015 гг.) в ГЦ РАН велась работа по изучению глубинного строения активных и пассивных континентальных окраин России. Сформирована масштабная база геолого-геофизических данных для регионов исследования. В 2016 г. подведен итог этой многолетней работы. Обновлено все веб-сайты, созданные по этой теме, и дополнены базы данных. По результатам изучения пассивных окраин созданы интернет-ресурсы http://www.wdcb.ru/sep/passive_margins/Kara_Sea/title.html «Пассивные континентальные окраины Арктического океана» и «Глубинное строение Южно-Карской осадочной впадины», завершающие работу по этой тематике. Все ресурсы открыты для использования в сети Интернет.

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

Продолжено изучение связи сейсмичности и вулканизма Земли с солнечной активностью, сделан вывод о том, что в системе Солнце–Земля существует общий вековой цикл, имеющий свои особенности как на Солнце, так и на Земле. Изучался процесс генерации нейтронов в связи с эндогенной активностью Земли. Выявлены районы наиболее крупных возрастаний потока нейтронов по данным мировой сети нейтронных мониторов. Показано, что линия, соединяющая эти районы, протягивается вдоль оси глобальной тектонической зоны (рис. 2.6).

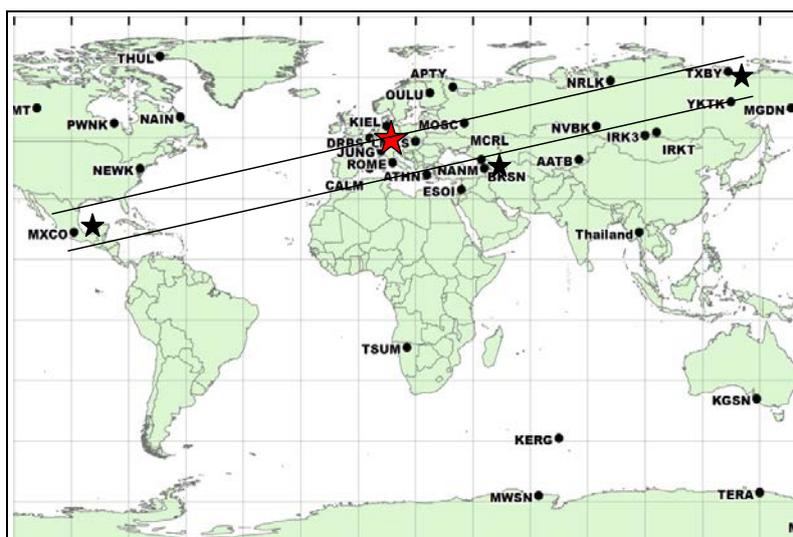


Рисунок 2.6 – На поверхности Земли выделены районы, в которых наблюдались повышенные потоки частиц, зарегистрированные нейтронными мониторами

2.6. Установление связей между деформациями земной поверхности и сейсмической активностью

Исследование предвестников сильных землетрясений при помощи ГНСС-технологий в настоящий момент является одной из перспективных задач современной геодезии.

Для проведения исследований, направленных на выявление предвестников землетрясений, был выбран фрагмент сети постоянно действующих ГНСС-пунктов «California Real Time Network» (CRTN) [7] и наблюдения в ней с 2006 по 2016 гг. На территории данной сети и вблизи нее за указанный период произошло несколько десятков подземных толчков магнитудой более 5, наиболее мощным из которых стало землетрясение El Mayor Cucarahn Earthquake, $M=7,2$, произошедшее 4 апреля 2010 г., унесшее жизни четырех человек и нанесшее ущерб порядка 1,1 млрд долларов США [8].

Данные наблюдений на всех пунктах исследуемой сети выбирались из открытого интернет-архива геодезических спутниковых наблюдений центра Scripps Orbit and Permanent Array Centre (SOPAC) [7], входящего в состав Международной ГНСС службы (International GNSS Service – IGS).

Определение векторов смещений и деформаций земной поверхности выполнялось с использованием программного пакета Defo, реализующего уравнивание разностей повторных измерений в системе координат, свободной от ошибок исходных данных. Такие координаты часто именуется внутренними. Получены векторы смещений по отношению к начальной эпохе измерений под условием минимума суммы квадратов искомым смещений. Уравнивание выполнялось в трехмерной пространственной системе координат X , Y и Z , с последующим преобразованием в топоцентрические координаты E , N и U . Впоследствии по значениям горизонтальных смещений, как элементов тензора деформаций, вычислялись характеристики максимальных растяжений/сжатий, дилатации (площадного растяжения/сжатия), вращения и их средних квадратических ошибок. Результаты представлены в специальном файле xls-формата и переданы в Мировой центр данных по физике твердой Земли ГЦ РАН для открытого пользования.

В процессе подготовки данных ГНСС к определению смещений и деформаций земной поверхности в связи с сильным землетрясением разработана и реализована технологическая последовательность, позволившая получить точные значения компонент векторов базовых линий сети, сформированной в соответствии с триангуляцией Делоне.

Значения компонент векторов базовых линий, их средние квадратические ошибки и элементы соответствующих ковариационных матриц сформированы в специальные файлы, являющиеся входной информацией для последующего уравнивания и определения векторов смещений и деформаций земной поверхности.

Дальнейшая обработка обеспечила получение графических схем пространственного распределения смещений и деформаций, а также построения соответствующих кинематических моделей изменений земной поверхности в связи с сильным землетрясением [8, 9].

2.7. Методика обработки данных спутниковой альтиметрии для исследования уровня режима Белого, Баренцева и Карского морей

Сегодня освоение Арктики требует новых подходов, обеспечивающих рациональное недропользование и охрану природы на основе современной науки и технологий, прежде всего использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Спутниковая альтиметрия в настоящее время является единственным методом ДЗЗ, который позволяет исследовать уровень режим как Мирового океана, так и морей арктического шельфа Российской Федерации (в первую очередь Белого, Баренцева и Карского морей). Эти моря характеризуются сложными гидрологическими, гидродинамическими, приливыми, ледовыми и метеорологическими режимами, что обуславливает особенности обработки данных спутниковой альтиметрии для этого региона.

Для анализа гидрологического режима Белого, Баренцева и Карского морей наиболее оптимальными являются данные спутников ERS-1/2, EnviSat и SARAL/AltiKa с периодом повторения изомаршрутного цикла 35 дней (апрель 1992 – декабрь 1993, апрель 1995 – апрель 2012, февраль 2013 – настоящее время), а для части Белого моря (бассейн, Онежский и Двинский заливы) помимо вышеуказанных данных – данные спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 с периодом повторения изомаршрутного цикла 9,9 суток (сентябрь 1992 – настоящее время).

Обработка данных спутниковой альтиметрии проводилась с применением программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) – с учетом всех необходимых поправок: поправки на влияние атмосферы (поправки на влажность и «сухая» поправка) и ионосферы, а также геофизические поправки (приливы, нагрузка на дно моря, поправка обратного барометра) [10].

Объединение данных спутников ERS-1/2 и EnviSat, а также TOPEX/Poseidon и Jason-1/2 в единый ряд альтиметрических измерений требует проведения анализа данных за временной интервал работы спутников в режиме тандема. Такой режим работы предполагал, что спутники имеют одинаковые параметры орбиты, треки спутников совпадают, а разница по времени в пролете одного спутника за другим минимальна. Для спутников ERS-1 и ERS-2 эта разница составляет 35 мин, а для спутников ERS-2 и EnviSat – 30 мин. Для спутников TOPEX/Poseidon и спутников Jason-1 и Jason-2 разница во времени при работе в режиме тандема составляет 70 с.

Для акваторий Белого, Баренцева и Карского морей анализ показал, что измерения высот морской поверхности, проводимые альтиметром спутника ERS-2, превышают измерения спутника ERS-1 в среднем на $1,37 \pm 0,94$ см. По пространству максимальные положительные и отрицательные величины систематической ошибки наблюдаются на акватории Белого моря. Систематическая ошибка между измерениями EnviSat и ERS-2 составляет $1,78 \pm 0,65$ см (рис. 2.7). Систематическая ошибка между альтиметрическими измерениями высоты морской поверхности спутниками TOPEX/Poseidon и Jason-1 для акватории Белого моря составила в среднем $2,61 \pm 0,27$ см, а измерения высоты морской поверхности, проводимые альтиметром спутника Jason-1, превышают измерения спутника Jason-2 в среднем на $-1,83 \pm 0,34$ см (рис. 2.8).

Учет систематической ошибки при обработке данных спутниковой альтиметрии позволяет повысить точность этих данных при их объединении в единый временной ряд.

Использование региональной приливной модели при обработке данных спутниковой альтиметрии позволит с большой точностью обрабатывать данные ДЗЗ для решения широкого круга задач.

Верификация данных спутниковой альтиметрии проводилась путем сравнения данных измерений уровня на уровнях постах с данными альтиметрических измерений в точках, расположенных на ближайших треках, или в точках пересечения восходящих и нисходящих треков [11].

Разработанная методика обработки данных спутниковой альтиметрии для акваторий Белого, Баренцева и Карского морей позволит с достаточной точностью исследовать пространственно-временную изменчивость уровня этих морей, а также уточнить региональные и глобальные модели приливов для данного региона.

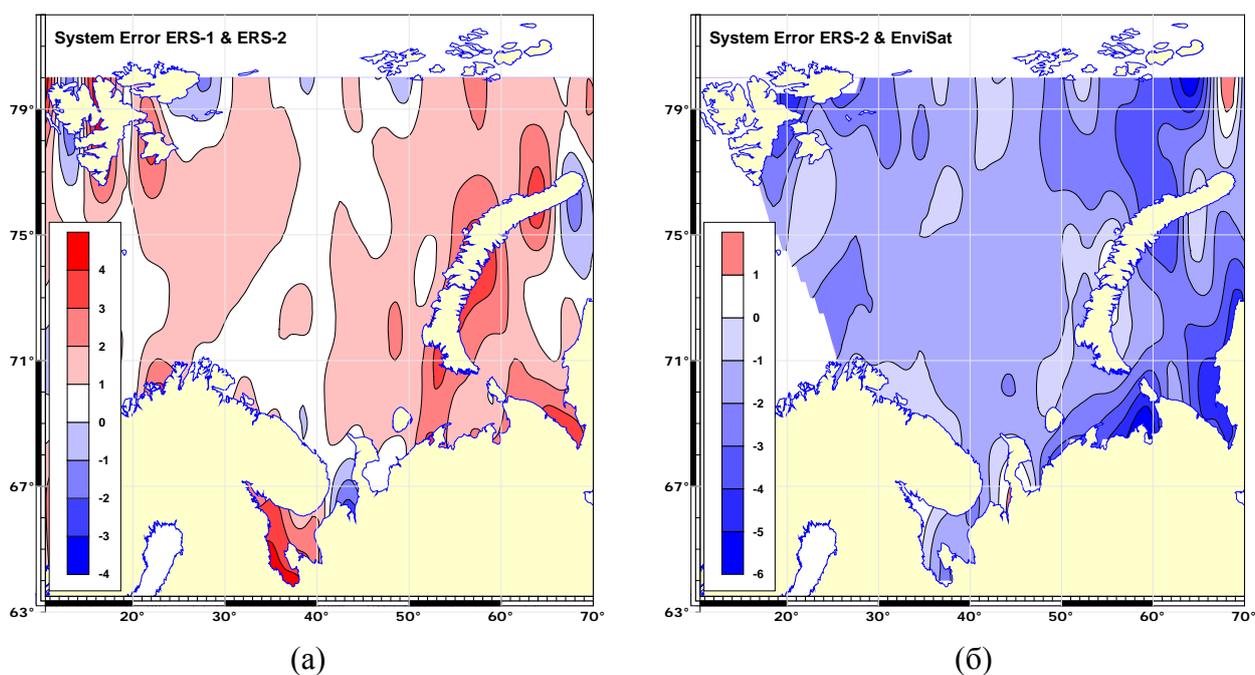


Рисунок 2.7 – Величина систематической ошибки между измерениями высот морской поверхности альтиметрами спутников: а – ERS-1 и ERS-2; б – ERS-2 и EnviSat

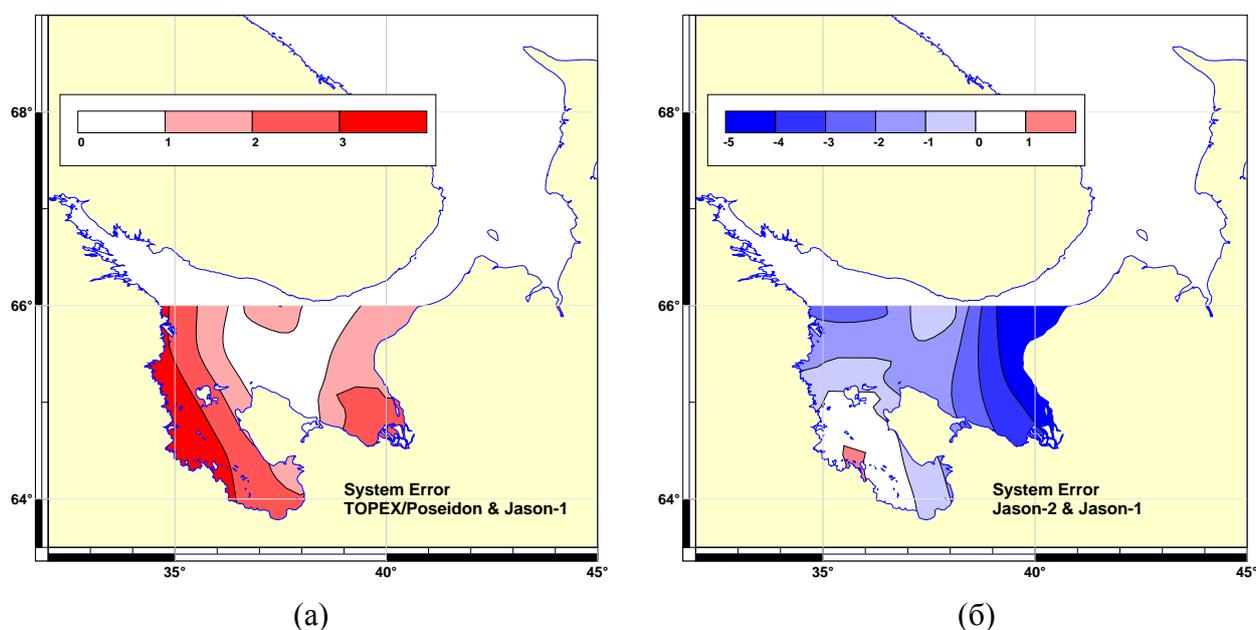


Рисунок 2.8 – Величина систематической ошибки между измерениями высот морской поверхности альтиметрами спутников: а – TOPEX/Poseidon и Jason-1; б – Jason-2 и Jason-1

2.8. Выполнение функций Национального геофизического комитета РАН

Национальный геофизический комитет РАН (НГК РАН) осуществлял представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе и его восьми ассоциациях. В 2016 г. Комитет участвовал в организации Международной конференции «Системный анализ данных для изучения природных опасностей» (18–20.07.2016 г., Роза Хутор, Россия). Представители НГК РАН приняли участие в работе семинара, посвященного цитированию научных данных, и рабочего совещания, посвященного развитию российской сети магнитных обсерваторий

Проведены заседания секций Национального геофизического комитета РАН, на которых заслушивались научные доклады, подводились итоги работы секций, рассматривались основные научные результаты. Вся текущая информация о деятельности НГК РАН публикуется на сайте <http://ngc.gcras.ru/>.

По результатам НИР за весь период 2014–2016 гг. опубликовано 33 статьи в ведущих международных и отечественных журналах, 22 статьи в сборниках, а также 47 тезисов в материалах конференций. Получено 3 свидетельства государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

В 2016 г. опубликовано 11 статей в ведущих международных и отечественных журналах, 7 статей в сборниках и 12 тезисов в материалах конференций. Получено одно свидетельство о регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

План этапа 2016 г. и план научно-исследовательской работы в целом выполнены полностью.

Список использованных источников¹

1. Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. Вариации магнитного поля Земли. База цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984-2000 гг. на CD-ROM. М.: РФФИ, ИЗМИРАН. 2001. 52 С.
2. Логачев Ю.И., Г.А. Базилевская, Э.В., **В.Н. Ишков** и др. Каталог солнечных протонных событий 23-его цикла солнечной активности (1996-2008 гг.) / Ред. Ю.И. Логачев. М.: НИИЯФ МГУ, ФИАН, ПГИ КНЦ РАН, ИЗМИРАН, ГЦ РАН, ИПГ, СПб ГУ, 2016. 743 С. DOI: 10.2205/ESDB-SAD-P-001-RU
URL: http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/Catalog_SPE_23_cycle_SA.ru.pdf.
3. **Nechitailenko V.A.** Record of science technologies. I. Online journal // Geoinf. Res. Papers Ser. 2015. V. 3. BS1001. DOI: 10.2205/2015BS016.
4. **Нечитайленко В.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ELXPAPER» № 2015615570 от 25.05.2015.
5. **Астапенкова А.А., Кедров Э.О., Нечитайленко В.А.** Документирование научного контента: современные концепции и решения // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Научное издание международного уровня – 2015: Современные тенденции в мировой практике редактирования, издания и оценки научных публикаций». СПб.: РАНХиГС, 2015. С. 18-26. URL: <http://conf.neicon.ru/materials/15-Domestic0515/Materials-0515.pdf>
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации данных для сферических экранов Орбус («ORBUS»). № 2014618293 от 14.08.14.
7. Scripps Orbit and Permanent Array Center. [Электронный ресурс]
URL: <http://sopac.ucsd.edu/>
8. **Kaftan V.,** Melnikov A. Deformation precursors of strong earthquakes derived from GNSS observation // Proceedings: 1st Students Conference «Students for Agriculture», January 29, 2016, Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. 2016. P. 62-69. DOI: 10.13140/RG.2.1.4117.6729
9. **Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Юровский П.П.** Графическое представление результатов определения движений и деформаций земной поверхности средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 2–7.
10. **Лебедев С.А.,** Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. 366 с.
11. **Lebedev S.A.,** Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Medvedev D.P., Sheremet N.A., Shauro S.N. Satellite altimetry applications in the Barents and White Seas // Coastal Altimetry. Eds. S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 389-416. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_15.

¹ Здесь и далее выделены фамилии сотрудников ГЦ РАН.

3. Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов

Номер госрегистрации: 01201456270 (0145-2014-0002)

Руководители: зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринов; г.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов

Удаление высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) из среды обитания человека при существующем научно-техническом уровне может быть реализовано единственным осуществимым способом – захоронением в глубокие геологические формации. Обоснование пригодности геологической среды для захоронения РАО – важнейшая проблема, стоящая как перед Россией, так и перед другими развитыми странами, использующими ядерные технологии. Для длительных сроков эксплуатации пунктов глубинного захоронения РАО, определяемых периодом их радиобиологической опасности – 10^4 – 10^5 лет, ошибки в оценке геодинамического режима среды существенно возрастают. Данные о геологической среде как системе, находящейся в поле действия других природных и техногенных систем, где все параметры взаимосвязаны и влияют друг на друга, характеризуются неопределенностью. Так, например, прогноз землетрясений, выполняемый при выборе мест размещения АЭС с вероятностью непревышения установленной балльности, рассчитывается только на период 10 тыс. лет (карта ОСР-97D), и нельзя напрямую распространить этот опыт на объекты, имеющие время жизни сотни тысяч лет. Для преодоления этой неопределенности конструктивным является использование системного подхода, позволяющего в условиях информационной неопределенности принимать долгосрочные прогнозы, используя фундаментальные геологические закономерности как единственные критерии и гарантии достоверности. В этой связи в 2016 г. новым направлением стала разработка методологии использования сейсмологических данных в зонах активного орогенеза для прогнозирования пространственно-временных особенностей развития тектонического процесса при обосновании безопасности захоронения РАО. Ее основой являются следующие тезисы:

1. Напряженно-деформированное состояние (НДС) верхней части земной коры определяется внешним полем тектонических напряжений.
2. На локальном уровне, в районах активного орогенеза, разломная тектоника и блоковое строение геологической среды формируют градиентные поля напряжений.
3. Эти поля вызывают непрерывный процесс структурной эволюции геологической среды, включая происходящие в ней сеймотектонические процессы, крайним проявлением которых являются крупные землетрясения.
4. Интенсивности напряжений в зонах концентрации напряжений, как показатель *энергонасыщенности геологической среды*, под действием тектонических напряжений, являются определяющим фактором прогноза стабильности массива в теоретических предпосылках распознавания процесса тектонической деструкции.

Проверка этих положений проводилась путем моделирования НДС эпицентральных зон сильных тектонических землетрясений в различных сейсмоактивных районах. Ниже приведен пример моделирования НДС в эпицентральной зоне землетрясения в Индии 26.01.2001, $M=6,9$. Показано, что области высокой интенсивности напряжений ответственны за зарождение очага землетрясения и последующего разрыва (нового тектонического разлома) и могут служить критерием в прогнозных оценках тектонической деструкции породных массивов во внешнем поле тектонических напряжений.

Структурно-тектоническая модель НДС состояния района землетрясения (рис. 3.1) основана на схеме разломной тектоники, в которую входит район *Bhuj*, расположенный на северо-западе Индии, являющийся областью высокой сейсмической активности. Протяженные разломы, такие как *Nagar Parkar Fault (NPF)* на севере района и *Kutch Mainland Fault (KMF)* на юге, имеют субширотное простирание, включая и менее протяженные разломы (*North Wagad Fault (NWF)*, *South Wagad Fault (SWF)* и др.). По данным геофизических исследований поверхность кристаллического фундамента залегает на глубине от 2–5 км при глубине границы Мохо до 43 км. Анализ механизмов очагов сильных землетрясений и результатов GPS-наблюдения в этом районе указывает на доминирующее направление осей максимальных сжимающих напряжений с севера на юг.

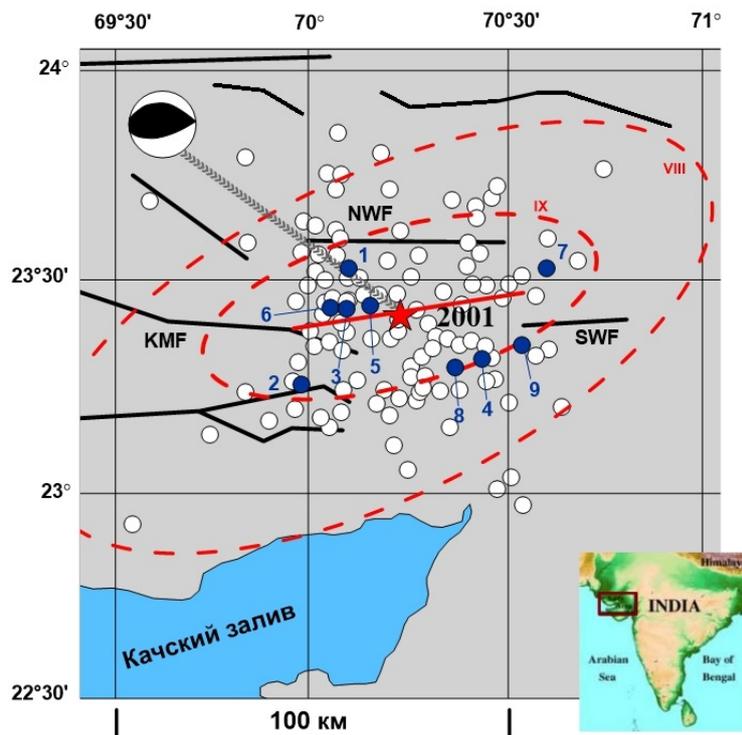


Рисунок 3.1 – Схема разломной тектоники эпицентральной зоны землетрясения 26.01.2001 (основные тектонические разломы – черные линии; эпицентр – красная звезда; кружки – эпицентры афтершоков, черные с $M > 5$; красные пунктирные линии – изосейсты; красная линия – положение предполагаемого разлома после землетрясения 21 января 2001 г.)

Большинство афтершоков (более 80%) за период с 26.01.2001 по 03.02.2001 зарегистрировано в интервале глубин от 5 до 28 км. Величина сброшенных напряжений в афтершоках (*stress drop*), вне зависимости от глубины гипоцентров, находится в интервале до 10–12 МПа, достигая 26,7 МПа. Механизм очагов афтершоков, зарегистрированных восточнее эпицентра главного толчка, соответствует левостороннему сдвигу, а западнее – правостороннему сдвигу. Все сильные землетрясения зарегистрированы в интервалах глубин от 3 до 10 км, за исключением первого афтершока.

На первом этапе было смоделировано НДС фрагмента геологической среды площадью приблизительно $150 \times 150 \text{ км}^2$ (рис. 3.2) в виде однородного упруго-изотропного слоя, нарушенного системой тектонических разломов (соответствующих слою кристаллического фундамента). Падение разломов принимается вертикальным при их мощности вне зависимости от длины и реальной мощности приразломных зон тектонической деструкции, равной 0,8 км (при наличии достоверных данных поправка может быть внесена в расчетную схему). Геологическая среда слоя однородна и упруго-изотропна с модулем упругости $E = 8 \times 10^3 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,25$. Принято, что диспергированная среда в зоне тектонических разломов модели имеет модуль упругости на два порядка ниже.

Механизм очагов сильных землетрясений и приведенные значения максимальных снятых напряжений в афтершоках землетрясения 21.01.2001 г., достигающих 26,7 МПа, дают некоторые основания для выбора напряжений σ_{yy} порядка 30 МПа с осью вдоль меридиана. Действующее напряжение σ_{xx} принято в предположении наличия бокового отпора, равного:

$$\frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{33} = -10 \text{ МПа} = \sigma_{11},$$

где коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$.

На рис. 3.2 показана карта интенсивности напряжений до землетрясения, т.е. до образования протяженного разлома, существенно изменяющего поле первоначальных тектонических напряжений. На общем фоне $\sigma_1 = 25 \div 30 \text{ МПа}$ выделяются вытянутые зоны повышенных значений σ_1 в окончаниях разломов KMF, NWF и SWF. В этих зонах интенсивность напряжений достигает 65 МПа и выше. Можно предположить, что зоны высокой концентрации σ_1 являются зонами зарождения нового разлома, не исключая возможность старта нового разрыва в области максимального градиента σ_1 . На рис. 3.3 приведена карта напряжений сдвига (τ_{xy}). На следующем этапе рассчитано НДС эпицентральной зоны с учетом нового разлома (красная линия), образовавшегося при землетрясении. Положение и длина сейсмогенерирующего разлома определены по методике Н.В. Шебалина, протяженность разлома $\sim 60 \text{ км}$ (использована IX большая изосейста), простирание 85° . Падение разлома принято вертикальным. На рис. 3.4 и 3.5 приведены карты σ_1 и τ_{xy} уже после образования сейсмогенерирующего разлома.

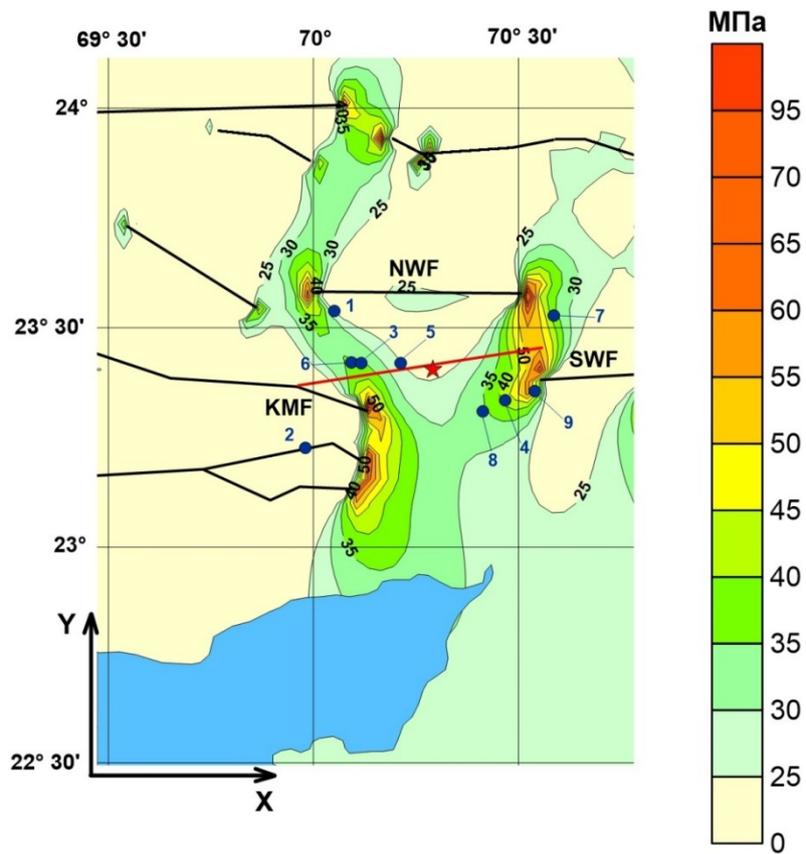


Рисунок 3.2 – Карта интенсивности напряжений σ_i до образования главного разлома (синие кружки – афтершоки с $M \geq 5$)

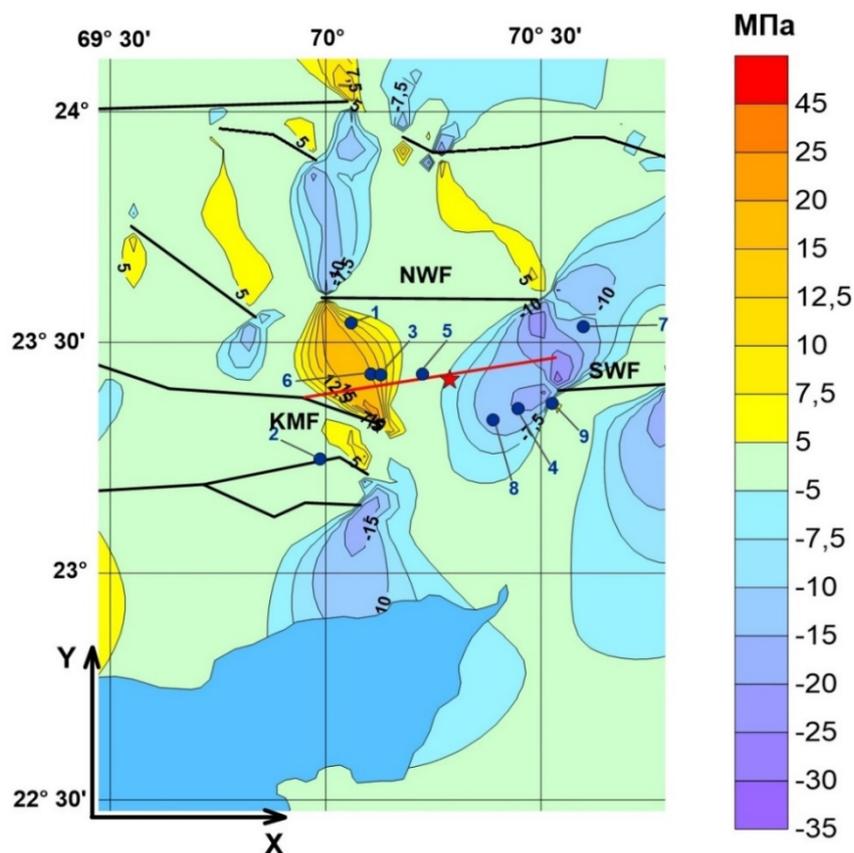


Рисунок 3.3 – Карта напряжений сдвига τ_{xy} до образования главного разлома

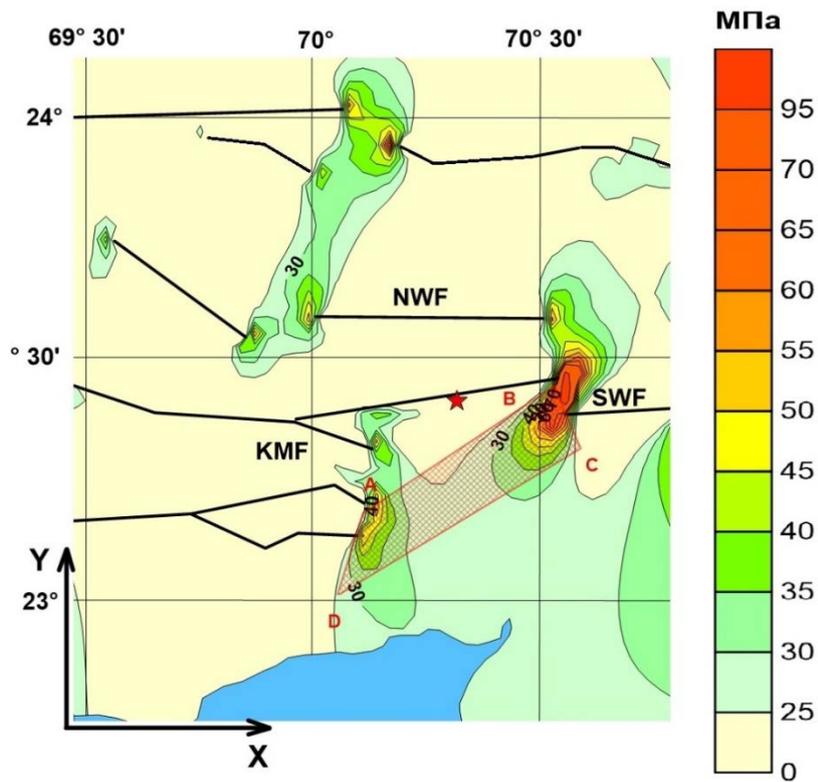


Рисунок 3.4 – Карта интенсивности напряжений после образования разлома (зона ABCD – зона возможного нового сильного землетрясения)

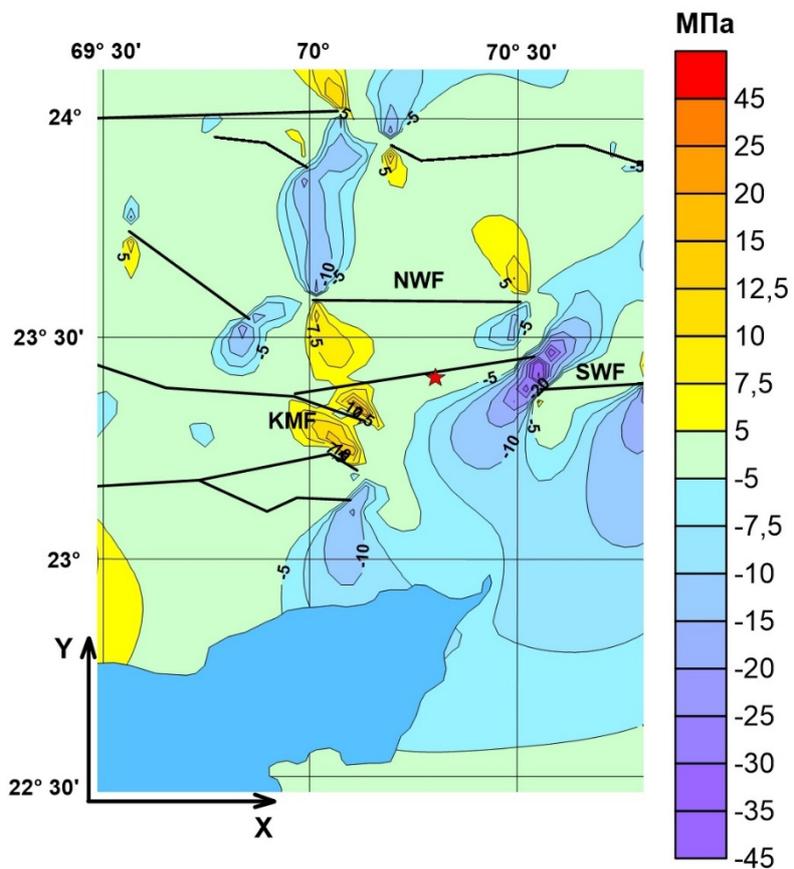


Рисунок 3.5 – Карта напряжений сдвига после образования разлома

После образования разлома НДС эпицентральной зоны существенно изменяется. На рис. 3.6 приведена карта разности интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i$. Максимальные значения сброшенных значений σ_i достигают 20 МПа. Две области локализации афтершоков, зарегистрированные в первую неделю после главного толчка (1428 афтершоков) на западе и востоке от эпицентра землетрясения, расположены в зонах максимальной сброшенной интенсивности напряжений в диапазоне от 10 до 20 МПа. Диапазон сброшенной интенсивности напряжений 0–5 МПа занимает существенно большую площадь. Вместе с тем имеется область прироста интенсивности напряжений на западе и востоке от эпицентра землетрясения.

При объеме сейсмогенерирующего слоя

$$\Delta V = S_o \times \Delta h \approx 6 \times 10^4 \text{ (км}^3\text{)},$$

где S_o – площадь сброшенной интенсивности напряжений, Δh – мощность сейсмогенерирующего слоя = 25 км.

Величина энергии сброшенных статических напряжений составляет:

$$\Delta U \approx 2 \times 10^{17} \text{ (Дж)}$$

при принятой средней величине $\overline{\Delta\sigma_i} = 10$ МПа.

Эта величина существенно выше энергии сейсмических волн, определенной по формуле:

$$M = \frac{2}{3} \times [\lg(E_s) - 4,8],$$

где M – магнитуа землетрясения, E_s – выделившаяся сейсмическая энергия. Принимая для данного землетрясения $M = 6,9$, получим значение: $E_s = 10^{15}$ (Дж).

Сброшенная энергия рассчитанных статических напряжений:

$$\Delta U = E_c + E_d + E_a,$$

где E_c – выделившаяся энергия сейсмических волн, E_d – энергия, затраченная на образование поверхности разлома и диспергацию геоматериала внутри разломной зоны, включая тепловые потери; E_a – остаточная энергия, реализуемая в процессе афтершоковой активности.

При этом следует подчеркнуть, что E_c включает в себя сброшенную потенциальную энергию упругих деформаций в объеме (как минимум) афтершокового процесса во время землетрясения, т.е. во время образования протяженного разлома. Принимая во внимание реальную нелинейность упругих свойств геологической среды, следует допустить, что афтершоковая активность эпицентральной зоны связана с релаксацией напряжений, сформировавшихся до момента главного толчка, и с последующим становлением нового поля тектонических напряжений после, так и вкладом диспергации среды в процесс афтершоковой активности.

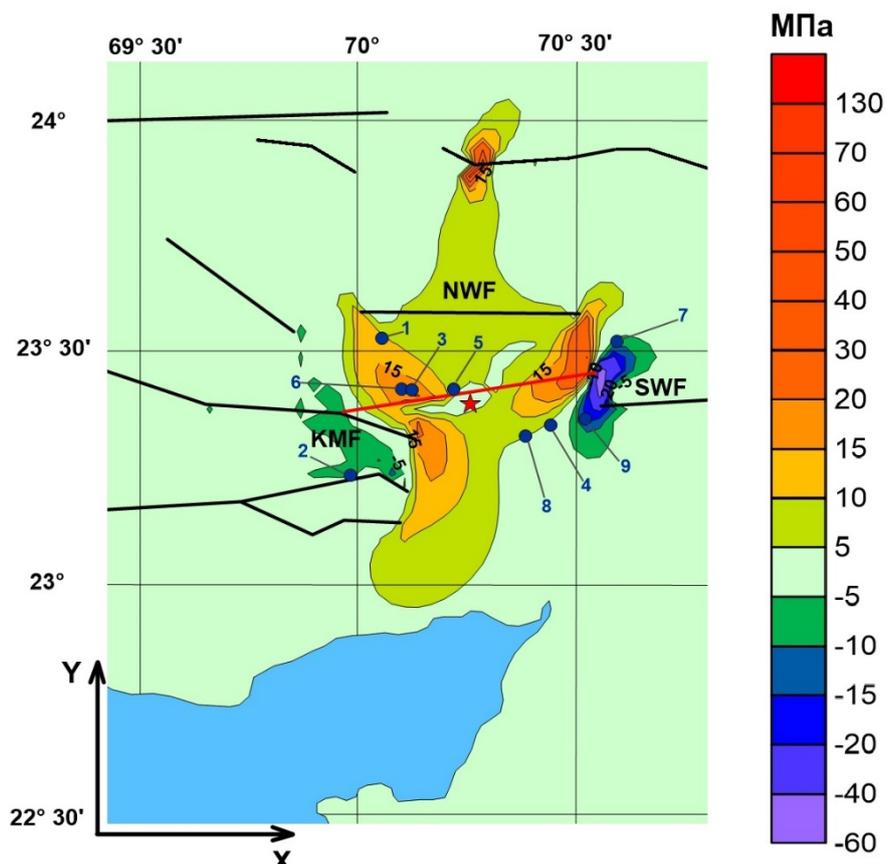


Рисунок 3.6 – Разность интенсивности напряжений до и после образования разлома

Величины максимальных сброшенных напряжений после формирования основного разрыва составляют:

$$\langle \Delta\sigma_{yy} \rangle_{\max} = 30 \text{ МПа}$$

$$\langle \Delta\sigma_{xx} \rangle_{\max} = 16 \text{ МПа}$$

$$\langle \Delta\tau_{xy} \rangle_{\max} = 12 \text{ МПа}$$

Полученный результат сопоставим, в какой-то степени, с расчетами сброшенных напряжений в очагах афтершоков по спектральным характеристикам сейсмических волн. Максимально сброшенные напряжения там достигают 27 МПа.

В локальных зонах напряжения после основного толчка возрастают: $\Delta\sigma_{yy} = 10$ МПа, $\Delta\sigma_{xx} = 20$ МПа, $\Delta\tau_{xy} = 12 - 14$ МПа. Процесс перераспределения напряжений после образования разрыва не является мгновенным, его активная стадия соответствует времени активации афтершоков и, по крайней мере, продолжается в течение афтершоковой активности. Реальная нелинейность упругих свойств блоковой среды допускает возможность криппа, а растянутого во времени компенсационного процесса НДС эпицентральной зоны. Важно подчеркнуть, что мгновенный сброс напряжений во время образования протяженного разрыва способствует развитию

деструкции предварительно напряженных зон, где уровень концентрации напряжений близок к критическому.

Сильные землетрясения с $M \geq 5$, зарегистрированные в течение первых четырех часов после главного толчка, ассоциируются с зонами сброшенной интенсивности напряжений и максимальными касательными напряжениями, рассчитанными в модели НДС эпицентральной зоны до землетрясения. Можно предположить, что сброшенные напряжения шарового тензора способствуют реализации накопленных напряжений до основного толчка. Последующая афтершоковая активность эпицентральной зоны, зарегистрированная в течение недели после основного толчка, соответствует зонам сброшенной интенсивности напряжений и максимальным зонам напряжений сдвига восточнее и западнее эпицентра землетрясения.

Предельная энергоемкость элемента объема геологической среды при фоновой интенсивности напряжений ~ 25 МПа составляет: $E_{ys} \approx 3,2 \times 10^4$ эрг. Следовательно, при значениях выше этой величины следует ожидать развития деструкции геологической среды и, соответственно, изменения НДС состояния исследуемой площади. Полученные результаты дают некоторое основание предположить, что новое НДС эпицентральной зоны землетрясения 26.01.2001 $M = 6,9$ (после образования протяженного тектонического разлома) включает опасные зоны, которые формируются в процессе длительной подкачки энергии региональным полем тектонических напряжений. Логично предположить, что область будущего тектонического события сместилась на юг – зона ABCD, т.е. снятые напряжения в результате образования разлома 26.01.2001 должны быть скомпенсированы внешнем полем тектонических напряжений до некоторого предельного критического уровня.

Полученные результаты дают надежду на то, что метод моделирования НДС геологической среды, нарушенной системой тектонических разломов, может быть полезен в проблеме оценки сейсмической опасности и прогноза сильных коровых землетрясений и в континентальных районах. Возможность прогноза мест локализации сильных землетрясений в сейсмоактивных районах и в районах захоронения РАО на основе моделирования НДС имеет определенные перспективы и требует дальнейшего методологического развития.

В рамках работ по теме в 2016 году были продолжены полевые наблюдения за СДЗК с использованием спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС на геодинимическом полигоне в пределах Нижне-Канского массива и начаты полевые исследования на полигоне ФГУП «Радон» в Московской области.

4. Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях

Номер госрегистрации: 115012960029 (0145-2014-0015)

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

Настоящий 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 наблюдения заданного процесса, что позволит оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов.

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.

Стохастический подход к исследованию физических явлений используется очень давно и оправдал себя во всех без исключения случаях. Речь, однако, идет о величинах, медленно меняющихся на значительных временных интервалах, а не о короткопериодных флуктуациях, которые к тому же малы (по амплитуде, например) и с первого взгляда не могут заметно повлиять на ход процесса. Пример таких явлений хорошо известен в генетике, когда очень малые наследственные изменения накапливаются и в конечном результате приводят к сбоям в развитии организмов, и даже к появлению принципиально новых видов. Среди геофизических явлений необходимо упомянуть один из немногих механизмов возникновения землетрясений. Отдельные колебания плит могут быть малыми и рассматриваться в гармоническом приближении. Однако взаимодействие между отдельными колебаниями может вести к их слиянию таким образом, что полная энергия колебаний каждого осцилляторного движения складывается, и образуется новая волна, которая также описывается в гармоническом приближении и имеет энергию, равную сумме энергий слившихся осцилляций. Так продолжается до тех пор, пока случайным образом не образуется отдельная волна очень большой амплитуды. Ее энергия продолжает расти за счет захвата низкоэнергетических осцилляций. Наступает катастрофа – эта отдельная волна продолжает набирать энергию до тех пор, пока некоторые механизмы

развала не приводят к стабилизации. Таким же образом образуются гигантские морские волны (известный эффект девятого вала).

Удивительным образом все процессы такого рода легко переводятся на язык теории случайных графов. Самый простой пример – это объединение множеств объектов в кластеры по совокупности общих признаков. Это очень важный аспект в теории распознавания. Что особенно важно – это возможность классификации коллектива связанных графов (кластеров) по их мощности (по числу вершин в каждом связанном кластере). Сама идея рассмотрения таких процессов основана на очень простой схеме. Имеется некоторое количество точек (вершин графа), между которыми случайным образом образуются связи. Изначально рыхлая система, состоявшая из одних точек, кластеризуется и превращается в набор кластеров. Возникает задача – каким образом можно найти распределение таких кластеров по размерам. При этом совершенно ясно, что динамика процесса определяется одним случайным фактором – вероятностью появления связи между двумя элементарными объектами (вершинами графа). Таким образом, мы сталкиваемся с двумя различными проблемами: 1) как сформулировать само динамическое уравнение, управляющее процессом эволюции, и 2) как в это уравнение вводить случайные факторы.

Наиболее адекватный подход к решению первой проблемы основывается на введении вероятности застать систему в заданном состоянии в данный момент времени. Следующий шаг – выявление факторов, влияющих на изменение состояния системы, и их параметризация. Уравнение для изменения вероятности (The Master Equation) описывает баланс потоков событий, приводящих к превращению предшествующих по времени и последующих состояний. Скорость изменения вероятности, таким образом, связана с разностью двух таких потоков.

Эволюционные уравнения для кластеризации случайных графов выведены и решены для случая ненулевого источника вершин. Показана возможность возникновения критических явлений в таких кластеризующихся системах и выведены и сформулированы точные методы, позволяющие рассчитать спектры размеров связанных кластеров.

К этой специфической, но достаточно общей задаче возможно применение другого подхода, основанного на использовании теоремы Ридделя. Развитие этого направления представляется перспективным для будущих исследований.

Любые геофизические данные представляются числовыми массивами. Методы их анализа могут быть основаны на использовании как эволюционных уравнений, так и принципов разбиения на отдельные группы, как это было описано выше. Например, одномерные сигналы (скажем, последовательность эквиамплитудных, но не эквидистантных импульсов) могут быть проанализированы счетчиками, принцип действия которых примитивен: если импульс попадает в чувствительную зону, то он фиксируется счетчиком. Но если в чувствительную зону попадает несколько импульсов, то они фиксируются как один. Тогда счетчик не может корректно определять число импульсов, а выдает только их число, усредненное по достаточно большому временному интервалу.

Разумеется, сигнал может быть и нестационарным. В случае квазистационарного сигнала (описывается дискретным набором периодических функций) возможно проводить Фурье или вейвлет-анализ и определять набор частот, давая возможность для амплитуд каждой гармонике оставаться случайными величинами. Конечность интервала здесь играет важную роль, т.к. позволяет надеяться на описание сигнала конечным числом гармоник (при удачном выборе набора ортогональных функций).

4.1. Распространение радиоволн в нижней ионосфере

Интерес к исследованию прохождения радиоволн в нижних слоях ионосферы возрос в последнее время в связи с возникновением и широким использованием систем позиционирования (GPS – ГЛОНАСС), основанных на спутниковой локации земной поверхности. Точность работы таких систем связана с помехами, возникающими, главным образом, в нижних слоях ионосферы в условиях двухтемпературной плазмы (горячие электроны–холодные ионы). В таких условиях эффективно заряжаются аэрозольные частицы, поставляемые в ионосферу в результате конденсации паров сгоревших метеоритов, и образуются ридберговские комплексы – гигантские молекулы с одним электроном на высоковозбужденных уровнях (предионизационные состояния). Влияние этих двух факторов почти не исследовалось. Нами сделаны первые шаги в этом направлении.

Основным преимуществом спутниковой локации является возможность быстрого сканирования поверхности Земли на больших площадях, включая труднодоступные районы. Измерения, проведенные с помощью радиотелескопов, показали, что в результате вспышек на Солнце формируется высокочастотное (СВЧ) сверхфоное излучение, интенсивность которого значительно превышает типичные уровни микроволновых всплесков Солнца. В ходе анализа различных возможностей генерации обнаруженного СВЧ излучения было установлено, что наибольший вклад в результирующую картину спектра вносят переходы между орбитально вырожденными коллективными ридберговскими состояниями нейтральных компонент неравновесной двухтемпературной плазмы, возбуждаемых под действием солнечного света, и потока выбрасываемых из ионосферы медленных электронов. Ридберговские состояния расположены вблизи границы ионизации и характеризуются наличием бесконечной последовательности уровней, сходящихся к этой границе. Они характеризуются энергией уровня с заданным главным квантовым числом n , большими размерами (пропорциональными величине n^2) и угловым моментом слабосвязанного электрона l относительно ионного остова. Энергии уровней с большими угловыми моментами не зависят от l . Состояния с большими значениями главных квантовых чисел n и угловых моментов l являются орбитально вырожденными и статистически наиболее устойчивы. Процесс, приводящий к формированию вырожденных состояний с большими угловыми моментами электрона, называется l -перемешиванием. На высотах 60–110 км (что соответствует концентрации нейтральной среды E и D слоев ионосферы в интервале от 10^{16} до 10^{12} см⁻³) он протекает достаточно быстро (за времена порядка 10^{-6} с) и является практически необратимым. В результате этого процесса квантовые различия между возбужденными атомами и

молекулами пропадают, и спектр излучения не зависит от их химического состава, т.е. полностью определяется состоянием нейтральной среды. Эффективное тушение ридберговских состояний происходит начиная с 60 км и ниже. Взаимодействие между ридберговскими частицами A^{**} и нейтральными молекулами M (преимущественно кислорода и азота) приводит к формированию квазимолекул $A^{**}M$, потенциальные кривые которых классифицируются по величине углового момента L слабосвязанного электрона относительно центра молекулы M , и определяются характеристиками упругого рассеяния медленного электрона на этой молекуле.

В периоды сильных геомагнитных возмущений, возникающих в результате интенсивных вспышек на Солнце, происходит выброс ионосферных электронов, проходящих через E и D слои ионосферы. В этих условиях образуется неравновесная двухтемпературная плазма, в которой за времена порядка 100 пикосекунд заселяются коллективные ридберговские состояния. Так как плотность свободных электронов мала по сравнению с концентрацией атмосферных частиц, заметного изменения температуры среды не происходит. Для ночного и дневного времени в D и E слоях ионосферы она порядка тепловой. Концентрация образующихся здесь высоковозбужденных частиц зависит от концентрации среды и определяется температурой, плотностью и величиной потока свободных электронов. Наиболее эффективно заселяются вырожденные состояния с главными квантовыми числами в интервале $n = 20-60$. В этом интервале частоты радиационных переходов между вырожденными состояниями, расщепленными за счет взаимодействия с нейтральной средой, соответствуют СВЧ излучению в дециметровом диапазоне. В зависимости от уровня магнитной бури концентрация и температура электронов здесь изменяются в пределах от 10^3 до 10^7 см⁻³ и от 1000 до 3500 К. Увеличение плотности в нижней части D слоя приводит к росту скорости процессов ударного и радиационного тушения ридберговских состояний, что хорошо согласуется с результатами прямых измерений. Поэтому при плотности нейтральной среды большей 10^{16} см⁻³ их концентрация резко убывает. Область формирования возбужденных частиц по высоте сосредоточена в нижней части E слоя и внутри D слоя, ближе к его верхней границе (с шириной около 25–30 км).

Показано, что сдвиги частот излучения ридберговских комплексов для молекул азота и кислорода приводят к существенной неоднородности спектра излучения. Вследствие различия между характеристиками рассеяния медленных электронов на молекулах кислорода и азота (длин рассеяния, квадрупольных моментов и поляризуемостей) в трех спектральных областях изменения частот, принадлежащих интервалу 1–100 ГГц, интенсивность некогерентного СВЧ излучения заметно падает. К первой относится диапазон частот 1,17–1,71 ГГц, ко второй 4,31–6,09 ГГц и к третьей 7,27–57,1 ГГц, соответственно.

Рассчитаны зависимости интенсивности некогерентного излучения возбужденной среды в диапазоне 0,8–1,8 ГГц от частоты для спокойной и возмущенной ионосферы. При этом профиль СВЧ излучения является немонотонной функцией частоты и резко возрастает вблизи правой границы диапазона. С увеличением плотности электронов на два порядка интенсивности излучения возрастают приблизительно на четыре порядка.

Были обнаружены уникальные свойства частотного профиля в диапазонах частот 0,8–2,0 ГГц и 4,0–8,0 ГГц для случая рекомбинационной плазмы.

На основе расчетов установлено, что деградация передаваемой информации обусловлена двумя физическими причинами. Первой является резонансное взаимодействие спутникового сигнала с ридберговскими комплексами. Вторая причина обусловлена некогерентным излучением этих комплексов в дециметровом диапазоне, что приводит к значительному падению отношения сигнал/шум и невозможности дешифровки сигнала. Решение проблемы точного позиционирования возможно только с учетом всей совокупности физико-химических процессов, приводящих к деградации сигнала. Прямыми измерениями с помощью баллистических ракет и радиозатменным методом экспериментально доказано, что слой атмосферы, в котором преимущественно происходит деградация сигнала, расположен на высоте от 60 до 110 км. Созданная теория позволила установить связь времени задержки приходящего на приемник спутникового сигнала с мощностью потока некогерентного сверхфонового СВЧ излучения и приступить к решению проблемы организации устойчивых каналов передачи информации.

Показано, что в нормальных условиях базовая частота L_1 системы GPS соответствует физическому окну «прозрачности» в спектре некогерентного СВЧ излучения вследствие обращения в ноль сечения l перемешивания для главных квантовых чисел $n=43-45$ за счет неадиабатической связи с вращением в молекуле азота. С ростом температуры электронов окно исчезает, и мощность потока некогерентного СВЧ излучения быстро возрастает.

Было обнаружено, что на частоте 1,4 ГГц мощность потока некогерентного ионосферного СВЧ излучения не зависит от температуры электронов и является однопараметрической функцией от электронной плотности. Такая зависимость формы линии излучения от частоты называется «осиной талией», когда совокупность спектральных кривых сходится в одной точке, что широко используется в проводимых измерениях по пассивной локации. Эта частота оказывается наиболее удобной для измерения влажности почв и солености вод океана и является близкой к частоте космического радиоизлучения атома водорода (с длиной волны 21 см), возможность наблюдения которого обосновал советский астрофизик член-корр. АН СССР И. С. Шкловский. Ряд исследователей, вплоть до настоящего времени, считает, что этот источник излучения имеет космическое происхождение.

Не менее интересным фактом является поведение частотного профиля в диапазоне 4,0–8,0 ГГц, где формируется зависимость, которая называется «бутылочное горлышко». Для систем позиционирования этот диапазон частот является более устойчивым по отношению к природным аномалиям, чем общепринятый 0,8–2,0 ГГц. Одновременное использование базовой частоты 1,4 ГГц и частоты 5 ГГц (на которой обычно осуществляется связь со спутниками) может позволить при дистанционной пассивной локации поверхности Земли измерять влажность почв по глубине.

Прямые измерения в нормальных геофизических условиях показывают, что максимальный эффект достигается в дневное время, когда мощность принимаемого на приемнике некогерентного СВЧ излучения, обусловленного воздействием Солнца, на

семь-восемь порядков превышает мощность космического радиоизлучения, т.е. основным источником излучения являются ридберговские состояния в ионосферных D и E слоях.

Проведенные исследования позволили сформулировать основы радиохимической физики атмосферы Земли – науки о резонансном взаимодействии электромагнитных волн со средой, содержащей ридберговские молекулярные комплексы, которые заселяются в D и E слоях ионосферы и ответственны за искажение сигналов спутниковой группировки в периоды повышения солнечной активности. Радиационные переходы между орбитально вырожденными состояниями этих комплексов формируют некогерентное сверхфоновое излучение в дециметровом (СВЧ) и терагерцовом (ИК) диапазонах, которое играет важную роль для фундаментальных исследований и широко используется в различных независимых научно-технических приложениях.

В периоды сильных геомагнитных возмущений, возникающих в результате солнечного ветра после интенсивных вспышек на Солнце, происходит выброс ионосферных электронов, проходящих через E и D слои верхней атмосферы Земли. В этих условиях за малые времена (порядка 100 микросекунд) формируется неравновесное стационарное распределение по энергиям ридберговских частиц среды. Плазма, в которой заселяются такие коллективные ридберговские состояния, образуется в атмосферном слое на высоте от 60 до 110 км, где и происходит в основном деградация спутниковых сигналов GPS. Так как концентрация свободных электронов здесь мала по сравнению с концентрацией атмосферных частиц, заметного изменения температуры нейтральной среды не происходит. Для ночного и дневного времени в D и E слоях атмосферы она порядка тепловой. Это связано с тем, что высокая поступательная температура частиц, приходящих из F слоя ионосферы, при входе в более плотную среду расходуется на колебательное и вращательное возбуждение атмосферных молекул. Дальнейшая релаксация возбуждения обусловлена процессами резонансной передачи внутренней энергии, транспорт которой происходит за счет последующих столкновений. В результате в D и E слоях происходит отрыв электронной температуры от температуры среды, и устанавливается неравновесная двухтемпературная рекомбинационная плазма, что хорошо согласуется с результатами прямых измерений. Концентрация образующихся здесь высоковозбужденных частиц определяется температурой, концентрацией и величиной потока свободных электронов, а также зависит от плотности среды. Наиболее эффективно в двухтемпературной рекомбинационной плазме заселяются состояния с главными квантовыми числами в диапазоне $n = 20-60$. Увеличение плотности в нижней части D слоя приводит к росту скорости процессов ударного и радиационного тушения ридберговских состояний. Поэтому при большей плотности нейтральной среды их концентрация будет резко убывать. Область формирования возбужденных частиц по высоте сосредотачивается в нижней части E слоя и внутри D слоя, ближе к его верхней границе (с шириной около 25–30 км).

Наряду с долгоживущей (около суток) рекомбинационной плазмой, в результате мощных всплесков на Солнце образуется неравновесная фотоионизационная плазма. Процесс, как правило, чаще происходит в экваториальной зоне, длится не более часа и обусловлен многоквантовым радиационным возбуждением ридберговских состояний широкополосным светом в видимом и УФ диапазоне, когда спиновые запреты снимаются

вследствие взаимодействия с молекулами среды. Это сопровождается обычным заселением ридберговских состояний рекомбинационным электронным потоком, т.е. результирующая плазма является комбинированной.

4.2. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения

Очень схематично знание в естественных науках добывается так (рис. 4.1). Нас интересует «анализ данных». На сегодняшний день анализ и обработка данных осуществляются в основном такими, ставшими уже классическими, методами, как статистический анализ, СВАН, вейвлет-анализ, фрактальный анализ и набирающая в последнее время ход математическая морфология.

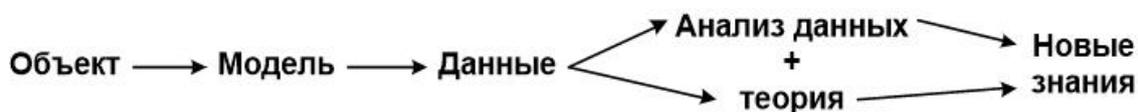


Рисунок 4.1 – Схема исследования данных

При всех достоинствах, большинство из них обладает излишней жесткостью в силу своего математического происхождения. Это означает, что для их эффективного применения изучаемый объект (а скорее его модель) должен удовлетворять ряду предварительных условий (стационарности, нормальности, регулярности и т.д.). Если это не так, то возникают проблемы. Раньше они решались упрощением модели.

В последнее время, благодаря развитию вычислительной техники, появились более мягкие, нетребовательные методы (комбинаторный перебор, имитационное моделирование, нейронные сети и т.д.).

Представленная на рис. 4.1 схема не включает исследователя, в то время как его роль велика даже при хорошей теории (например, при окончательных выводах) и совершенно, решающе огромна в других случаях.

Поэтому более правильной будет схема, заключительно выглядящая так (рис. 4.2):



Рисунок 4.2 – Окончательная схема анализа данных

Именно эта схема имеет место в геологии и геофизике: роль исследователя очень велика в силу нерегулярности и нечеткости как данных, так и знаний (рис. 4.2).

Опытный исследователь совершеннее любого формального аппарата выделит аномалии в физических полях небольшой размерности, перейдет от их локального уровня к глобальному для целостной интерпретации, найдет сигналы нужной формы на записях небольшой длины и сделает многое другое. Но он бессилен в больших размерностях и объемах, поэтому особую актуальность приобретает задача научить компьютер анализировать данные, как исследователь.

Техника решения такова: сразу было принято во внимание то обстоятельство, что человек мыслит и оперирует не числами, а нечеткими понятиями. Поэтому в техническую основу нашего моделирования, наряду с классической математикой, вошла также и нечеткая математика и непосредственно через нее нечеткая логика.

Концепция решения: мы считаем, что преимущество исследователя в анализе данных перед формальными методами объясняется гибким, адаптивным восприятием человеком фундаментальных свойств близости, непрерывности, связности, тренда и др., потому что именно из этих свойств, как из конструктора, складываются все алгоритмы анализа данных. Чем больше моделей свойств, тем совершеннее конструктор. Поэтому нам важно, чтобы было много непрерывностей, связностей, трендов и т.д.

Результат решения – новый подход к анализу данных, ориентированный на исследователя и занимающий промежуточное положение между жесткими математическими методами и мягкими комбинаторными. Это – дискретный математический анализ (ДМА).

ДМА – это серия алгоритмов анализа дискретных данных, объединенных общей формальной основой: нечеткие сравнения чисел, мера близости в дискретных пространствах, дискретный предел. Идея ДМА состоит в создании дискретных аналогов понятий классического математического анализа: предел, непрерывность, гладкость, связность, монотонность, экстремум и т.д. (рис. 4.3).

Итак, наш путь – воспользоваться для анализа дискретных данных классической непрерывной математикой, заменив в ней фундаментальные основы нечеткими моделями их дискретных аналогов.

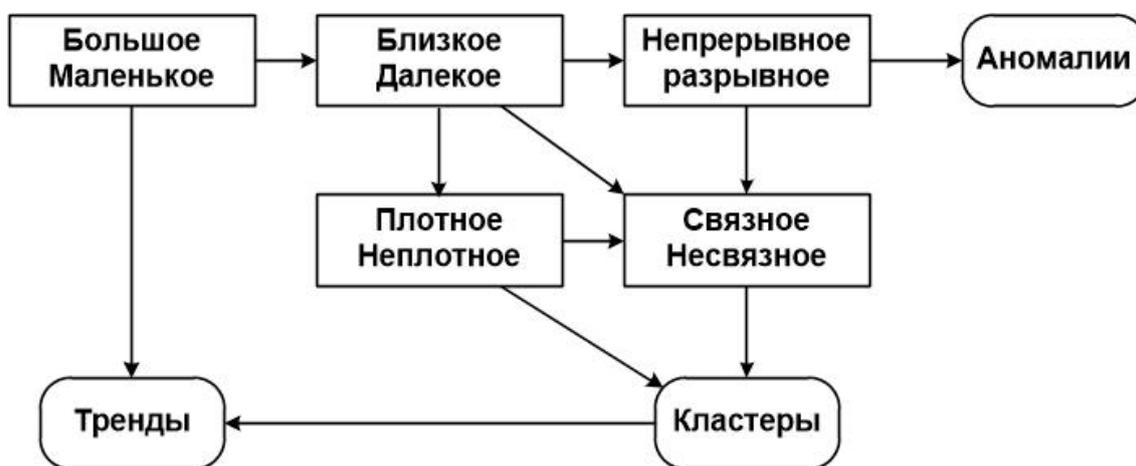


Рисунок 4.3 – Новый подход к анализу данных

Для построения ДМА и, в частности, для реализации представленной схемы обычных множеств и булевой логики недостаточно: булевы признаки внутренне дизъюнкты (жестки), что приводит к выхолащиванию моделирования. Содержательные признаки должны быть непрерывными (мягкими), а потому нечеткими. Нечеткая математика = нечеткие множества + нечеткая логика. Нечеткая математика – удачный мост (интерфейс) между исследователем и компьютером.

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

Номер госрегистрации: 115021010261 (0145-2014-0014)

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

5.1. Реконструкция среднемесячных значений скорости солнечного ветра в 1914–2014 гг. и определение экстремумов

Использовались среднечасовые значения горизонтальной составляющей H геомагнитного поля на обсерватории Соданкюля (SOD, географическая широта и долгота 67,4; 26,6; геомагнитная широта и долгота 64; 119) с 1914 г. Обсерватория расположена в авроральном овале и подходит для мониторинга суббуревого западного аврорального электроджета, который усиливается во время суббури. Согласно сценарию развития суббури 3-мерная суббуревая система магнитосферно-ионосферных токов образуется при разрыве тока поперек хвоста магнитосферы, который через продольные токи замыкается на ночную ионосферу. Наибольшие отрицательные отклонения H от спокойного уровня наблюдаются в секторе 22–01 местного магнитного времени (MLT), что для SOD соответствует 20–23 универсального (мирового) времени UT. Положительные отклонения наблюдаются в послеполуденном секторе и связаны с восточным электроджетом.

Для каждого месяца года определим параметр ΔH как разность между H_q и H_d . H_q представляет собой спокойный уровень, рассчитанный в интервале 20–23 UT для 5 наиболее спокойных локальных дней. H_d усредняется для того же интервала по всем дням месяца. Значения скорости (V) солнечного ветра (СВ) получены из базы данных НАСА (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Для каждого месяца строились линейные регрессии для параметров ΔH и V СВ. В таблице 5.1 даны регрессионные коэффициенты $V=a \cdot \Delta H+b$ и коэффициенты корреляции для каждого месяца. По этим данным проведена реконструкция среднемесячных значений V , начиная с 1914 г. На рис. 5.1 представлены значения реконструированных V для каждого месяца и стандартное отклонение $\pm\sigma$, а также измеренные значения V , начиная с 1964 г. Можно видеть, что изменение ΔH достаточно точно отражает изменение V , кроме нескольких пиковых и минимальных величин, которые выходят за пределы $\pm 1 \sigma$. Это может быть связано с отсутствием данных измерений для некоторых периодов.

Рис. 5.2 показывает реконструированные и измеренные значения среднемесячных V как состыкованный временной ряд для каждого месяца отдельно. Можно видеть, что пики V приурочены к фазе спада каждого солнечного цикла (СЦ). За период СЦ 15–23 пиковые значения в 1919, 1930, 1941, 1952, 1959, 1973, 1982, 1994 и 2003 гг. Хорошее совпадение пиков среднемесячных и среднегодовых высокоскоростных потоков (ВСП) СВ, можно видеть их. Это свидетельствует о том, что в течение столетнего «гранд-максимума» (ГМ) коронарные дыры были долгоживущими, не менее нескольких месяцев, т.е. существовали в течение нескольких оборотов Солнца. Сравнение распределения ВСП и числа

солнечных пятен (ЧСП) показывает, что хотя в среднем V увеличивается с долговременной эволюцией солнечной активности (СА), частота появления ВСП (т.е. коронарных дыр) не увеличивается.

Таблица 5.1 - Регрессионные коэффициенты и коэффициенты корреляции

Month	a [km/s/nT]	b [km/s]	cc	p
1	1.87	367	0.71	$2 \cdot 10^{-5}$
2	1.62	363	0.74	$7 \cdot 10^{-7}$
3	0.99	377	0.72	$4 \cdot 10^{-6}$
4	0.97	373	0.77	$2 \cdot 10^{-7}$
5	1.26	359	0.82	$7 \cdot 10^{-9}$
6	1.69	360	0.73	$3 \cdot 10^{-7}$
7	1.34	372	0.74	$2 \cdot 10^{-4}$
8	1.00	386	0.64	$4 \cdot 10^{-6}$
9	0.85	373	0.68	$8 \cdot 10^{-6}$
10	0.72	379	0.54	$1 \cdot 10^{-2}$
11	1.05	374	0.73	$5 \cdot 10^{-4}$
12	1.79	363	0.77	$2 \cdot 10^{-5}$

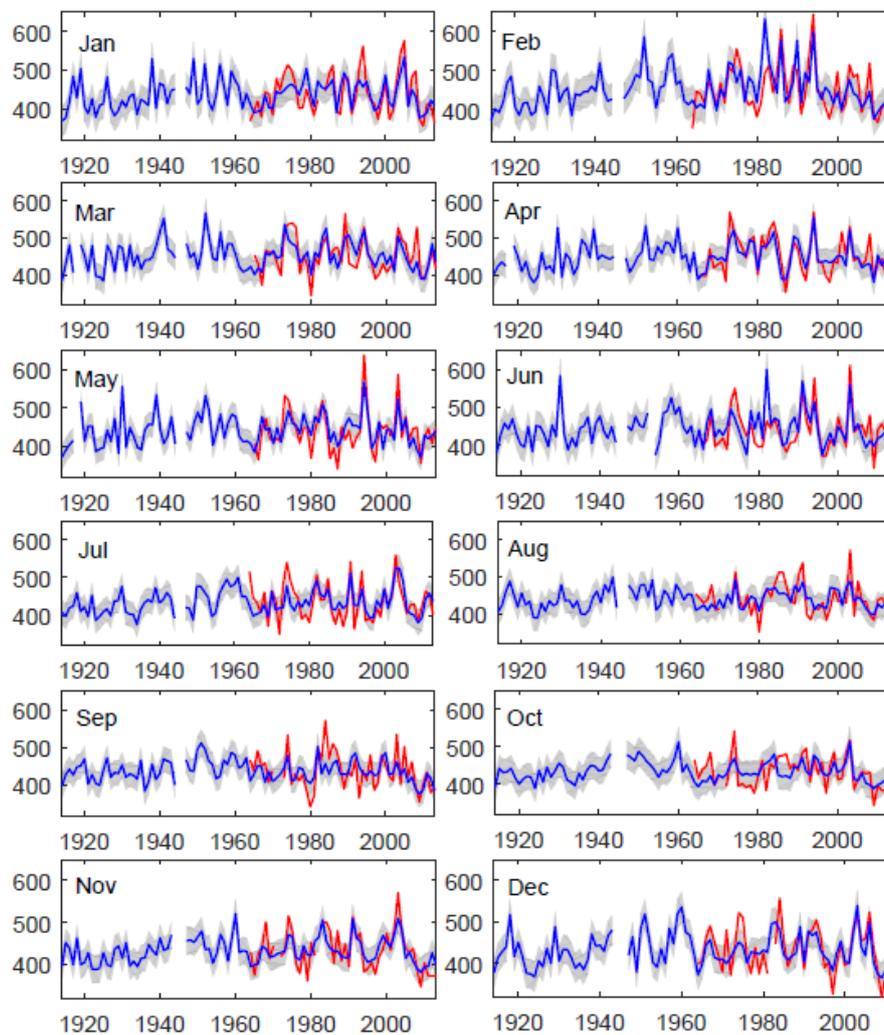


Рисунок 5.1 – Значения реконструированных V для каждого месяца и стандартное отклонение $\pm\sigma$, а также измеренные значения V , начиная с 1964 г.

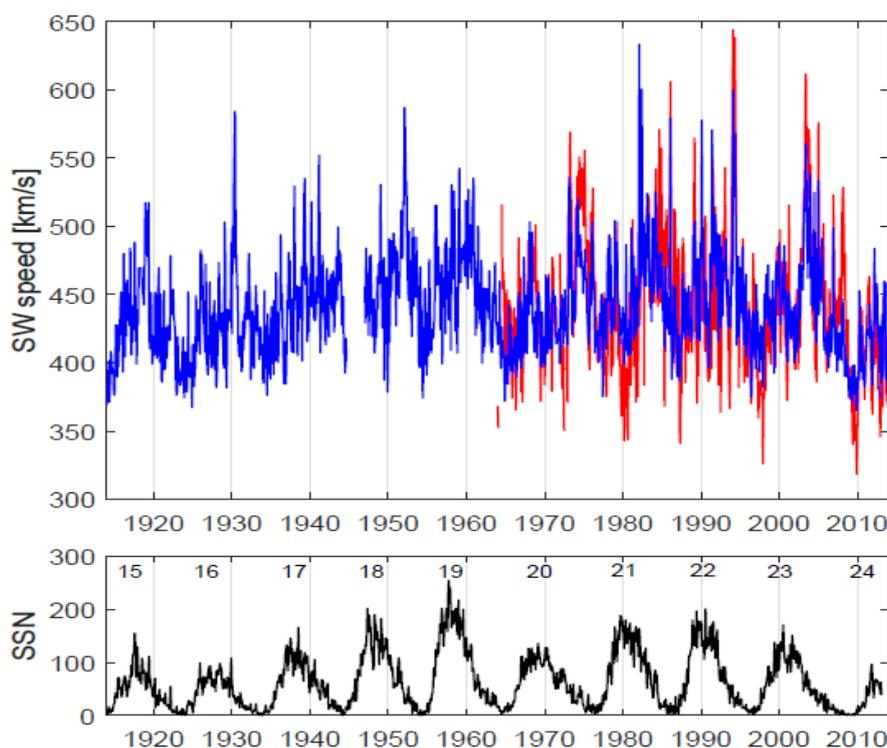


Рисунок 5.2 – Реконструированные и измеренные значения среднемесячных V как последовательный временной ряд (вверху), ЧСП (внизу)

5.2. Сезонные реконструкции скорости солнечного ветра как показатель эволюции коронарных дыр в период солнечного «Grand Maximum»

Среднемесячные значения параметра ΔN усреднялись на сезонном периоде для весны (февраль–апрель), лета (май–июль), осени (август–октябрь) и зимы (ноябрь–январь). Сезон определялся по гелиографической широте орбиты Земли. На рис. 5.3 представлены 3-точечное бегущее среднее (среднее за 1,5 года) для солнцестояния и равноденствия. Можно видеть, что некоторые пики, например, 1930, значительно уменьшаются вследствие того, что они длились не более трех месяцев. Проявляется долгопериодная регулярность в поведении V (и, следовательно, в поведении коронарных дыр как источников V СВ) в солнцестояние и равноденствие. При низкой солнечной активности в СЦ 15 и 16 $V \sim 460$ км/с во все сезоны. В следующий, более высокий СЦ 17, пики все еще примерно одинаковы и с несколькими равными пиками. Далее кривые, представляющие V в солнцестояние и равноденствие, разделяются. Абсолютный максимум явно выражен в равноденствие и составляет 520 км/с. В СЦ 19–20 пик V в солнцестояние все еще меньше по величине, чем пик в равноденствие. Максимум, близкий по величине к 1952 г., появляется в солнцестояние 2003 г. На рис. 5.3 также видно, что в период минимума СЦ V равноденствия всегда меньше V солнцестояния. Это означает, что пояс солнечных стримеров широк и стабилен в низких СЦ, но становится уже и более наклонным при увеличении СА. Глубокий минимум 2009 г. проявляется и в

равноденствие, и в солнцестояние. Все низкоширотные коронарные дыры исчезли, что привело к наиболее низкой когда-либо наблюдаемой V_{SW} . Однако, похожее уменьшение V_{SW} происходило и 100 лет назад в начале ГМ.

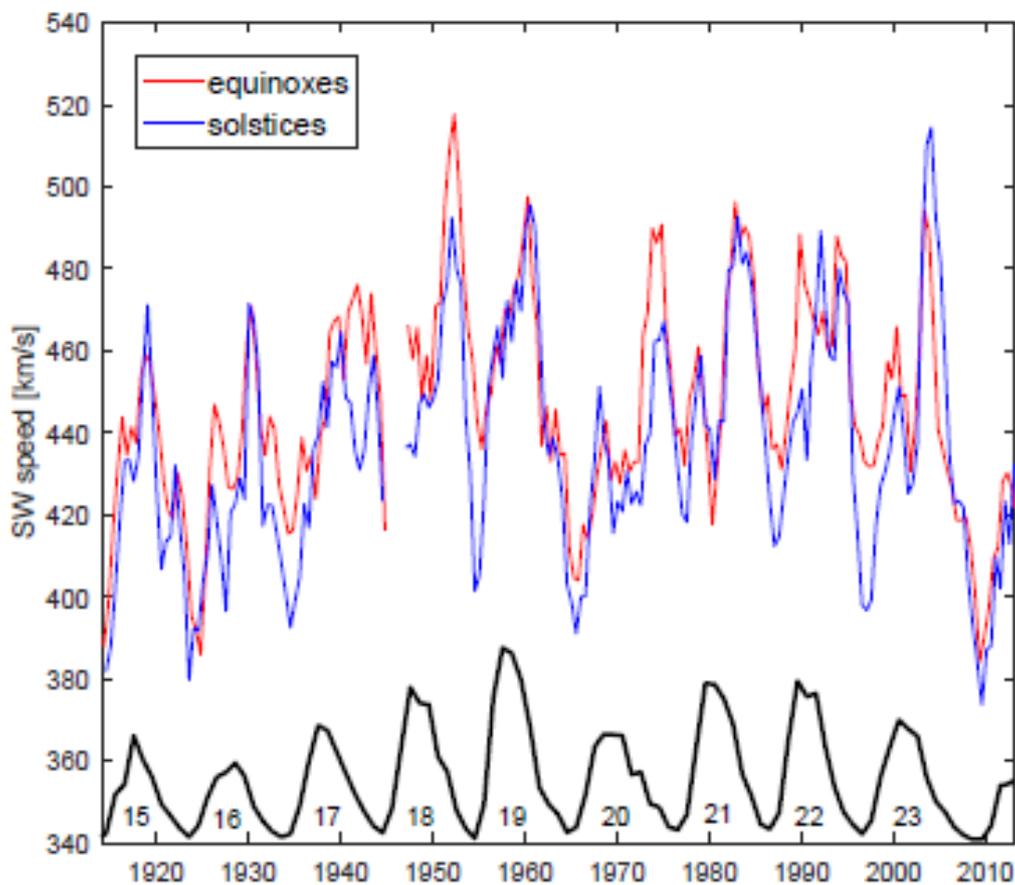


Рисунок 5.3 – Бегущее среднее (среднее за 1,5 года) для солнцестояния и равноденствия (вверху), ЧСП и номера СЦ (внизу)

5.3. Оценки измеренной температуры мезосферы во время интенсивных метеорных потоков

Было проанализировано 7 лет измерений с помощью метеорного радара SKYiMET, расположенного в точке с координатами 67,3 N; 23 W (Соданкюля). На рис. 5.4 показаны результаты измерений количества метеоров и температуры (Т) на высоте около 90 км. Хорошо видна годовая вариация: температура зимой достигает 200 К, а летом падает до 120 К. В середине декабря видно кратковременное резкое увеличение числа метеоров. Похожее увеличение происходит в начале января. Эти увеличения обусловлены метеорными потоками Геминид и Квадратид. На рис. 5.5 представлены температура на 90 км по метеорному радару (а), спутнику Aura (б) и количество зарегистрированных метеоров на меньшем временном интервале в декабре каждого года. Хорошо видно понижение температуры в измерениях радара, отсутствие понижения в спутниковых измерениях и увеличение числа метеоров с пиком 13 декабря.

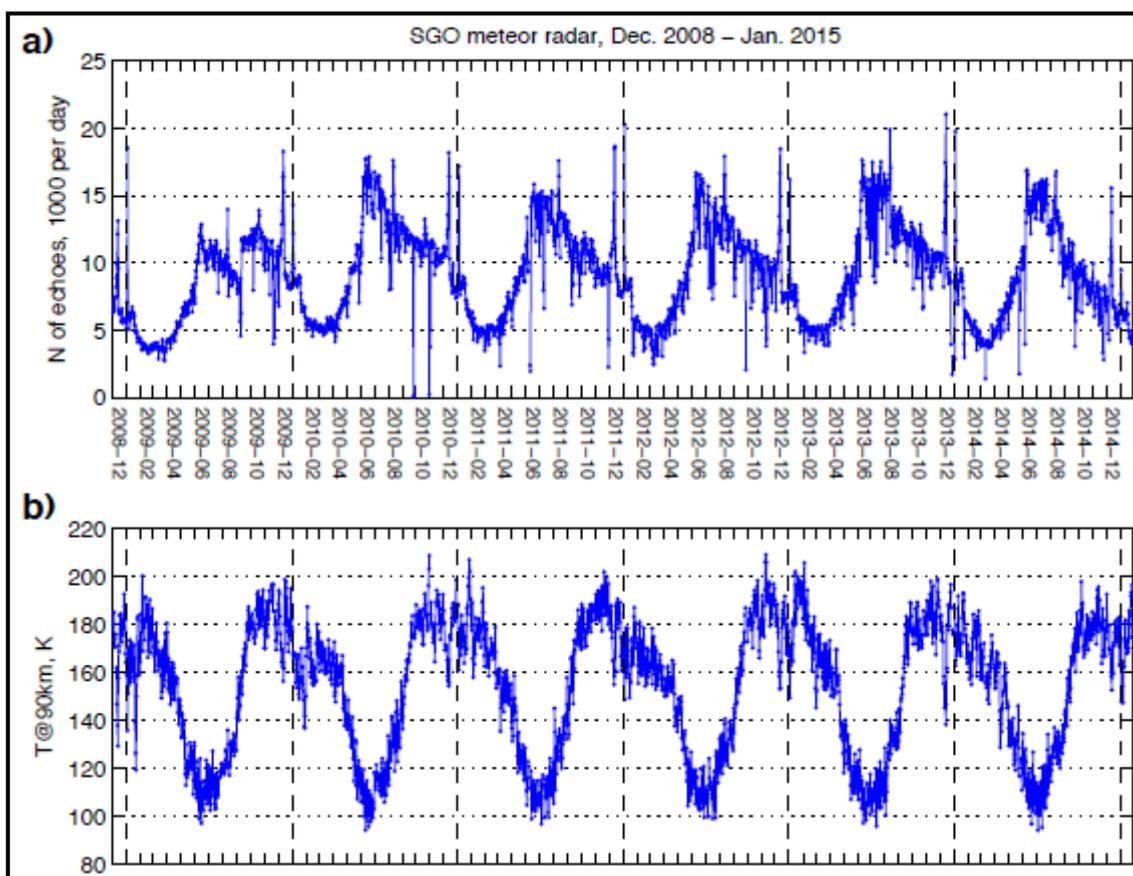


Рисунок 5.4 – Ряд измерений количества метеоров и температуры на высоте около 90 км за период 2008–2014 гг.

Эффект обусловлен тем, что рассеяние радиоволн на метеорных следах Геминид отличается от рассеяния на спорадических метеорах, поскольку Геминиды обладают особыми свойствами. Большое количество «перенасыщенных» следов в период Геминид обусловлено присутствием метеоров со следующими свойствами: (*) тяжелые частицы, (*) обладающие большей скоростью, (*) отличный от спорадических метеоров химический состав. Таким образом, можно сделать вывод, что декабрьские «понижения» T , фиксируемые метеорным радаром, указывают на необычные свойства метеорных потоков Геминид.

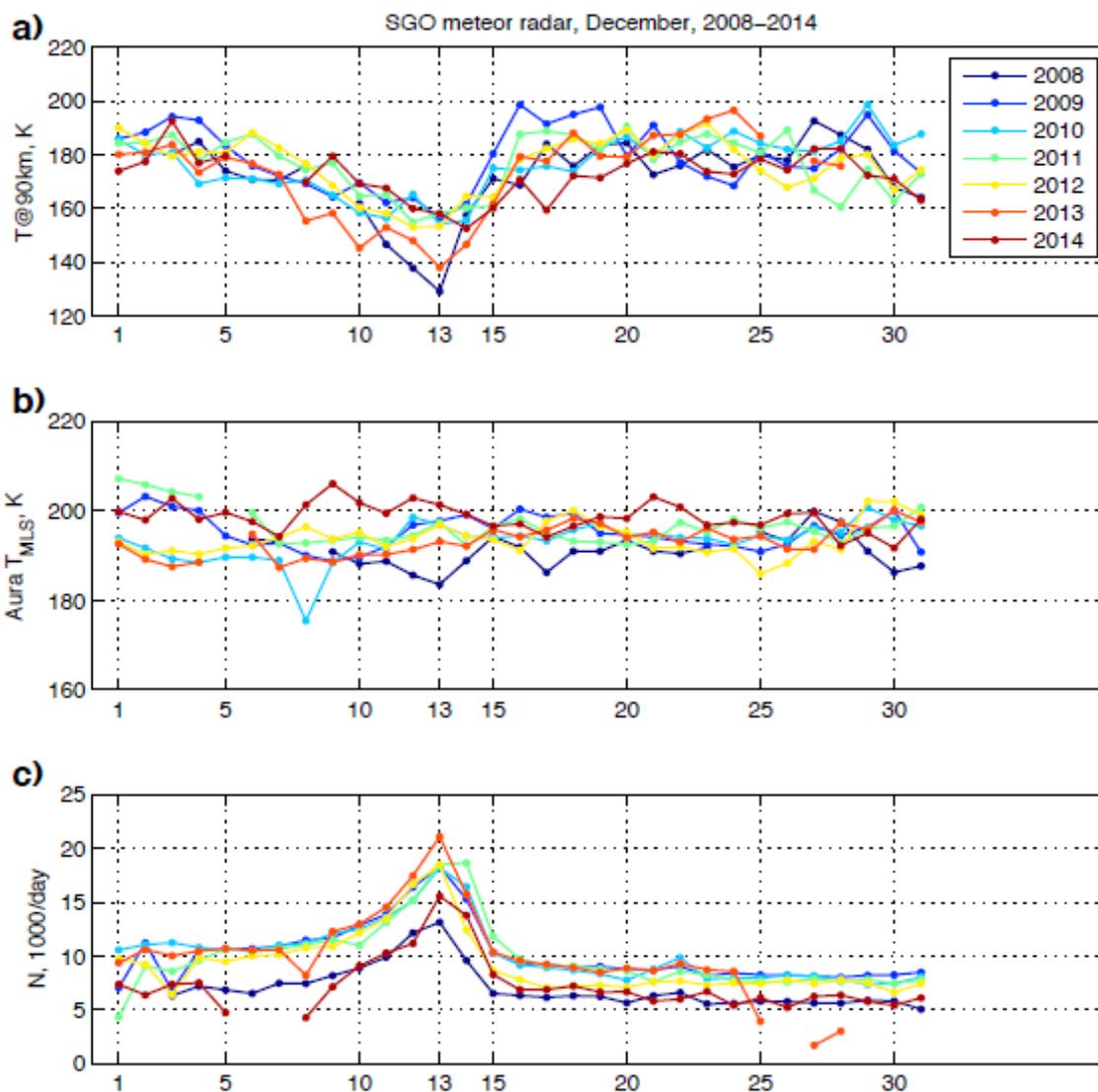


Рисунок 5.5 – Температура по метеорному радару (а), спутнику Aura (б) и количество зарегистрированных метеоров (с) в декабре 2008–2014

6. Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию

Номер госрегистрации: АААА-А16-116021950122-0 (0145-2015-0021)

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

Главной целью проекта по программе № I.4П (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» стало проведение сравнительного аналитического исследования процесса методов добычи углеводородов в России и других странах мира за период с 1900 по 1999 гг.

В рамках текущего этапа для реализации поставленной цели были решены следующие задачи: расширение и наполнение БД, разработанной в течение предыдущего этапа выполнения работ; создание и запуск в эксплуатацию геоинформационного веб-сервиса «Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения».

6.1. Наполнение БД

Одним из действий, осуществляемых в рамках данного этапа, стало наполнение БД еще одним важной атрибутивной составляющей – данными по методам поиска и разведки крупных и суперкрупных месторождений углеводородов.

Геологоразведочные работы включают в себя комплекс различных специальных геологических работ, производимых с целью обнаружения и подготовки к промышленному освоению месторождений полезных ископаемых (далее – ПИ). В них входит изучение закономерностей размещения, условий образования, особенностей строения, вещественного состава месторождений ПИ, а также экономическая оценка и рентабельность промышленной эксплуатации месторождения. Как правило, все методы, применяемые на месторождении в ходе проведения этапов поиска и разведки, используются комплексно. Это было прослежено авторами в результате сбора соответствующих материалов по крупным и суперкрупным месторождениям УВ и отражено в БД на примере многих месторождений, в числе которых: Арланское, Приобское, Самотлорское, Марун, Сафания, Восточный Багдад и др.

Кроме того, по результатам анализа методов разведки было выявлено, что некоторые месторождения были разведаны в несколько этапов, по результатам доразведки и ее дальнейшей интерпретации были уточнены и определены условия залегания и площадь

распространения продуктивных горизонтов, была выявлена протяженность водопроницаемых покрышек и т.д. [1].

6.2. Развитие нефтяной промышленности в 20 веке

Несмотря на то, что зарождением нефтяной промышленности по праву считается 19 век, основное свое развитие она получила во второй половине 20 века, что подтверждается промежуточными результатами выполняемой работы.

Ниже приведены периоды, которые характеризуют становление нефтяной промышленности и нашли отражение в созданной авторами БД.

6.2.1. 1 период (1900–1950 гг.)

Этот период, пожалуй, можно считать самым базовым, т.к. именно в это время произошло много значительных открытий в науке и технике, которые впоследствии послужили фундаментом для развития нефтегазовой промышленности.

- Именно в этот период были сформированы новые дисциплины, находящиеся на стыке многих наук – геология, физика, химия. Среди них: техника и технология добычи нефти и газа; физика нефтяного и газового пласта; подземная гидродинамика [2];
- Осуществляются первые попытки моделирования разработки нефтяных пластов – электромоделирование (проф. РГУ нефти и газа им. Губкина П.М. Белаш);
- Совершенствование технологии бурения скважин: ударный способ заменяется роторным, а затем турбинным. Разрабатываются новые способы разрушения пород (электробур, взрывное бурение);
- Применяется фонтанная арматура, для транспортировки нефти используются трубы, появляется газлифтный способ добычи. Создается новая техника для эксплуатации скважин (электроцентробежный насос (ЭЦН), штанговый глубинный насос (ШГН));
- В 1947 г. в США проведен первый гидроразрыв пласта (ГРП);
- Открыты крупнейшие нефтяные месторождения, которые находятся в стадии активной разработки и по настоящее время [3]. Среди них: Саудовская Аравия (Гавар, 1948 г.; Абкаик, 1940 г.; Катиф, 1946 г.), Россия (Ромашкинское, 1948 г.); Кувейт (Большой Бурган, 1946г.), Мексика (Чиконтепек, 1926г.), Венесуэла (Шельф Боливар, 1917г.).

6.2.2. 2 период (1950–1999 гг.)

На втором этапе продолжились работы, основа которых была заложена на предыдущем этапе нефтегазового дела.

- В начале 50-х началось активное использование наклонно-направленных скважин. Стволы в данном случае отклоняется от вертикали, сама буровая вышка находится в отдалении от месторождения. Основные зоны применения этого метода – морские участки месторождений или побережье. В 90-е годы в России были предприняты первые шаги по внедрению новой технологии бурения – горизонтальной. Технология горизонтального бурения не является прорывом в нефтедобывающей отрасли, так как этот метод был известен еще с 1846 года;
- Значительное развитие и обоснование в использовании получили методы внутриконтурного заводнения, широко используемое на многих месторождениях. Впервые этот метод нашел применение на Ромашкинском месторождении (Татарстан, Россия) и стал хрестоматийным примером рациональной разработки крупнейшего месторождения, который применяется во всем мире. За внедрение этого метода в 1972 г. большой группе специалистов Татнефти и ученых ВНИИнефти была присуждена Ленинская премия;
- Получили развитие тепловые и физико-химические методы воздействия на пласт;
- На месторождении Узень (Казахстан, см. [3]) для поддержания пластового давления после успешных опытов по нагнетанию горячей воды в июле 1970 г. приступили к первому в нашей стране нагнетанию горячей воды в скважины;
- Нашли широкое применение новые методы и компьютерные приложения по моделированию разработки месторождений;
- Вышел регламент по проектированию разработки месторождений, в котором была поставлена задача построения трехмерных геологических и гидродинамических моделей (1996 г.). Большую роль в развитии моделирования в дальнейшем, сыграло постановление Центральной комиссии по разработке о необходимости построения 3D геологических и гидродинамических моделей при создании проектов разработки [4];
- Создано особое конструкторское бюро по конструированию, исследованию и внедрению бесштанговых насосов (ОКБ БН). Основатель А. А. Богданов (1950 г.);
- При эксплуатации скважин используются струйные (1969 г.), винтовые (1980 г.) диафрагменные насосы, разработана технология «тандем» (электроцентробежный насос + струйный насос);
- Теоретически обосновано проведение гидроразрыва пласта в СССР (С.А. Христианович и Ю.П. Желтов 1953 г.);
- Утверждены основные положения по обустройству и автоматизации нефтегазодобывающих предприятий (1968 г.) (Горев С.М. «Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности». Изд-во КамчатГТУ. 2003. – 263 с.);
- Открыто большинство крупных и суперкрупных месторождений, рассматриваемых в рамках данной работе: Россия (Самотлорское, 1965 г.; Приобское, 1982 г.; Федоровское, 1971 г.), Саудовская Аравия (Манифа, 1966 г.;

Шайба, 1956 г.), ОАЭ (Верхний и Нижний Закум, 1969 и 1965 гг. соответственно; Баб, 1963 г.), США (Прудхо Бэй, 1969 г.; Купарук Ривер, 1969 г.) и многие другие [3].

После 1999 г. начинается следующий этап в развитии нефтегазовой промышленности, в течение которого продолжают работы по совершенствованию методов и процессов разработки месторождений нефти и газа, особенно тех, которые направлены на увеличение нефтеотдачи пластов.

6.3. ГИС-проект

Собранные данные по месторождениям представляют собой поля атрибутивных таблиц для базы данных, реализуемой в среде Esri ArcGIS 10.3 (рисунок 3.1). ArcGIS — семейство программных продуктов компании Esri, одного из лидеров мирового рынка геоинформационных систем ArcGIS позволяет создавать и визуализировать большие объёмы информации, имеющей географическую привязку. С помощью приложений ArcGIS можно решать разнообразные задачи, включая создание карт, управление данными, географический анализ, редактирование данных и геообработку.

Таким образом, в результате анализа информации о местоположении каждого из месторождений и переложении ее в ГИС, мы получаем визуализацию базы данных в виде геопространственных объектов. Разработанная БД по месторождениям представлена в виде единой карты с инструментами работы и фильтрации данных по различным параметрам. При работе с ArcGIS использовалась картографическая подложка GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) – глобальная модель рельефа земной поверхности, включающая данные о рельефе суши и батиметрии морского дна. Разрешение модели составляет 30" (~1 км). Настоящая модель была выпущена в мае 2009 г. и обновлена в ноябре 2009 г.

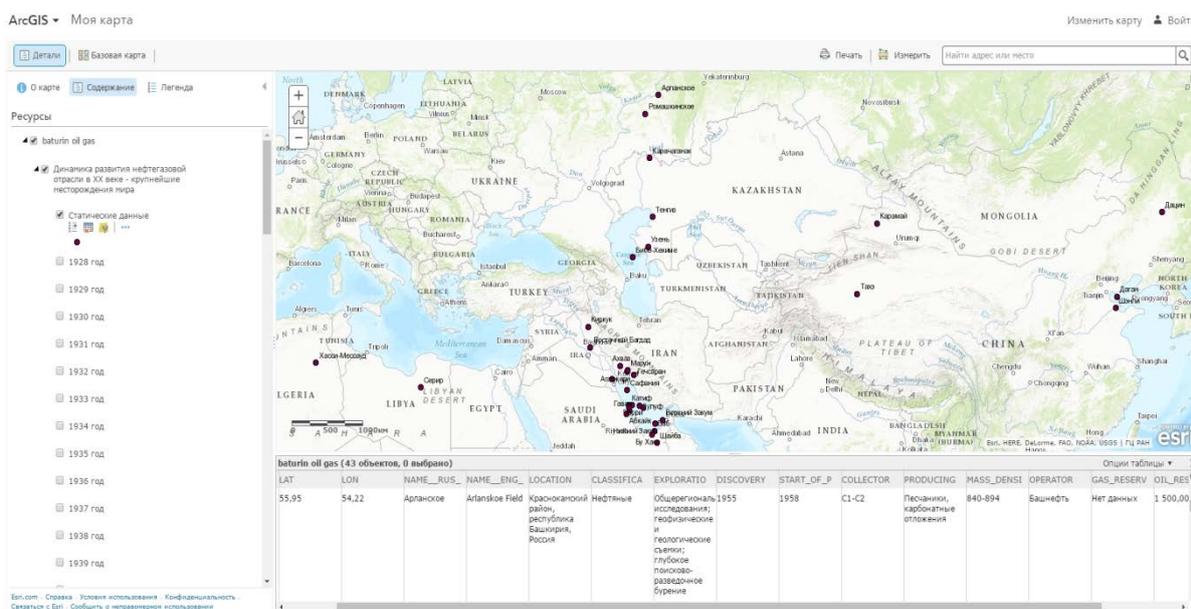


Рисунок 3.1 – Визуализация БД на портале «ГИС Россия» посредством сервиса «Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения»

6.3.1. Геоинформационный веб-сервис «Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения»

Важная составляющая развиваемой системы для работы с крупными и суперкрупными месторождениями УВ – специализированный веб-сервис «Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения», который разрабатывается авторами в рамках проведения данной работы и будет и введен в эксплуатацию к концу 2016 года. Главная цель создания подобного веб-сервиса – обеспечение удобного для пользователей доступа ко всем объектам, имеющимся в БД.

Принципиальной особенностью сервиса является наличие в его составе приложения для взаимодействия удаленных пользователей с соответствующими цифровыми слоями. Это обеспечено функционированием специализированного картографического веб-приложения, не требующего от конечных пользователей установки дополнительного геоинформационного программного обеспечения. Все цифровые слои пространственных данных (набор карт) и соответствующая атрибутивная информация хранятся централизованно на ГИС-сервере с обеспечением доступа в многопользовательском режиме.

Разработанный интерфейс обеспечивает возможность сравнительного пространственного анализа данных по месторождениям УВ с целью анализа их освоения и на мировом уровне. Набор карт сопровождается тематическим описанием. Анализ данных может проводиться любым пользователем системы через браузер, за счет реализации удобного и доступного инструмента для визуализации данных.

6.3.2. Инструменты портала

Веб-сервис «Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения» [3] на портале ГИС Россия, предоставляющий онлайн доступ к базе месторождений в формате геопространственных данных, имеет следующий функционал:

- 1) выбор необходимых для просмотра слоев путем их включения-отключения по галочке;
- 2) просмотр легенды слоев;
- 3) просмотр атрибутивной таблицы (точных данных по каждому региону);
- 4) фильтрация данных – можно выводить на карту месторождения, например, с датой открытия или запасами газа/нефти больше/меньше и т.д. заданного;
- 5) регулировка прозрачности слоя. На карте всегда выводится самый верхний слой одновременно включенных;
- 6) краткая информация о данных (метаданные).

6.4. Заключение

Результатом проведения работ 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» стал многокомпонентный научный продукт, который может служить для проведения аналитических исследований в рамках решения различных научных и прикладных задач.

Список использованных источников

1. Кусанов Ж.К. Геологическое строение и продуктивная характеристика сложно построенных залежей нефти и газа Карачаганак-Кобландинской зоны поднятий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 3. С. 16–23.
2. Крылов А.П., Глоговский М.М., Мирчинк М.Ф., Николаевский Н.М., Чарный И.А. Научные основы разработки нефтяных месторождений. Второе издание. М.: АНО ИКИ, 2004. 416 с.
3. Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке – крупнейшие месторождения [Электронный ресурс] // Портал ГИС Россия URL: http://gis.gcras.ru:6080/arcgis/rest/services/publ/baturin_oil_gas/MapServer (дата обращения 01.11.2016)
4. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 84 с.

7. Новые математические методы моделирования геофизических процессов

Номер госрегистрации: АААА-А16-116021950124-4 (0145-2015-0019)

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

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

В 2016 году план работ по проекту предусматривал развитие нового направления «Радиохимическая физика атмосферы». Предполагалось рассмотреть механизмы возникновения помехоактивных частиц в нижних слоях ионосферы и исследовать их взаимодействие с электромагнитными волнами. Вторая часть работы предусматривала развитие принципов применения методов обработки случайных сигналов и методов фильтрации данных по геомагнитному полю.

Геомагнитные возмущения, вызванные воздействием потока элементарных частиц от Солнца, приводят к серьезным нарушениям электромагнитного состояния ионосферы. Это связано с изменениями характеристик ионосферной плазмы. В частности, такие явления, как предвестники магнитных бурь, могут быть обязаны фотоионизации частиц нижней ионосферы жесткими квантами, которые первыми достигают верхних слоев атмосферы. Последующие продукты солнечного выброса приводят к дополнительной ионизации ионосферы и образованию предионизованных высоковольтных нейтральных молекулярных комплексов, являющихся эффективными излучателями электромагнитных волн в радиодиапазоне. Эти процессы приводят к магнитной буре.

Исследование всех вышеупомянутых кинетических процессов составляет основную цель работ по проекту. Основу метода исследований составляют связанные динамические уравнения, связывающие пространственно-временную зависимость векторного потенциала с индуцированными токами в ионосферной плазме. Важно было выявить факторы, обуславливающие возникновение помех при распространении радиоволн в нижней ионосфере. Таких факторов оказалось три. Это ридберговские ассоциаты, обладающие специфическим спектром внешнего электрона (полосы состояний с одинаковым угловым моментом), заряженные малые аэрозольные частицы (плазмозоли) – продукты сгорания влетевших в земную атмосферу метеоритов и флуктуационные области разреженной плазмы.

В соответствии с этим перечислением ставятся и решаются задачи, необходимые для достижения целей, поставленных в проекте.

Моделирование воздействия случайных факторов на электромагнитные процессы в атмосфере является вполне естественным и адекватным подходом к решению поставленной задачи. Такой подход использовался для построения диаграммной техники вычисления фотонных пропагаторов в неоднородных случайных средах.

Общепринятые эволюционные уравнения корректно описывают временную эволюцию сложных геофизических структур (изменение состояния атмосферы, аэрозольные процессы и климат, развитие территориальных структур, демографические структуры и многое другое), если хорошо известны скорости переходов между

состояниями. Например, скорости рождения и смерти описывают динамику переходов между состояниями с различными размерами популяций. Между тем, с уверенностью можно сказать, что ни в одной геофизической задаче нельзя исключать влияние случайных факторов. Это означает, что мы должны оперировать с вероятностью заставить систему в заданном состоянии, а не средние по времени (или по ансамблю) характеристики состояния. Обычное рассмотрение всегда пренебрегает отклонениями от средних и оперирует только со средними величинами или низшими моментами. Однако при этом нужно иметь хорошо разработанные методики рассмотрения вероятностных процессов в геофизических системах. Например, глобальные катастрофы, такие как землетрясения, цунами, торнадо, эпидемии, экологические катастрофы и др., оказываются результатом когерентного наложения случайных факторов.

В таких случаях математическое описание должно базироваться на иных принципах чем те, которые широко распространены в современной геофизике.

Геофизические данные представляются числовыми массивами размерности D . Например, одномерные массивы могут представлять данные о концентрациях вредных выбросов в атмосфере, или последовательность радиолокационных сигналов со спутника в заданные интервалы времени, или, например, моменты измерений могут быть выбраны случайно.

Наша идея состоит в том, что за геофизическими данными стоит некоторый вероятностный процесс. Каждая последовательность данных реализуется с некоторой вероятностью. Существует несколько способов обработки сигнала. Это может быть, например, Фурье или вейвлет-анализ, позволяющий выделить основные частоты сигнала. При таком подходе предполагается, что сам сигнал детерминирован, а то, что мы наблюдаем – это зашумленный сигнал, и наша задача – попытаться отделить его от шумов. Именно такая задача возникает в локации (звуковой, радио), когда посылаемый сигнал известен, а приходящий складывается из шумов плюс отраженный (частично или полностью) сигнал, по которому мы судим о геофизических процессах, происходящих на расстоянии. Именно так лоцируются объекты в современных системах позиционирования. Шумы вносят ошибку, для уменьшения которой необходимо установить природу шумов. В случае спутникового зондирования установлено несколько таких причин: нами выяснена роль ридберговских комплексов, образующихся на высотах 70–110 км в ионосфере и роль аэрозольных частиц, подверженных воздействию жесткого солнечного излучения, что приводит к их зарядке. Сильное влияние этих частиц на состояние ионосферной плазмы несомненно, и у нас есть надежда выяснить роль аэрозольного фактора и ридберговских комплексов в ходе работ над проектом.

Есть и другой тип геофизических сигналов, когда характеристики генератора сигнала нам не известны, и задача обработки состоит в том, чтобы извлечь из него максимальную информацию. Например, это может быть сигнал от внеземных цивилизаций. Тогда можно ожидать обнаружения в нем доминантного сигнала и пытаться его отфильтровать. Возможна, однако, и другая ситуация. Сигнал вовсе не содержит доминанты. Попытки приписать какие-то средние величины к несуществующему регулярному сигналу оказываются полностью несостоятельными. В качестве примера

можно указать шумы космического происхождения (и не только в радиодиапазоне). Спрашивается: что тогда делать? Мы даем ответ на этот вопрос. Частично он содержится в нашем предыдущем отчете.

Наша вероятностная концепция предполагает, что стохастический сигнал описывается вероятностью его реализации. Для определенности мы рассмотрим стационарный сигнал со случайной амплитудой и введем вероятность застать в сигнале заданную амплитуду. Самый прямой способ восстановления вероятности – это разбиение оси амплитуды на малые отрезки и подсчет числа измеренных сигналов в заданном интервале. По мере сужения интервала и удлинения времени измерения такая процедура позволяет вычислить плотность распределения измерений. Однако из-за недостатка данных (а чаще времени измерения) такая процедура плохо работает. Поэтому более прогрессивно воспользоваться кумулятивными распределениями, т.е. рассчитывать число измерений с амплитудой выше заданной. Теперь для вычисления плотности распределения потребуется аппарат дискретного математического анализа, т.к. нам придется дифференцировать функцию, определенную на дискретном множестве.

В самом общем случае вероятность застать заданный сигнал зависит от времени, частоты и амплитуды сигнала. В качестве примера мы рассматриваем аэрозольный счетчик, определяющий концентрацию дисперсных примесей в атмосферном воздухе. В этом счетчике каждая частица попадает в счетный объем, освещенный лазерным лучом. Рассеянный от луча сигнал считывается фотоумножителем. Таким счетчиком можно определить концентрацию частиц при условии, что скорость прокачки воздуха через счетный объем известна, а частицы попадают в счетный объем по одной. Но однократный счет нельзя гарантировать, частицы в счетный объем могут попадать по две, по три и т.д. Это означает, что счетчик будет занижать счетную концентрацию частиц. Теперь сигнал (отклик от отсчетов) будет иметь разную амплитуду в зависимости от числа попавших в счетный объем частиц. Таким образом, возникает типичная задача анализа стохастического сигнала. Эта задача усложняется еще и тем, что аэрозольная примесь может содержать частицы разного размера (полидисперсный аэрозоль). Тогда проблема анализа усложняется.

Часто можно предполагать, что сам процесс реализуется с некоторой вероятностью. Далее, будем предполагать также, что каждая реализация процесса (зависимость его параметров от времени) управляется некоторыми вполне определенными и хорошо известными уравнениями. Случайный фактор вводится прямо в уравнения, и затем вводится вероятность реализации каждого состояния, для которой записывается система уравнений или уравнение в частных производных. Мы разработали методы вывода таких уравнений. Иногда их удается решить аналитически.

Можно поступить и иначе. А именно: считать, что известна вероятность реализации заданной функции. Например, мы можем считать, что вероятность застать заданную функцию опять задана законом Гаусса. Теперь для вычисления средних придется иметь дело с функциональными интегралами. Еще один способ – рассматривать дихотомные процессы. Скорости переключения между двумя состояниями являются параметрами

уравнений. Они должны подбираться из сравнения теоретических заключений с экспериментальными данными.

Основным преимуществом спутниковой локации является возможность быстрого сканирования поверхности Земли на больших площадях, включая труднодоступные районы. Развитие этого вида локации позволило контролировать масштабы вырубки лесных массивов, оценивать характерные времена их восстановления, следить за урожайностью сельскохозяйственных культур, прогнозировать поведение ледяных покровов, проводить диагностику течений водных слоев и предсказывать масштабы рыбных ресурсов на различных участках океана Земли и т.д. Интенсивность отраженного излучения на частоте 1,4 ГГц идентифицируется как оптимальная частота для определения влажности почвы дистанционным методом. Одним из доводов в пользу выбора этой частоты является Международное соглашение о ее защите для целей радиоастрономии, т.е. радио-интерференция на частоте 1,4 ГГц минимальна.

Фундаментальными проблемами дистанционной локации являются установление природы источника дециметрового СВЧ излучения с учетом зависимости его интенсивности от текущего состояния атмосферы и определение мешающих факторов распространения излучения в атмосфере (заряженные аэрозольные слои, их гидратация и т.д.). Это приводит к неконтролируемому поведению измеряемой интенсивности и, как следствие, к трудностям калибровки приемной аппаратуры. Наиболее подробно проблема калибровки изложена в программе SMAP (NASA). Завершает круг проблем необходимость проведения последовательной математической обработки измеряемых сигналов.

Обсудим эти проблемы более подробно, начиная с источника излучения на частоте 1,4 ГГц, так как единое физическое представление среди специалистов здесь отсутствует. Ранее предполагалось, что этот источник имеет космическое происхождение и соответствует наблюдаемому на радиотелескопах излучению водородной радиолинии с длиной волны 21 см и частотой перехода 1,4204 ГГц, соответствующей энергии $5,86 \cdot 10^{-6}$ эВ. Эта линия является важнейшей в межзвездном свечении и отвечает запрещенному переходу между подуровнями сверхтонкой структуры основного электронного состояния атома водорода. Верхний подуровень соответствует параллельному расположению спинов электрона и протона, нижний – антипараллельному. Вероятность перехода между ними равна $2,85 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ (т.е. один переход осуществляется за 11 млн лет). Считается, что интенсивность радиоизлучения, согласно закону Рэлея-Джинса, пропорциональна температуре, т.е. в достаточно узком спектральном интервале кинетическую температуру газа можно рассматривать как меру интенсивности излучения. Оценки показывают, что в результате резонансного перераспределения радиоизлучения водорода на ридберговских состояниях в D и E слоях ионосферы Земли для нормальных геомагнитных условий и концентрации электронов $n_e = 10^4 \text{ см}^{-2}$ мощность потока космического излучения, приходящего на радиометр, составляет 10^{+5} Вт/см^2 . Эта величина на несколько порядков меньше значения плотности потока собственного некогерентного СВЧ излучения верхней атмосферы. Сказанное подтверждается также тем, что прямые измерения радиометром в нормальных условиях показали, что

максимальный эффект достигается только в дневное время, когда СВЧ излучение обусловлено воздействием Солнца.

Радиоизлучение солнечного происхождения имеет более сложную природу. Во-первых, с помощью радиотелескопа зарегистрировано прямое излучение от отдельных солнечных пятен на частотах 1,4 ГГц и 4,6 ГГц с переменной во времени интегральной интенсивностью. Во-вторых, в результате воздействия потока ионосферных электронов и светового потока в атмосферном слое 80–110 км от поверхности Земли образуется сверхфоновое некогерентное СВЧ излучение. Подавляющий вклад в энергию излучения Солнца вносит область частот от видимого до ультрафиолетового диапазона. Естественно полагать, что излучение солнечных пятен на частотах 1,4 ГГц и 4,6 ГГц не вносит заметный вклад в регистрируемое на Земле излучение, т.е. можно ограничиться рассмотрением D и E слоев атмосферы Земли. Следовательно, основным источником является некогерентное сверхфоновое дециметровое излучение, которое формируется на высоте 80–110 км за счет заселения ридберговских состояний. Результаты измерений здесь оказались не только зависящими от времени суток (с заметно изменяющимися в течение дня показаниями), но и существенно зависящими от геомагнитного состояния ионосферы. Это означает, что используемые приемные устройства принципиально не в состоянии обеспечить устойчивость измерений.

Наиболее активно в мировой практике пассивной локации поверхности Земли используется поглощение и отражение СВЧ излучения на частоте 1,4 ГГц. Авторы программ SMOS и других считают, что приборы, работающие на этой частоте, являются наиболее чувствительными к изменению содержания влаги в почве и солености поверхностных вод мирового океана. В действительности, как будет показано ниже, использование частоты 1,4 ГГц обеспечивает наименьшую зависимость измеряемого сигнала от мешающих факторов в процессе изменения этих величин.

Следующей фундаментальной научно-технической проблемой является калибровка измерительной аппаратуры (установленной на спутнике или летательном аппарате), требующая связать показания датчиков с определяемыми физическими параметрами почвы (влажности, структуры и химического состава, теплопроводности, магнитных свойств отражающей поверхности и т.д.) или соленостью океанских вод, включая волнение и приповерхностную температуру. Главная трудность состоит в том, что количество параметров, от которых зависит отражающее свойство поверхности, превышает число измеряемых параметров, т.е. задача является неоднозначной. Дополнительные трудности возникают при проведении калибровки на спутнике, поскольку излучающий слой расположен ниже. Поэтому спутник одновременно принимает как прямое сверхфоновое СВЧ излучение, приходящее из D и E слоев верхней атмосферы, так и прошедшее через эти слои отраженное от поверхности Земли. В результате калибровка измеряемой аппаратуры должна осуществляться с учетом наложения этих двух излучений.

Традиционный метод спутниковой калибровки называется косвенным и заключается в следующем. Необходимые соотношения между выходными сигналами датчиков и искомыми физическими величинами должны определяться путем прямого сравнения

измеряемых сигналов с абсолютным стандартом этих величин до запуска спутника, т.е. калибровка производится непосредственно на Земле. Обычно здесь используется спектральное окно с центральной частотой 1,413 ГГц и шириной полосы 27 МГц, которое соответствует космическому излучению с длиной волны 21 см. При этом считается, что влияние эффекта Фарадея на результаты измерений оказывается незначительным. Принципиальным недостатком такой калибровки является полное игнорирование вариаций показаний датчиков во времени, обусловленных наличием некогерентного сверхфонового излучения D и E слоев атмосферы в широком диапазоне частот (включая частоту 1,4 ГГц), интенсивность которого периодически изменяется во времени. Необходимо также учитывать ослабление интенсивности излучения за счет неоднородностей нижней атмосферы. Для выхода из сложившейся ситуации целесообразно перейти к двухчастотному методу измерений, пользуясь рассмотренными ниже особенностями спектра излучения D и E слоев ионосферы, а также тем обстоятельством, что на частоте 1,4 ГГц интенсивность СВЧ излучения пропорциональна квадрату концентрации свободных электронов, а на частоте 5 ГГц ее первой степени.

Перейдем теперь к обсуждению особенностей спектра некогерентного СВЧ излучения верхней атмосферы. В период солнечной активности в верхней атмосфере Земли формируется высокочастотное (СВЧ) сверхфоновое излучение, интенсивность которого значительно превышает типичные уровни микроволновых всплесков Солнца. Анализ различных возможностей генерации обнаруженного СВЧ излучения показал, что наибольший вклад в результирующую картину спектра вносят переходы между коллективными ридберговскими состояниями нейтральных компонентов неравновесной двухтемпературной плазмы, возбуждаемых под действием солнечного света и потока электронов, выбрасываемых из ионосферы при столкновении с электронами.

Ридберговскими называются такие высоковозбужденные состояния, которые расположены вблизи границы ионизации и характеризуются наличием бесконечной последовательности уровней энергии, сходящихся к порогу ионизации. Ридберговские атомы и молекулы обладают одним возбужденным слабосвязанным электроном, состояние которого характеризуется энергией уровня с заданным главным квантовым числом n и угловым моментом электрона l относительно ионного остова. Энергии уровней с большими угловыми моментами не зависят от l (орбитально вырожденные состояния). Именно эти состояния являются статистически наиболее устойчивыми, поскольку электрон проводит основное время на больших расстояниях от ионного остова. Процесс, приводящий к формированию вырожденных состояний с большими угловыми моментами электрона, называется l -перемешиванием. В верхней атмосфере он протекает быстро и является необратимым. В результате квантовые различия между возбужденными атомами и молекулами исчезают, и спектр излучения не зависит от их химического состава. Процесс l -перемешивания протекает в достаточно плотной нейтральной газовой среде с плотностью большей 10^{12} см^{-2} , что соответствует высоте 110 км. Критерием его эффективности, напрямую связанным с плотностью среды, является условие, когда в объеме электронного облака ридберговской частицы A^{**} (радиуса a , где a – борковский радиус) имеется, по крайней мере, одна нейтральная молекула кислорода или азота. Взаимодействие между ними приводит к формированию квазимолекул $A^{**}M$,

потенциальные кривые которых классифицируются по величине углового момента L слабо связанного электрона относительно центра молекулы M . Формы потенциальных кривых определяются характеристиками упругого рассеяния медленного электрона на этой молекуле.

В верхней атмосфере Земли в нормальных геомагнитных условиях формируется слабоионизованная двухтемпературная рекомбинационная плазма. В ночное время на высоте 110 км она характеризуется электронной температурой порядка K и концентрацией свободных электронов n_e порядка 10^5 см^{-2} . Ридберговские состояния здесь заселяются незначительно и практически не влияют на распространение спутниковых сигналов GPS. В дневное время, когда температура электронов возрастает до $2 \cdot 10^3 K$, а их концентрация увеличивается на порядок, система GPS также сохраняет свою работоспособность.

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.

Мы уделяем внимание следующим аэрозольным процессам, протекающим в нижних слоях ионосферы: зарядка аэрозольных частиц, распределение частиц по зарядам, конденсация молекул на поверхности аэрозольных частиц, взаимодействие аэрозольных частиц с электромагнитными волнами в ионосфере, рассеяние и поглощение электромагнитных волн заряженными частицами, фотозарядка частиц.

Зарядка аэрозольных частиц и рекомбинация зарядов на их поверхности являются процессами первостепенной важности для физики и химии плазмы ионосферы и околоземного пространства. До сих пор мы не располагаем ни надежными данными о дисперсном и химическом составе аэрозолей ионосферы, ни методами расчета скоростей аэрозольных процессов при произвольном соотношении параметров газа носителя и размеров аэрозольной частицы.

Хотя важная роль процессов зарядки в пылевой плазме осознана уже давно, более или менее надежные теоретические результаты получены только для зарядки частиц в непрерывном режиме. Процессы рекомбинации ион–частица оставались и остаются открытыми для дальнейших исследований. В случае рекомбинации трудности вызваны необходимостью учета процессов, ответственных за энергетический баланс. Именно, необходимо в явном виде вводить потери кинетической энергии налетающего на частицу иона, без чего невозможен захват иона на орбиты с отрицательной энергией. Такой процесс может идти в присутствии третьего тела (обычно это молекула газа-носителя) или возбуждения низколежащих состояний в самой частице. Поэтому соответствующие выражения для эффективности рекомбинации должны зависеть от плотности газа-

носителя. Совершенно ясно, что процесс рекомбинации идет на расстояниях, не превышающих среднюю длину пробега иона. Далее, после столкновения с третьим телом, ион должен попадать на достаточно глубокие уровни энергии, иначе время жизни слабо связанного диполя (ион+частица) оказывается очень коротким, и ион оказывается на свободе. До настоящего времени эти параметры (длина рекомбинации и энергия) вводились «руками». Наша цель показать, как можно устранить этот произвол.

Нами предложена теория зарядки частиц, основанная на методе сшивки потоков. Именно, сшивались потоки заряда из области, удаленной от частицы на расстояния, превышающие длину свободного пробега, и потока с расстояния порядка длины свободного пробега, таким образом, чтобы на границе сшивки оба этих потока сравнивались. Такой подход позволяет ввести радиус лимитирующей сферы, зависящий только от коэффициента диффузии ионов в газе-носителе. Этот радиус имеет порядок длины свободного пробега иона. Далее, эта теория позволяет принять во внимание вклад связанных состояний, зависящий от размера частицы. Причина этого состоит в том, что в свободно-молекулярной зоне налетающий ион не испытывает соударений с молекулами газа-носителя и поэтому неизменно возвращается в диффузионную зону. Таким образом, в соответствии с этой теорией, только те траектории, которые пересекают поверхность частицы, способны дать вклад в сечение рекомбинации. Между тем, более глубокие состояния ионов обязаны давать вклад, не зависящий от размера частицы, т.к. шансов у такого иона вернуться в непрерывный спектр практически нет.

Представлены разработки методов локальных аппроксимационных моделей для задач фильтрации, оценивания параметров и спектрально-временного анализа наблюдений геомагнитного поля. Исходными материалами для указанных разработок послужил ряд публикаций. В разработках реализованы обобщения существующих методов построения моделей, связанных с использованием традиционных регрессионных моделей. Особенности разработанных методов, характерные для задач цифровой обработки наблюдений геомагнитного поля, состояли в построении аппроксимационных моделей на малых локальных интервалах, использовании моделей упрощенного вида с малым числом параметров, учете связей для моделей и реализации фильтрации на базе решений задач условной минимизации.

Были рассмотрены два формата (варианта) наблюдений от системы ИНТЕРМАГНЕТ. Для наблюдений в формате «definitive data» погрешности наблюдений для $Y_n(T_i)$, $n = 0, 1, 2, 3$, задавались некоррелированными нормально распределенными случайными числами с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $\sigma_0^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$.

Задачи фильтрации, в общем случае, состояли в том, что по заданным наблюдениям геомагнитного поля $Y_1(T_i)$, $Y_2(T_i)$, $Y_3(T_i)$, $Y_0(T_i)$ находились оценки $H_1(T_i)$, $H_2(T_i)$, $H_3(T_i)$, $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$, которые были бы близки, в определенном смысле, исходным функциям координат. Задачи оценивания параметров и спектрально-временного анализа основывались на математических технологиях задач фильтрации.

Результаты, полученные в 2016 г.

- Сформулированы принципы нового направления «Радиохимическая физика нижней ионосферы». Это направление исследует динамику формирования ридберговских комплексов в результате возникновения высоковозбужденных слабо связанных комплексов, излучение внешнего электрона которых создает помехи для распространения электромагнитных волн радиодиапазона.
- Сформулированы принципы введения случайных факторов в уравнения распространения электромагнитных полей (случайный фактор – концентрация рассеивателей, их резонансные свойства) и влияние на них солнечной активности. Указывается важная роль заряженных рассеивателей в процессах распространения электромагнитных волн в ионосфере.
- В рамках теории случайных графов сформулирован и решен ряд задач (растрескивание грунтов, распространение эпидемий и др.), связанных с перколяционными процессами и образованием гигантской компоненты в случайном графе.
- Показано, что использование частоты 1,4 ГГц обеспечивает наименьшую зависимость измеряемого сигнала от мешающих факторов.
- Разработаны методы локальных аппроксимационных моделей для задач фильтрации и спектрально-временного анализа наблюдений геомагнитного поля. В разработках реализованы обобщения существующих методов построения моделей, связанных с использованием традиционных регрессионных моделей. Особенности разработанных методов состоят в построении аппроксимационных моделей на малых локальных интервалах, использовании моделей упрощенного вида с малым числом параметров, учете связей для моделей и реализации фильтрации на базе решений задач условной минимизации.

8. Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России

Номер госрегистрации: АААА-А16-116021950126-8 (0145-2015-0018)

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

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

В рамках реализации мероприятий Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № I.4П «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче» в 2016 г. на основе современных ГИС-технологий был представлен обновленный инструмент для хранения, обработки и распространения пространственных данных о минерально-сырьевых ресурсах России.

В 2016 г. обновлена тематическая база геоданных проекта, включающая цифровые геологические и минерагенические карты, карты физических полей Земли, карты расположения месторождений полезных ископаемых и т.п. Данные, содержащиеся в базе, оформлены в виде ГИС-слоев. Для организации внешнего доступа данные были объединены в картографические сервисы, опубликованные на ГИС-сервере ГЦ РАН. Сервисы обеспечивают доступ к данным на основе стандартных протоколов обмена пространственными данными Открытого геопространственного консорциума (OGC – Open Geospatial Consortium).

Важнейшим результатом работ в 2016 г. была адаптация алгоритмов кластерного анализа, созданных в рамках дискретного математического анализа (ДМА), для их использования в качестве инструментов геообработки в среде ГИС. Алгоритмы кластеризации «DPS» и его модификация, «Монолит», «Роден-2» были интегрированы в настольное приложение платформы ESRI ArcGIS в качестве сервисов геообработки. Для эффективной работы с опубликованными сервисами был создан прототип геопортала, обеспечивающий интерактивный доступ к данным и алгоритмам кластерного анализа.

8.1. Тематическая база геоданных проекта

8.1.1. Пространственные данные

Основу базы геоданных проекта составляют тематические цифровые карты, ранее изданные в формате ГИС российскими исследовательскими учреждениями [7]. Среди них: геологическая карта России масштаба 1:2 500 000 [3]; прогнозно-минерагеническая карта по твердым полезным ископаемым для территории России, увязанная с материалами по странам СНГ масштаба 1:2 500 000 [9]; минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) масштаба 1:2 500 000 [11]; прогнозно-минерагеническая карта перспектив нефтегазоносности масштаба 1:2 500 000

[8]. Наряду с данными по всей территории РФ в 2016 г. была добавлена информация по фокальному региону Дальнего Востока.

Частью базы геоданных также являются тематические слои (аномалии гравитационного поля и аномалии геоида), построенные на основе моделей гравитационного поля EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) [19] и EIGEN-6с2 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) [14], а также следующие геофизические данные [7]: аномальное гравитационное поле, создаваемое осадочным чехлом и плотностными неоднородностями консолидированной коры [15]; изостатические аномалии гравитационного поля (отдельными слоями – полное поле, длинноволновая и локальная составляющие) [15, 17]; глубины границы Мохоровичича [20]; мощность осадочного чехла [15, 16]. Перечисленные данные хранятся в общей файловой базе проекта в виде отдельных слоев (векторных или растровых). Для более гибкого и удобного доступа слои данных были объединены в отдельные картографические сервисы и опубликованы на ГИС-сервере ГЦ РАН (рис. 8.1).

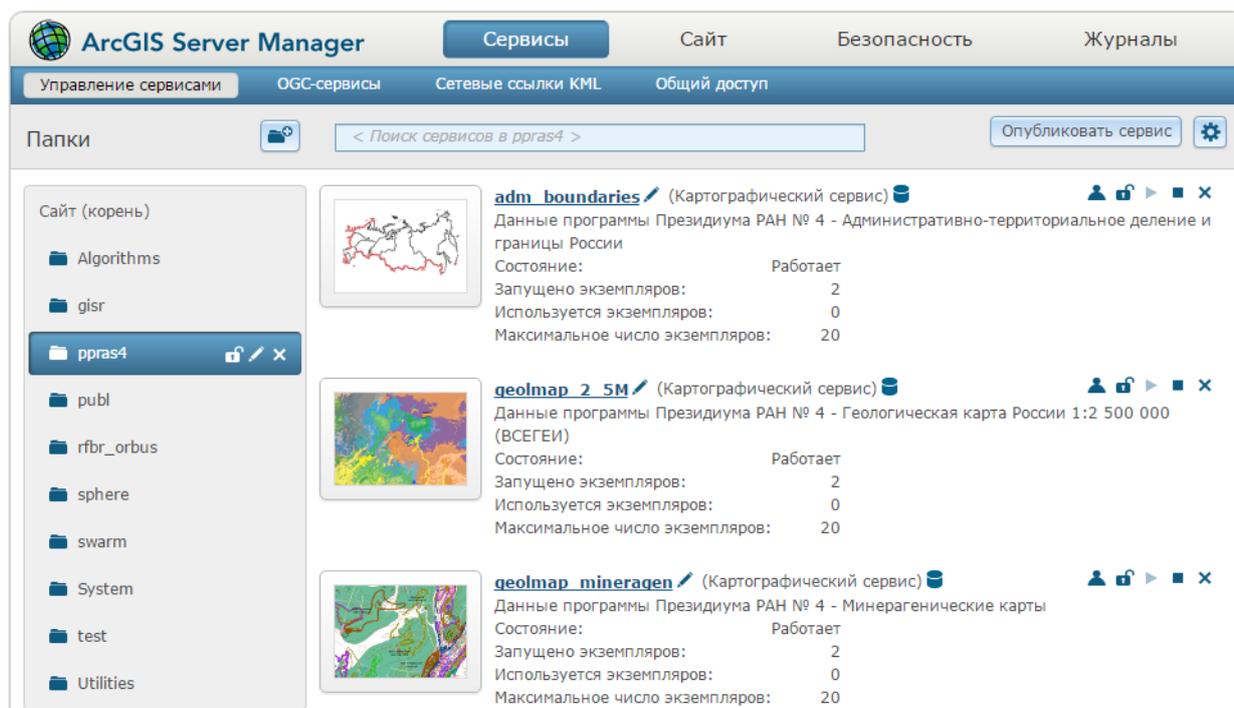


Рисунок 8.1 – Картографические сервисы, опубликованные в рамках проекта на сервере ГЦ РАН

8.1.2. Геопортал проекта

Доступ к формируемой базе осуществляется средствами специализированного геопортала (рис. 8.2). Интерфейс геопортала включает три основных элемента: левое боковое меню, область карты и правое боковое меню. Левое боковое меню представляет собой динамически формируемый каталог картографических сервисов, опубликованных на ГИС-сервере ГЦ РАН. Каталог представляет собой дерево директорий. Директории

первого уровня – это собственно картографические сервисы, например, «Гравитационное поле» или «Минерагенические карты». Данный список является динамически обновляемым и позволяет отображать изменения в базе геоданных проекта. Каждый сервис состоит из ряда отдельных слоев. После выбора конкретного сервиса пользователь может отметить интересующие его слои. Выбранная информация отобразится на интерактивной карте в центральной области. Текущая легенда появится в правом боковом меню. Легенда динамически обновляется по мере подключения слоев. Меню легенды также снабжено инструментом для изменения прозрачности тех или иных слоев, что позволяет одновременно анализировать несколько наборов данных.

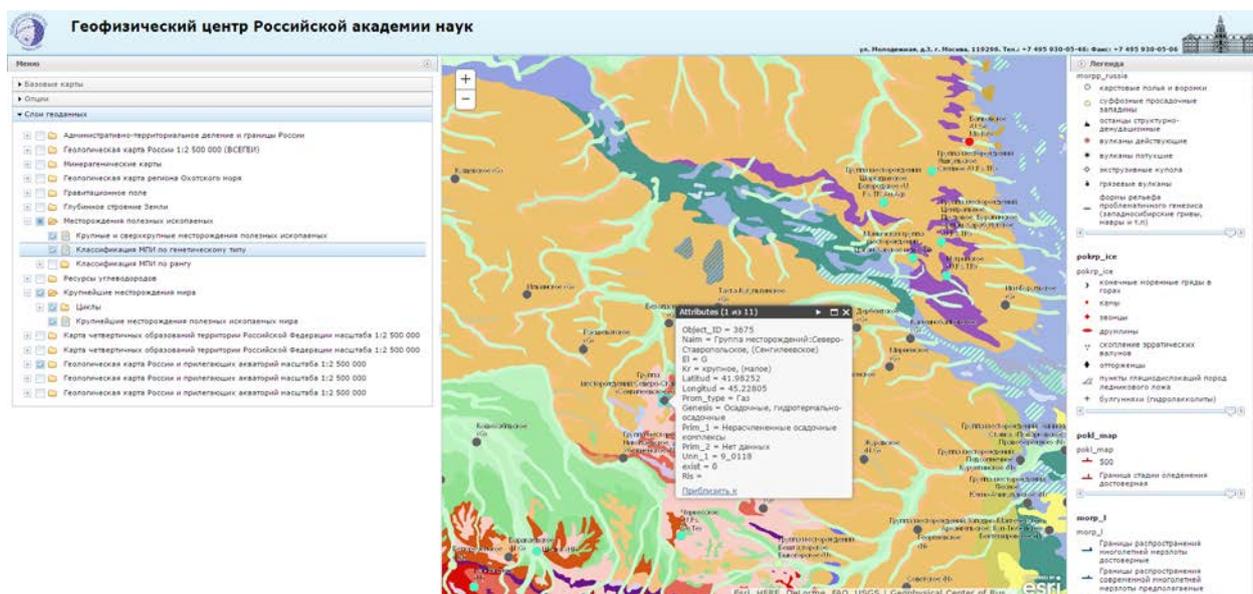


Рисунок 8.2 – Веб-страница геопортала с перечислением доступных картографических сервисов. Во всплывающем окне представлена атрибутивная информация по выбранному месторождению

Помимо данных, хранящихся в базе ГЦ РАН, функционал геопортала позволяет подключать и отображать картографические сервисы, опубликованные сторонними организациями. В 2016 г. к геопорталу были подключены: Карта четвертичных образований территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 (ВСЕГЕИ) [10]; Геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1:2 500 000 (ВСЕГЕИ) (обновление 2014 г. с учетом территории полуострова Крым) [3]; Крупнейшие месторождения мира (ГГМ им. В. И. Вернадского РАН) [13]. Доступ к сервисам осуществляется по стандартным протоколам OGC. Таким образом, реализуется подход инфраструктуры пространственных данных, при котором данные находятся под управлением ответственных организаций, а доступ к ним осуществляется средствами единого централизованного геопортала.

8.2. Внедрение алгоритмов кластерного анализа в среду ГИС

В рамках настоящего проекта на этапе 2015 г. [18] были проведены работы по адаптации алгоритмов кластерного анализа, разработанных в рамках ДМА [1, 2, 4, 5, 6, 12], для их интеграции в среду ГИС в качестве инструментов геообработки. В 2016 г. алгоритмы «DPS», Модификация «DPS», «Монолит» и «Роден-2» были обновлены, их программный код существенно переработан. Перечисленные алгоритмы кластеризации, реализованные на языке Python в среде ESRI ArcGIS, были объединены в виде инструментов-скриптов в пакет (toolbox) «Кластеризация» (рис. 8.3).

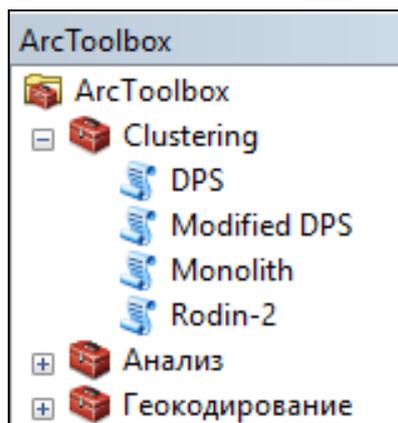


Рисунок 8.3 – Панель инструментов геообработки ArcToolbox с добавленной библиотекой алгоритмов кластеризации «Кластеризация» (Clustering)

При запуске инструмента-скрипта появляется диалоговое окно, в котором пользователь вводит параметры, необходимые для работы алгоритма. На входные данные инструментов-скриптов накладываются определенные ограничения. Все рассматриваемые алгоритмы работают только с точечными данными, и при подаче на вход программы данных другого типа возникнет сообщение об ошибке. Сообщения об ошибках также возникают, если пользователем введена величина параметра, не попадающая в заранее заданный диапазон значений.

Результаты применения инструментов-скриптов сохраняются в виде новых файлов в ГИС-совместимом формате и могут быть добавлены на текущую карту. Инструменты геообработки из пакета «Кластеризация» были успешно испытаны на реальных и синтетических примерах с различными значениями свободных параметров. На рис. 8.4 представлены результаты применения инструмента-скрипта «Роден-2» к сейсмическим данным (эпицентры землетрясений для региона Байкала).

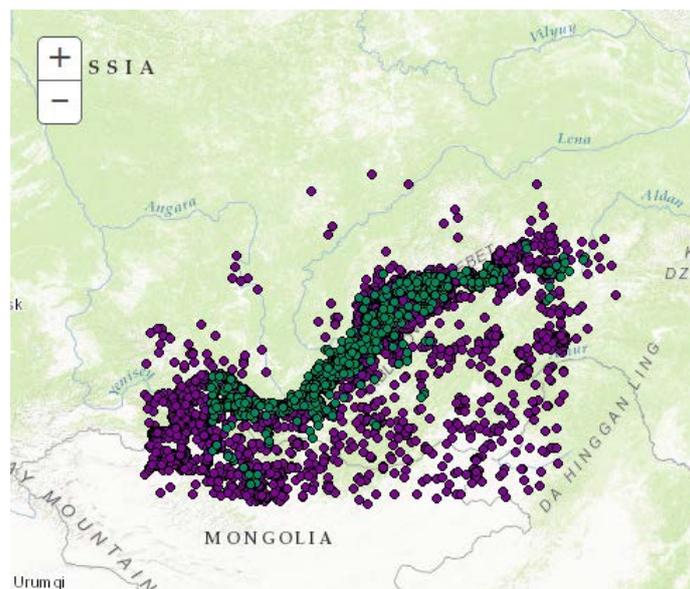


Рисунок 8.4 – Результаты применения алгоритма «Роден-2» к сейсмическим данным (эпицентры землетрясений для региона Байкала), свободные параметры: $\alpha = 0,7$; $P = -2,7$

Список использованных источников

1. **Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н.** Дискретные совершенные множества и их применение в кластерном анализе // Кибернетика и системный анализ. 2014. № 2. С. 17–32.
2. **Агаян С.М., Соловьев А.А.** Выделение плотных областей в метрических пространствах на основе кристаллизации // System Research & Information Technologies. 2004. № 2. С. 7–23.
3. Андрианова О.Н., Гурьева И.Г., Кузнецова Г.Н., Липатов А.В., Сирота Ю.Н., Чистякова Т.Н. Государственная геологическая карта масштаба 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2011.
4. **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.** Математические методы геоинформатики. I. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002. № 2. С. 104–122.
5. **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А.** Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 16. С. 109–125.
6. **Гвишиани А.Д., Диаман М., Михайлов В.О., Гальдеано А., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Граева Е.М.** Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. 2002. № 7. С. 13–28.
7. **Красноперов Р.И., Соловьев 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
8. Нелюбин В.В., Щербакова С.В., Копылова Н.Н. Прогнозно-минерагеническая карта перспектив нефтегазоносности масштаба 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2010.
9. Петров О.В. (гл. ред.), Феоктистов В.П. (ред.) и др. Прогнозно-минерагеническая карта на твердые полезные ископаемые территории России, увязанная с материалами по странам СНГ масштаба 1:2500000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2008.

10. Петров О.В., Морозов А.Ф., Чепкасова Т.В. и др. (ред. коллегия) Карта четвертичных образований территории Российской Федерации масштаба 1:2500000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2014.
11. Роднов Ю.Н., Белкина И.Л. (ред.) и др. Минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) масштаба 1:2500000. М.: ФГУНПП «Аэрогеология», 2009.
12. **Соловьев А.А., Шур Д.Ю., Гвишиани А.Д., Михайлов В.О., Тихоцкий С.А.** Определение вектора магнитного момента при помощи кластерного анализа результатов локальной линейной псевдоинверсии аномалий ΔT // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404, № 1. С. 109–112.
13. Ткачев А.В., Булов С.В., Рундквист Д.В., Похно С.А., Вишневская Н.А., Никонов Р.А. Веб-ГИС «Крупнейшие месторождения мира» // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 47–59.
14. Förste C., Bruinsma S.L., Shako R., 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. Abstract No. EGU2012-2821.
15. 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. No. 2. P. 25–144. DOI: 10.2205/2001ES000062
16. 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, No. 1. PP. 19–33. DOI: 10.2205/2002ES000082
17. Kaban M.K., Schwintzer P., Reigber Ch. A new isostatic model of the lithosphere and gravity field // Journal of Geodesy. 2004. Vol. 78, No. 6. P. 368–385. DOI: 10.1007/s00190-004-0401-6
18. **Nikolov B.P., Zharkikh J.I., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M.** Integration of data mining methods for Earth science data analysis in GIS environment // Russian Journal of Earth Sciences. 2015. Vol. 15. ES4004. DOI: 10.2205/2015ES000559
19. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal of Geophysical Research. 2012. Vol. 117. B04406. DOI: 10.1029/2011JB008916
20. Stolk W., Kaban M.K., Beekman F., Tesauro M., Mooney W.D., Cloetingh S.A.P.L. 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

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

Номер гос. регистрации: АААА-А16-116021950121-3 (0145-2015-0014)

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

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

Целью проекта является: создание научной и методической основы для геомагнитного сопровождения наклонно направленного бурения глубоких скважин в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) и повышения точности подземной ориентации в условиях спорадических возмущений геомагнитного поля в высоких широтах, связанных с магнитными бурями. В рамках проекта поставлены и выполнены следующие задачи: разработка методики выделения спорадических и систематических вариаций геомагнитного поля на временных масштабах от минут до суток; исследование характеристик геомагнитных бурь, выделение экстремальных возмущений геомагнитного поля и выявление их источников; сравнительные оценки амплитуд геомагнитных возмущений и допустимых отклонений направления ствола скважины, оценка необходимой коррекции показаний подземной магнитометрической аппаратуры, применяемой для ориентации буровой колонны; развитие системы мониторинга геомагнитного поля для оперативного и полномасштабного контроля геомагнитной обстановки в АЗРФ и смежных регионах с помощью стационарных наземных обсерваторий высшего международного стандарта качества ИНТЕРМАГНЕТ.

9.1. Влияние высокоширотных геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин

Стабильное определение заданного направления бурения и коррекция магнитометрических данных являются важной задачей обеспечения заданных параметров скважины. Минимизация погрешностей достигается путем применения современных моделей главного магнитного поля, моделей локальных магнитных аномалий и аэромагнитной съемки, а также измерениями вариаций поля на поверхности Земли непосредственно в районе проведения работ и фильтрацией спорадических геомагнитных возмущений, создаваемых мощными электрическими токами, текущими, в основном, в ионосфере Земли. Во время магнитных бурь в высокоширотной ионосфере развиваются струйные электрические токи мощностью до десятков миллионов ампер. Во время магнитных бурь средней интенсивности амплитуда спорадических вариаций в Арктике составляет порядка 1000 нТл, а при экстремальных бурях – 5000 нТл и более. Такая амплитуда спорадических вариаций внешнего магнитного поля Земли становится сравнима по величине с горизонтальной составляющей полного вектора напряженности поля, по которой осуществляется подземная навигация. В результате возникает недопустимо большая погрешность определения географического направления в

подземном пространстве по показаниям компонентного скважинного магнитометра-инклинометра, расположенного в немагнитной капсуле на конце буровой колонны.

С помощью методов, применяемых для расчета фактического профиля ствола скважины, проведены оценки влияния спорадических возмущений магнитного склонения во время магнитной бури на отклонения траекторных параметров. Отклонение фактического профиля ствола скважины при бурении в условиях высокой геомагнитной возмущенности проанализировано на примере магнитной бури 28–31 октября 2003 г. Для оценки поместим локации виртуальных (модельных) скважин с заданными параметрами в точки расположения двух геомагнитных обсерваторий, одна из которых находится в авроральном овале (обс. Соданкюля, код SOD, географические коорд.: 67°2' N, 26°4' E), а вторая – вблизи границы полярной шапки (Хорзунд, код HRN, 77°0' N, 15°3' E). На рис. 9.1 представлены среднечасовые значения магнитного склонения D , зарегистрированные на обсерваториях SOD и HRN. На обс. SOD (рис. 9.1а) возмущения в D компоненте 29–30 октября достигали 4–5° от спокойного уровня $D \approx 9^\circ$. На обс. HRN (рис. 9.1б) амплитуда возмущения D достигает 15° (спокойный уровень $D \approx 4^\circ$).

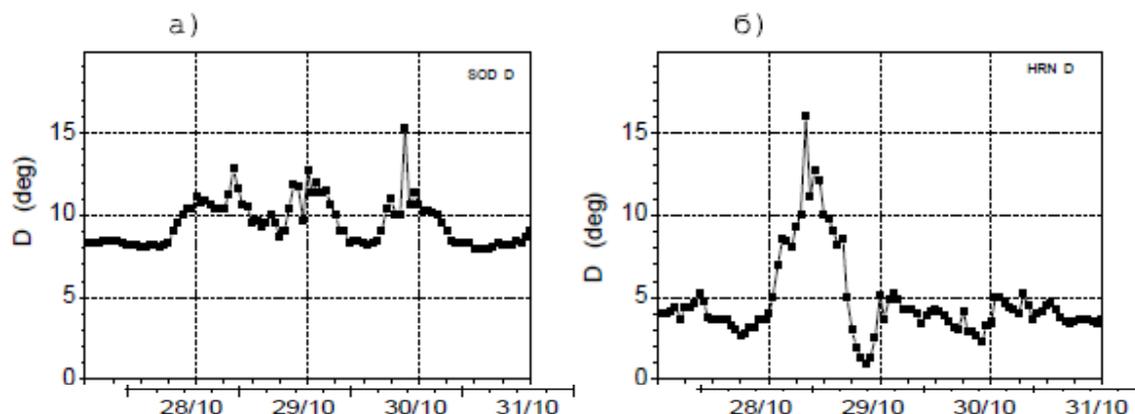


Рисунок 9.1 - Среднечасовые вариации геомагнитного склонения D в период 28–31 октября 2003 г. на обс. SOD (а) и HRN (б)

Технология скважинной инклинометрии предусматривает измерение в каждой точке ствола скважины зенитного угла (α) и азимута (φ), а также длины ствола от устья скважины до каждой точки измерения. В качестве основной 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 на истинный или магнитный север. Истинный азимут равен магнитному азимуту плюс величина восточного склонения, или минус величина западного магнитного склонения (на территории России восточное склонение).

Значения функций $\alpha(L)$ и $\varphi(L)$ известны только в некотором наборе точек измерения. Приращения координат ствола скважины за интервал между точками измерений определяются путем интегрирования по длине интервала. Обычно для расчета применяются методы минимума кривизны и кольцевых дуг, обеспечивающие плавную

стыковку участков траектории ствола. Приращения координат X , Y и Z в соседних точках замера i , $i+1$ вдоль длины ствола рассчитаны как

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

$$T = 180 \cdot L_{i,i+1} \cdot \operatorname{tg} K/2 / \pi \cdot K \quad (2)$$

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

По данным о приращениях можно рассчитать смещение (A_i) по горизонтали i -ой точки профиля от устья скважины, а также азимут смещения (ψ_i):

$$A_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (4)$$

$$\Psi_i = \operatorname{arctg} Y_i / X_i \quad (5)$$

Геометрические параметры определяют фактический профиль ствола скважины и дают возможность выявить места резкого искривления с помощью расчета угла пространственного искривления и интенсивности искривления:

$$\Delta \gamma_{i,i+1} = \arcsin \sqrt{\sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \alpha_i \cdot \cos(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - (\sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_{i+1})^2 + \sin^2 \alpha_{i+1} \cdot \sin^2(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} \quad (6)$$

$$J_{i,i+1} = \Delta \gamma_{i,i+1} / 10 \quad (7)$$

Рассчитаем траекторные параметры профиля скважины в предположении, что скважинный инклинометр работает в условиях геомагнитной бури с характеристиками, представленными на рис. 9.1. Примем следующие условия: длина ствола скважины 1000–1500 м, интервал между точками замеров 20 м, изменение зенитного угла с шагом $0,25^\circ$, начиная от 15° , начальные координаты ствола $Y_0 = 50$ м; $X_0 = 200$ м; $Z_0 = 1000$ м. Заданное значение φ на глубине 1500 м составляет 8° для SOD и 4° для HRN, что соответствует спокойным геомагнитным условиям. Далее значение параметра φ изменяется согласно вариации D , представленной на рис. 9.1а и 9.1б. Координаты для каждой точки измерений и смещение точек профиля скважины по горизонтали рассчитываются соответственно по формулам (1)–(4). На рис. 9.2 представлены магнитный азимут смещения ψ и интенсивность искривления J , рассчитанные соответственно по (5)–(7). Места резкого искривления ствола скважины хорошо видны в вариациях параметра J , который измеряется в градусах на 10 м расстояния. Сравнивая изменение параметра J и D , можно видеть, что повышенная интенсивность искривления соответствует периоду резких изменений D .

Анализ результатов показывает, что вариации магнитного склонения вносят большую неопределенность в измерения скважинного инклинометра, который ориентируется на магнитный север. Во время магнитной бури 28–31 октября 2003 г. спорадические возмущения магнитного склонения достигали 10° . Расчеты геометрических координат модельной траектории ствола скважины, проведенные для условий реальной магнитной бури, показывают, что интенсивность искривления ствола при больших

градиентах склонения может достигать 3° на 10 м смещения по длине ствола, что превышает допустимые значения.

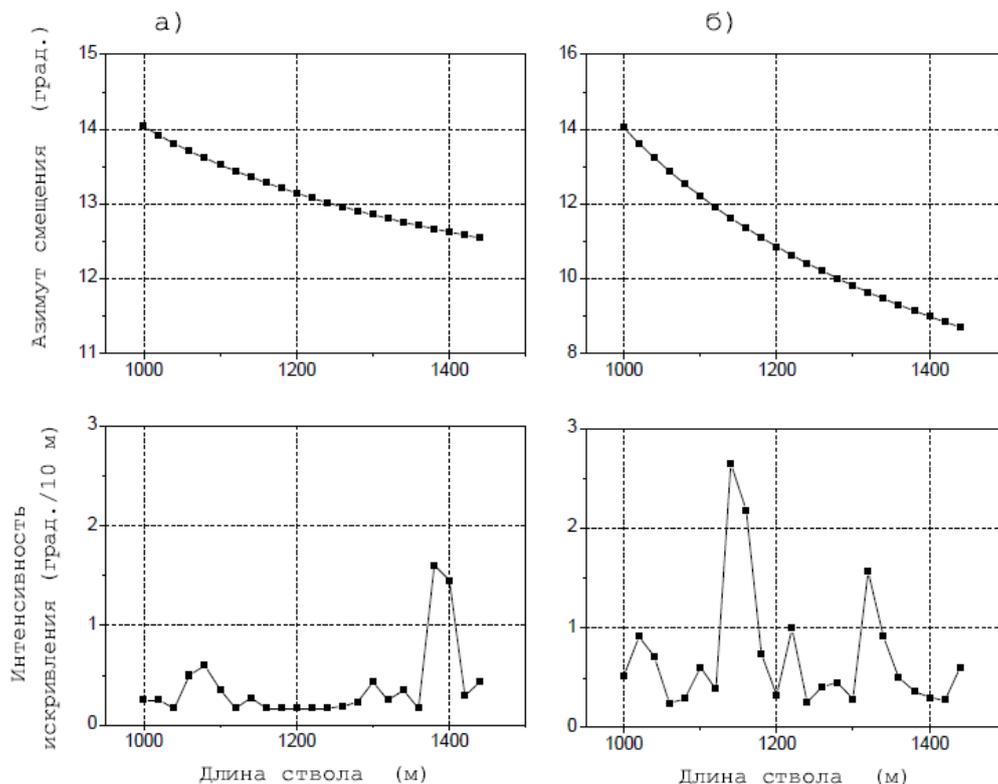


Рисунок 9.2 – Азимут смещения и интенсивность искривления ствола, рассчитанные по магнитным данным за 30 октября, obs. SOD (а) и 29 октября, obs. HRN

9.2. Особенности геомагнитных возмущений при импульсе динамического давления солнечного ветра во время геомагнитной бури

Отклик магнитосферно-ионосферной системы на экстремальные события космической погоды, к которым в первую очередь относятся магнитные бури, является главной причиной магнитных возмущений. Сжатие магнитосферы под действием резкого изменения динамического давления (Pd) солнечного ветра (СВ) вызывает глобальные изменения крупномасштабных электрических токов в магнитосфере и ионосфере. Сравнение изменений параметров ММП и СВ и вариаций высокоширотных геомагнитных индексов PC и AE показывает, что индексы следуют за ростом и падением Pd с момента контакта фронта давления с дневной магнитопаузой. При импульсах Pd , приходящих на фоне южного ММП во время главной фазы магнитной бури, магнитный эффект высокоширотных ПТ охватывает все широты от северного до южного полюса и выражается в появлении на магнитограммах средне- и низкоширотных станций отрицательной бухты в X -компоненте. Это означает, что импульс Pd ведет к интенсификации ПТ, так что их магнитный эффект может превышать на дневной стороне

эффект тока на магнитопаузе, тогда как на ночной стороне на Земле наблюдается обычная положительная бухта, свидетельствующая об усилении тока на магнитопаузе. Впервые найдено экспериментальное подтверждение теоретического предсказания, что при больших отрицательных значениях B_Z ММП и повышенном Pd ток на магнитопаузе может фактически заменяться ПТ зоны 1.

9.3. Оперативное определение наиболее спокойных дней по данным наземных обсерваторий

В 2016 г. была создана программная реализация данного алгоритма оперативного определения самых спокойных дней по данным наземных обсерваторий в системе MATLAB. Методы дискретного математического анализа (ДМА) впервые были применены для выделения дней с наиболее низкой геомагнитной активностью. Основная идея подхода ДМА заключается в построении меры аномальности $\mu(t)$, которая принимает значения от -1 до 1 . Значения меры в интервале $[-1; 0,4]$ соответствуют спокойному поведению поля. Автоматизированный метод оперативного выделения спокойных дней состоит в ежемесячном ранжировании каждых суток в зависимости от количества содержащихся в них минут с $\mu < 0,4$ и выделении дней, для которых такое количество максимально. На основании новых спокойных дней для каждой обсерватории были построены кривые векового хода, которые были сопоставлены с кривыми, полученными согласно модели на основе спутниковых данных. Было показано, что предлагаемый новый подход более точно отражает реальные вековые вариации.

9.4. Развитие системы измерения магнитного поля в северных широтах

В 2016 г. были подготовлены окончательные (definitive) 1-минутные данные непрерывных наблюдений магнитного поля Земли обсерватории «Санкт-Петербург» (IAGA-код SPG) в соответствии со стандартом ИНТЕРМАГНЕТ. Обработаны данные по трем ортогональным компонентам X , Y и Z (векторный магнитометр, частота 1 Гц); модулю полного вектора напряженности (скалярный магнитометр, частота 0,33 Гц); склонению и наклонению (деклинометр/инклинометр на базе немагнитного теодолита, частота 2 раза в неделю). После фильтрации выбросов ряды сглаживались сплайном для построения регулярной базисной линии по каждой компоненте. Окончательные данные были получены после усреднения секундных данных и добавления суточных базисных значений. Амплитуда базисной линии по каждой компоненте не превышает 5 нТл, что удовлетворяет требованиям. Была подготовлена официальная заявка на включение обсерватории в сеть геомагнитных наблюдений высшего международного стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. 9 июня 2016 г. обсерватория «Санкт-Петербург» была официально включена в сеть и стала десятой полномасштабной обсерваторией ИНТЕРМАГНЕТ в РФ. Ее функционирование и развитие обеспечиваются совместно ГЦ РАН и СПбФ ИЗМИРАН. Накапливаемым массивам данных были присвоены DOI.

10. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем

Номер гос. регистрации: АААА-А16-116021950123-7 (0145-2015-0020)

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

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

В 2016 г. поставлены и выполнены следующие задачи: (1) Разработка методики, алгоритмов и программных средств для численной модели F области полярной ионосферы с заданием входных управляющих параметров солнечного ветра непосредственно по экспериментальным данным спутниковых измерений; (2) Модельные расчеты распределения электронной плотности в F области полярной ионосферы и анализ систематических изменений крупномасштабных ионосферных неоднородностей при изменении входных параметров; (3) Обработка данных ионосферных и магнитных измерений вдоль траекторий пролетов спутников Swarm; (4) Отработка и тестирование методики расчета, алгоритмов и программ расчета плотности продольных токов магнитосферного происхождения, текущих вдоль силовых линий геомагнитного поля, по магнитным данным. Формирование базы данных значений этих токов в высокоширотных областях северного и южного полушарий.

10.1. Методика, алгоритм и программное средство для численной модели F области полярной ионосферы

Высокоширотная ионосфера является наиболее сложной и нерегулярной областью ионосферы. Электронная плотность (Ne) максимальна на высотах F области ионосферы и на высотах ~300 км достигает 10^{12} м^{-3} . В F области на ионосферную плазму оказывают определяющее влияние электродинамические процессы, которые определяют дрейфы плазменных трубок. Электродинамика ионосферы, в свою очередь, контролируется параметрами солнечного ветра и его взаимодействием с магнитосферой Земли.

В рамках проекта разработана численная модель F области полярной ионосферы (PFIM – модель F области полярной ионосферы, Polar F-region Ionosphere Model) на основе эффективных вычислительных алгоритмов. Модель реализована в виде программного средства на языке Фортран, прошла проверку и валидацию. Проведена серия расчетов с целью получения новых данных о закономерностях структуры полярной ионосферы при изменении управляющих параметров.

Распределение электронной концентрации (Ne) в F области высокоширотной ионосферы зависит от динамики плазмы, ионообразования и химических потерь. Модель PFIM состоит из двух взаимосвязанных блоков. В первом, «конвективном», блоке рассчитываются геометрические и электродинамические параметры структуры

траекторий конвекции, вдоль которых дрейфуют трубки ионосферной плазмы. Траектории конвекции совпадают с линиями равного электростатического потенциала U в приближении двумерной ионосферной оболочки. Ионосферный потенциал возбуждается продольными токами (ПТ) магнитосферного происхождения, текущими вдоль силовых линий геомагнитного поля. Пространственное (3-D) распределение N_e в заданный момент времени определяется кумулятивным эффектом воздействия электрических полей конвекции и коротации на плазменную трубку, а также процессами ионизации и рекомбинации внутри трубки на протяжении нескольких предыдущих часов. Вертикальное распределение N_e в трубке зависит от степени ионизации, которая в первую очередь определяется временем, когда трубка находится в освещенной и неосвещенной областях ионосферы, а также в области высыпаний магнитосферных энергичных частиц.

В ионосферном блоке зависящие от времени и высоты конвективно-диффузионное уравнение для основного иона O^+ и уравнение непрерывности для обобщенного иона M^+ интегрируются в трубке, дрейфующей вдоль траекторий. Параметры нейтральной атмосферы вычисляются по полуэмпирической модели термосферы MSISE-90. На рис. 10.1 представлена блок-схема для реализации модели PFIM.

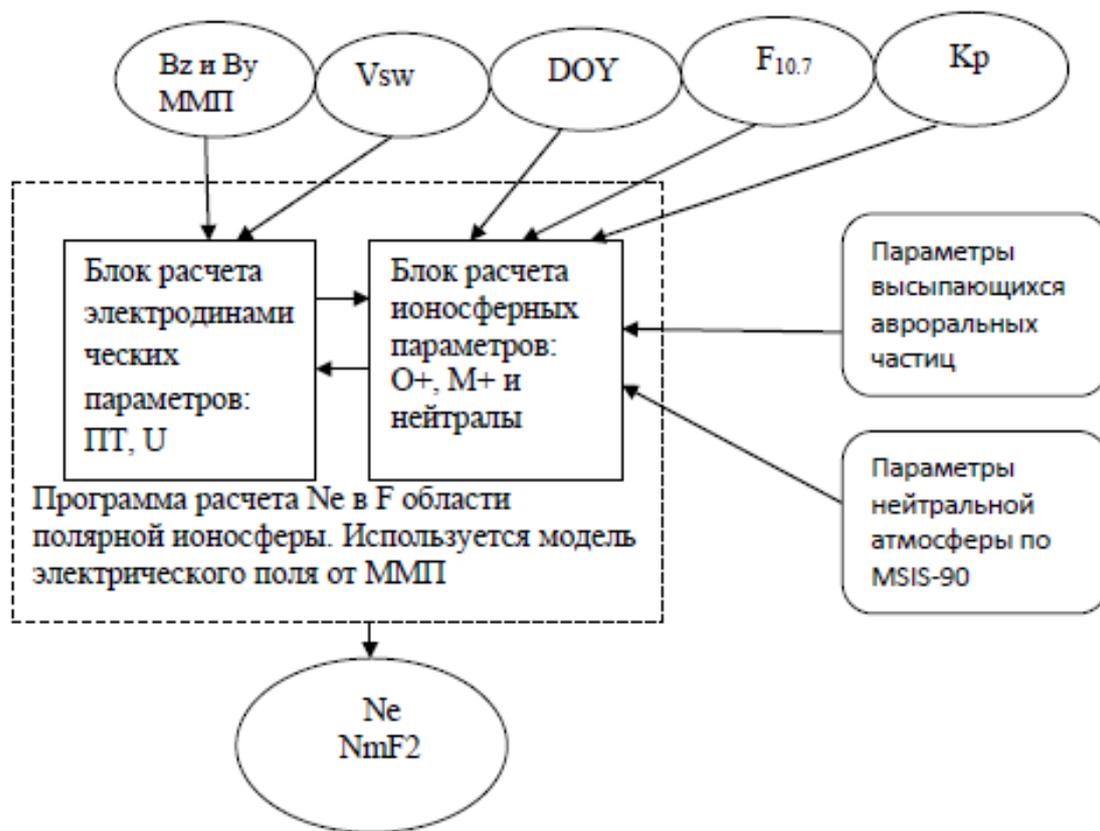


Рисунок 10.1 – Блок-схема модели PFIM. Входные и выходные параметры модели обозначены эллипсами, внешние источники данных – сглаженными прямоугольниками, расчетные блоки – прямоугольниками

10.2. Модельные расчеты распределения N_e в F области полярной ионосферы и анализ систематических изменений крупномасштабных ионосферных неоднородностей при изменении входных параметров

Систематические расчеты распределения N_e были проведены для условий изменяющихся входных параметров. С помощью моделирования был последовательно выделен эффект каждого из этих параметров.

а) *Эффект солнечного зенитного угла.* Под влиянием регулярных вариаций зенитного угла (сезонных и суточных) происходят самые большие изменения структуры N_e , т.к. изменяется положение солнечного терминатора и относительная площадь освещенной и неосвещенной частей ионосферы. Пример расчетов по модели PFIM представлен на рис. 10.2. Можно видеть, что структура полярной ионосферы и величина N_e изменяются как при смене сезона, так и внутри суток.

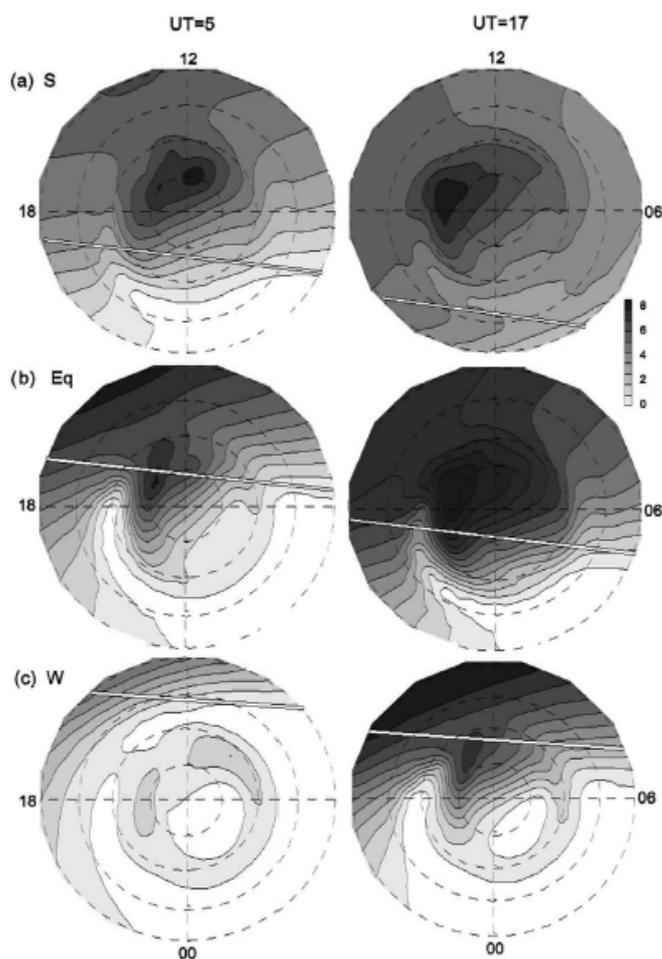


Рисунок 10.2 – Изолинии $NmF2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ для $UT = 5$ и $UT = 17$ для $DOY = 180$ (лето), $DOY = 80$ (равноденствие) и $DOY = 360$ (зима). Входные параметры модели: $B_z = B_y = 0 \text{ nT}$, $V_{sw} = 350 \text{ км/с}$, $K_p = 0$, $F10.7 = 150$. Внешняя граница находится на $M\text{Lat} = 50^\circ$. Положение терминатора обозначено на каждом рисунке прямой линией

б) *Эффект ММП B_z* . Изменения ориентации вектора ММП в плоскости $Y-Z$ контролируют ПТ, U и форму траекторий конвекции. Моделирование позволяет получить количественные оценки эффекта B_z и B_y компонент ММП по отдельности. Как показывают расчеты, в высоких широтах структура конвекции является определяющим фактором для распределения N_e . На рис. 10.3 представлены примеры изолиний $NmF2$ для условий южного ($B_z < 0$) и северного ($B_z > 0$) ММП.

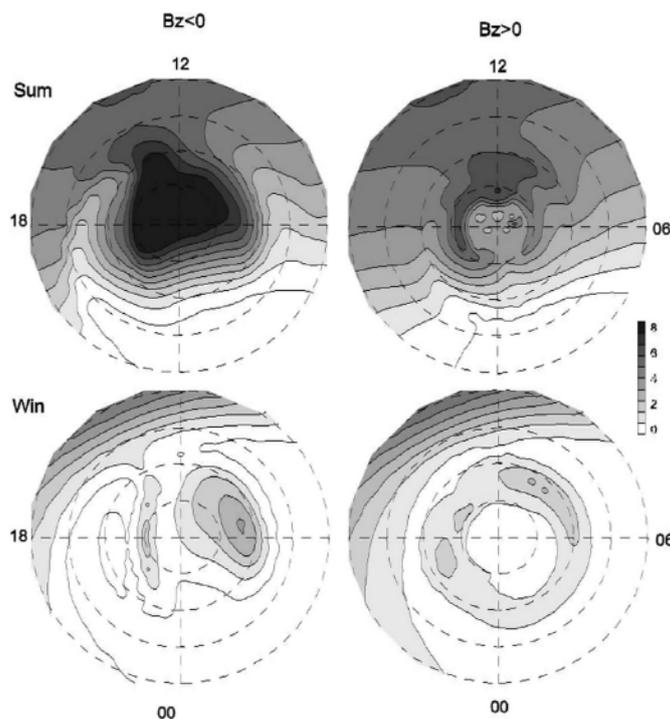


Рисунок 10.3 – Модельные распределения $NmF2 \cdot 10^5$ (cm^{-3}) для $B_z = -5$ нТ и $B_z = +5$ нТ для DOY=180 и 360. Входные параметры $B_y=0$, $V_{CB} = 350$ км/с, $K_p = 0$, $F_{10.7} = 150$, $UT=5$

в) *Эффект ММП B_y* . Азимутальная компонента ММП вносит асимметрию относительно меридиана полдень–полночь в структуру траекторий конвекции, и это отражается на форме и расположении крупномасштабных ионосферных неоднородностей. В частности, смена знака B_y приводит к тому, что язык ионизации огибает полярную шапку либо с утренней ($B_y > 0$), либо с вечерней ($B_y < 0$) стороны.

Таким образом, при численном моделировании можно выделить эффект, который обусловлен каждым из входных параметров модели. Наиболее важную роль в формировании крупномасштабных ионосферных неоднородностей в полярной ионосфере играет конвекция плазмы, и ориентация ММП является определяющим фактором для распределения N_e , особенно в зимний сезон. Эффект смены знаков B_z и B_y ММП проявляется в изменении общей структуры изолиний $NmF2$, что является следствием топологически различных типов конвективного дрейфа плазменных трубок под действием электрических полей магнитосферного происхождения.

10.3. Моделирование и оценка величины и распределения электрических полей магнитосферного происхождения, проникающих из полярных областей в средние широты

Эффект возбуждения потенциала в среднеширотной области и в полярной шапке противоположного полушария был проанализирован с помощью численной модели глобального распределения электрического потенциала в ионосфере Земли, основанной на решении двумерного уравнения непрерывности ионосферно-магнитосферной токовой цепи. Если ПТ (в виде синусоидальной функции) задан только в северной полярной шапке, потенциал в южном полушарии появляется за счет ПТ перетекания между полярными шапками. На рис. 10.4 приведен график отношения между значениями $\Delta\Phi$ (разность потенциалов поперек шапки) в противоположных полушариях при изменении отношения ионосферных проводимостей. Получена нелинейная зависимость. При одинаковой проводимости в противоположную шапку проникает около 20% потенциала, а при увеличении проводимости полушария без источника тока эффективность проникновения резко уменьшается. Если же проводимость этого полушария меньше проводимости полушария с источником тока, то эффективность проникновения повышается вплоть до уровня 50%. Насыщение достигается при соотношении проводимостей 1:5, что приблизительно соответствует условиям летнего солнцестояния.

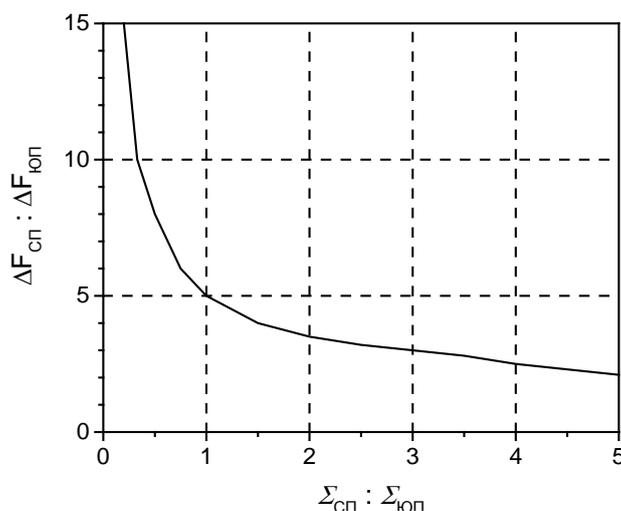


Рисунок 10.4 – Изменение соотношения между $\Delta\Phi$ в противоположных полушариях при изменении соотношения проводимостей в СП и ЮП

10.4. Обработка и тестирование методики расчета, алгоритмов и программ расчета плотности ПТ по магнитным данным. Формирование базы данных ПТ в высокоширотных областях северного и южного полушарий

В настоящее время данные трех спутников (А, В, С) миссии Swarm доступны на сервере Европейского космического агентства ESA (swarm-diss.eo.esa.int). С помощью скриптов, разработанных в среде MATLAB, организован эффективный доступ к серверу и

для заданных интервалов времени и координат производится скачивание данных ионосферных и магнитных измерений, а именно данные по плотности плазмы, 2 Гц и векторные магнитные данные, 1 Гц.

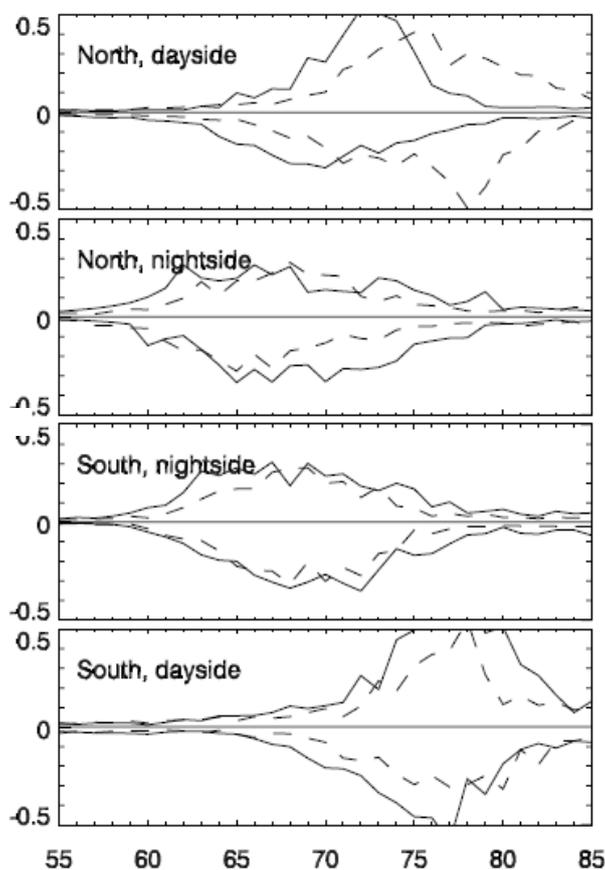


Рисунок 10.5 – Значения j_z ($\mu\text{A}/\text{m}^2$) в зависимости от MLat, усредненные за годовой период. ПТ, втекающие в ионосферу (положительные значения), и вытекающие из ионосферы (отрицательные значения), усреднены отдельно. Сплошные линии соответствуют северной зиме/южному лету, а пунктирные линии – сезону равноденствия

Алгоритм расчета плотности крупномасштабных ПТ по измеренному спутником над ионосферой (высота полярной орбиты Swarm около 500 км) магнитному сигналу основан на расчете градиента компоненты магнитного поля, направленной поперек траектории пролета (ось x вдоль траектории). Значение плотности ПТ j_z (ось z направлена вертикально) пропорционально пространственному градиенту измеренной вариации x -компоненты магнитной индукции \mathbf{B} . По методике, описанной на предыдущем этапе, для каждого пролета Swarm А, В, С в потоковом режиме были рассчитаны j_z в северной и южной высокоширотных областях за 2015 год и начато формирование базы данных по ПТ. К настоящему времени база содержит более 1,5 тыс. траекторий пролетов и профилей j_z . Значения j_z , усредненные за этот период, представлены на рис. 10.5.

11. Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий

Номер гос. регистрации: АААА-А16-116021950125-1 (0145-2015-0017)

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

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

Созданная в ГЦ РАН ГИС «Данные наук о Земле по территории России» является веб-ориентированной системой, направленной на решение задач организованного хранения, распространения и анализа геопро пространственных данных. База геопро пространственных данных (геоданных) ГЦ РАН содержит более 200 тематических слоев данных, объединенных в картографические сервисы, доступ к которым осуществляется средствами единого геопортала (<http://gis.gcras.ru/>). В рамках проекта программы ОНЗ РАН IV.8.7 «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика» велись работы по расширению тематического картографического сервиса «Геофизика», входящего в базу геоданных ГЦ РАН. В 2016 г. в указанный сервис были добавлены: карта вертикальных смещений литосферы (динамическая топография) для территории всего мира, а также карты зон возможного возникновения эпицентров землетрясений, распознанных алгоритмической системой FCAZ для регионов Кавказа, Крыма, горного пояса Анд и Калифорнии.

11.1. Расширение базы геопро пространственных данных ГИС

11.1.1. Вертикальные смещения литосферы, вызванные динамическим воздействием мантийной конвекции

Динамическая топография является результатом воздействия конвективных течений мантийного вещества на подошву литосферы, приводящего к смещению литосферы относительно равновесного состояния [7]. Данный параметр вносит вклад в рельеф Земли и в значительной степени определяет вариации его гравитационного поля и геоида. Динамическая топография является одним из важнейших параметров в моделировании мантийной конвекции. Она зависит от распределения вязкости в мантии и вариаций плотности в ней, которые связаны с изменениями ее температуры и химического состава. При составлении тематического слоя значения динамической топографии были рассчитаны на основании наиболее полных моделей Земли с учетом эффектов слабых границ, разделяющих литосферные плиты [5]. При расчетах были также эффективно учтены большие горизонтальные вариации вязкости верхней мантии [8]. Разница эффективной вязкости между литосферными плитами и слабыми зонами, разделяющими их, может превышать 3–4 порядка. Для получения исходных данных для слоя была использована компьютерная программа ProSpher [8]. Модель Земли, которая использовалась при расчете, основана на одной из последних томографических моделей S40RTS [9]. Разрешение модели составляет 40 гармоник в сферическом разложении. Для

пересчета сейсмических скоростей в вариации плотности и температуры использовались последние результаты, основанные как на экспериментальных, так и на модельных расчетах [10]. Горизонтальные вариации вязкости в мантии взяты из работы [8]. Была использована модель межплитовых границ, основанная на интегрированной глобальной модели деформаций литосферы GSRM [6]. Значения динамической топографии были рассчитаны для средней плотности верхней мантии 3340 кг/м^3 . Результат был представлен в виде растра, значение в каждом пикселе которого соответствует значению динамической топографии в метрах (рис. 11.1).

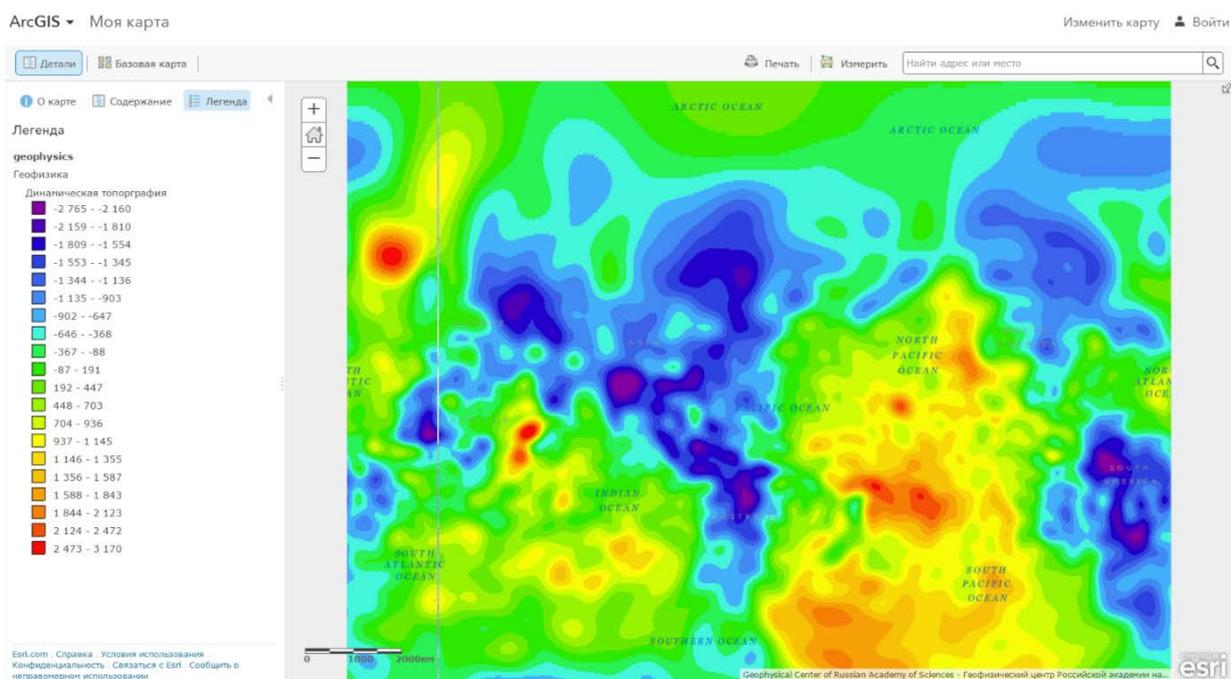


Рисунок 11.1 – Динамическая топография, приведенная к плотности верхней мантии 3340 кг/м^3 . Визуализация с помощью сервиса ArcGIS.com

11.1.2. Зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений, распознанных алгоритмической системой FCAZm для регионов Кавказа, Крыма, горного пояса Анд и Калифорнии

Другим набором данных, добавленным в базу геоданных ГИС в 2016 г., была цифровая информация о зонах возможного возникновения эпицентров землетрясений в высокосейсмичных регионах Кавказа, Крыма, горного пояса Анд и Калифорнии. Данные были получены по результатам применения алгоритмической системы FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [1, 2, 4], разработанной в Геофизическом центре РАН. В отличие от классических методов распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений, система FCAZ использует исключительно информацию об эпицентрах землетрясений.

При помощи системы FCAZ проведено распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений ($M \geq 7,75$) в горном поясе Анд Южной Америки, сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) в Калифорнии, значительных землетрясений на Кавказе ($M \geq 5,0$), а также в Крыму и на западе Северного Кавказа

($M \geq 4,5$). При распознавании зон возможного возникновения эпицентров землетрясений системой FCAZ были использованы каталоги землетрясений за следующие периоды: 1963–2013 гг. (горный пояс Анд); 1962–2008 гг. (Крым и Кавказ); 1960–2012 гг. (Калифорния). Для перечисленных регионов были проведены контрольные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Результаты этих контрольных экспериментов подтвердили достоверность результата. Для всех перечисленных регионов были подготовлены бинарные растры. На рис. 11.2 представлены зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений для регионов Крыма и Кавказа.

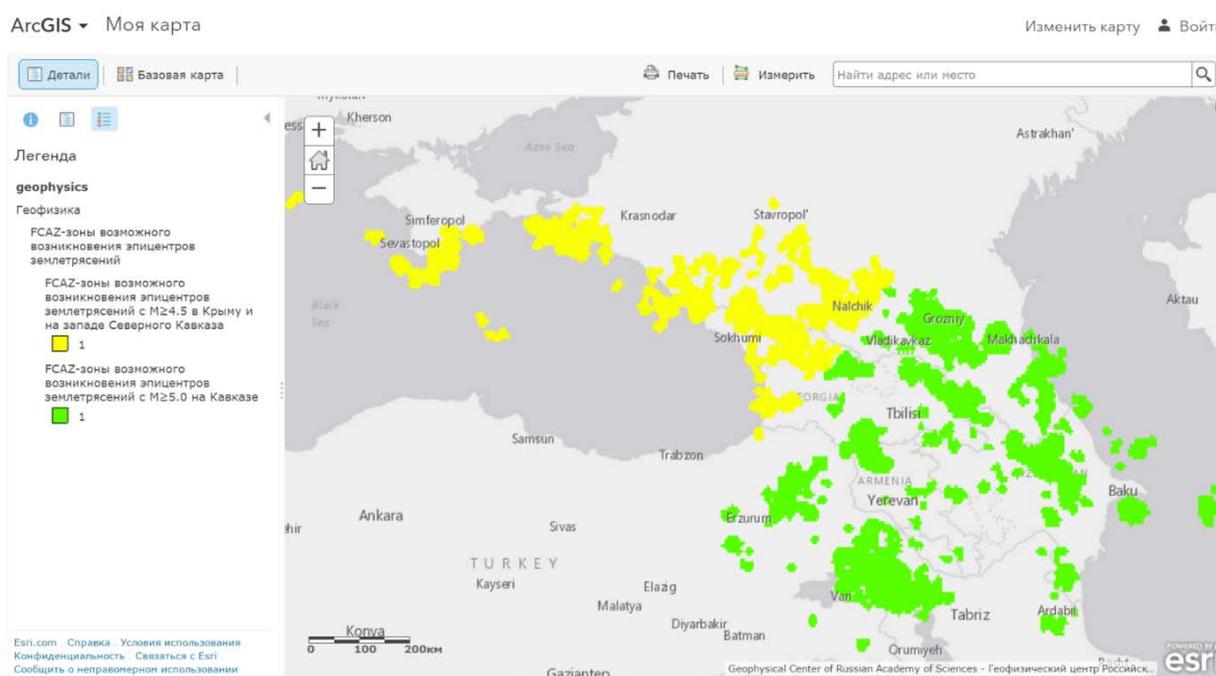


Рисунок 11.2 – Зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений в Крыму и на западе Северного Кавказа ($M \geq 4,5$, желтые области) и на остальной территории Кавказа ($M \geq 5,0$, зеленые области), распознанные системой FCAZ. Визуализация с помощью сервиса ArcGIS.com

11.1.3. Обновление сервиса «Политическая география»

Основу картографического сервиса «Политическая география» составляют карты административного деления России. В 2016 г. были обновлены два тематических слоя: карта административно-территориального деления и карта федеральных округов Российской Федерации. В атрибутивную таблицу слоя добавлены официальные названия субъектов Российской Федерации, а также их буквенные коды в соответствии со стандартом ISO 3166-2:RU.

11.2. Тематический геопортал

Основным инструментом интерактивного доступа к сервису «Геофизика» является тематический геопортал ГИС «Данные наук о Земле по территории России» (<http://gis.gcras.ru/>), основанный на свободно распространяемом ПО ESRI Geoportal Server. В 2016 г. была установлена обновленная версия геопортала.

В 2016 г. была представлена новая версия клиентского картографического приложения для доступа к сервисам геопортала. Основной функционал пользовательского приложения написан с использованием мощной библиотеки ArcGIS API for JavaScript 3.16, в основе которой лежит фреймворк Dojo Toolkit 1.11. Она позволяет легко работать с картами в веб-приложениях и производить обмен данными при помощи REST API с серверами на базе ArcGIS for Server и сервисами ArcGIS Online. Картографическое приложение создано с использованием современного подхода для описания модулей и их зависимостей с возможностью их загрузки в асинхронном режиме (AMD – Asynchronous Module Definition) [3, 11]. Интерфейс приложения реализован с использованием решений из фреймворка Dojo. Приложение включает в себя карту, меню с вкладками и легенду для добавленных слоев. Вкладка «Базовые карты» содержит набор различных базовых подложек, которые пользователь может поменять в любой момент (рис. 11.3).

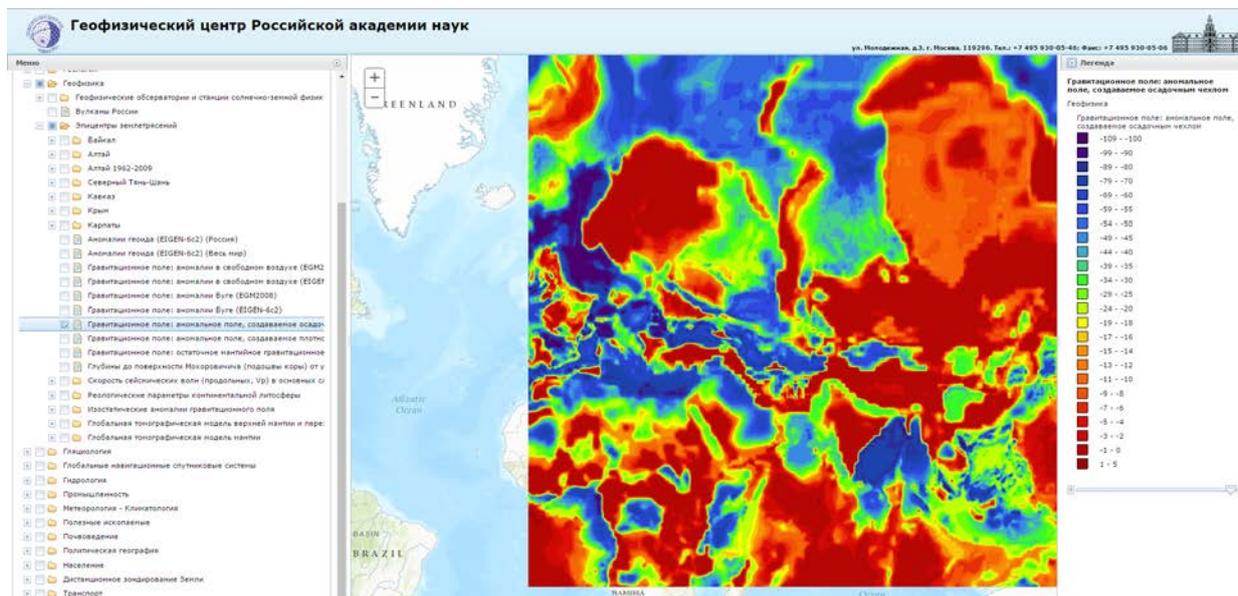


Рисунок 11.3 – Интерфейс разработанного картографического приложения. Слева представлен каталог картографических сервисов и ГИС-слоев, в центральной области представлена текущая карта, справа – текущая легенда

Список использованных источников

1. **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзебоев Б.А.** Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // *Геоинформатика*. 2013. № 2. С. 44–57.
2. **Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Агаян С.М.** О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 3–19. DOI: 10.7868/S0002333713060045
3. AMD. GitHub [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/amdjs/amdjs-api/wiki/AMD> (дата обращения: 13.05.2016).
4. **Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B.** Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013. Vol. 12. № 1. P. 1–10.
5. Kaban M.K., Petrunin A.G., Schmeling H., Shahraki M. Effect of Decoupling of Lithospheric Plates on the Observed Geoid // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35. PP. 1361–1373. DOI: 10.1007/s10712-014-9281-3
6. Kreemer C., Holt W.E., Haines A.J. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation // *Geophysical Journal International*. 2003. Vol. 154. PP. 8–34. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x
7. Mitrovica J.X., Forte A.M. A new inference of mantle viscosity based upon joint inversion of convection and glacial isostatic adjustment data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. Vol. 225. PP. 177–189. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.06.005
8. Petrunin A.G., Kaban M.K., Rogozhina I., Trubitsyn V. Revising the spectral method as applied to modeling mantle dynamics // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2013. DOI: 10.1002/ggge.20226.
9. Ritsema J., Deuss A., van Heijst H.J., Woodhouse J.H. S40RTS: a degree-40 shear-velocity model for the mantle from new Rayleigh wave dispersion, teleseismic traveltime and normal-mode splitting function measurements // *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 184. PP. 1223–1236. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04884.x
10. Steinberger B., Calderwood A.R. Models of large-scale viscous flow in the Earth's mantle with constraints from mineral physics and surface observations. // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 167. PP. 1461–1481. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03131.x
11. The new Dijit CheckBox Tree [Электронный ресурс]. URL: http://www.thejekels.com/dojo/cbtree_AMD.html (дата обращения: 13.05.2016).

12. Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли

Номер гос. регистрации: АААА-А16-116021950119-0 (0145-2015-0016)

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

Ответственный исполнитель: зам. директора по науке, чл.-корр. РАН А. А. Соловьев

В 2016 г. были продолжены исследования всплесков векового ускорения (ВУ) магнитного поля Земли (МПЗ) с использованием метода гравитационного сглаживания [1, 2, 4]. Был расширен временной диапазон анализируемых данных с 1997.0–2013.0 до 1991.0 до 2015.3, за который доступны окончательные и квазиокончательные данные нескольких десятков обсерваторий. Разработанный алгоритм распознавания позволяет распознавать всплески ВУ без необходимости прибегать к глобальной, изменяющейся во времени модели сферических гармоник. Метод был применен к глобальным данным, полученным из 27 обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ по всему миру (рис. 12.1) за период с 1991 по 2015 гг.

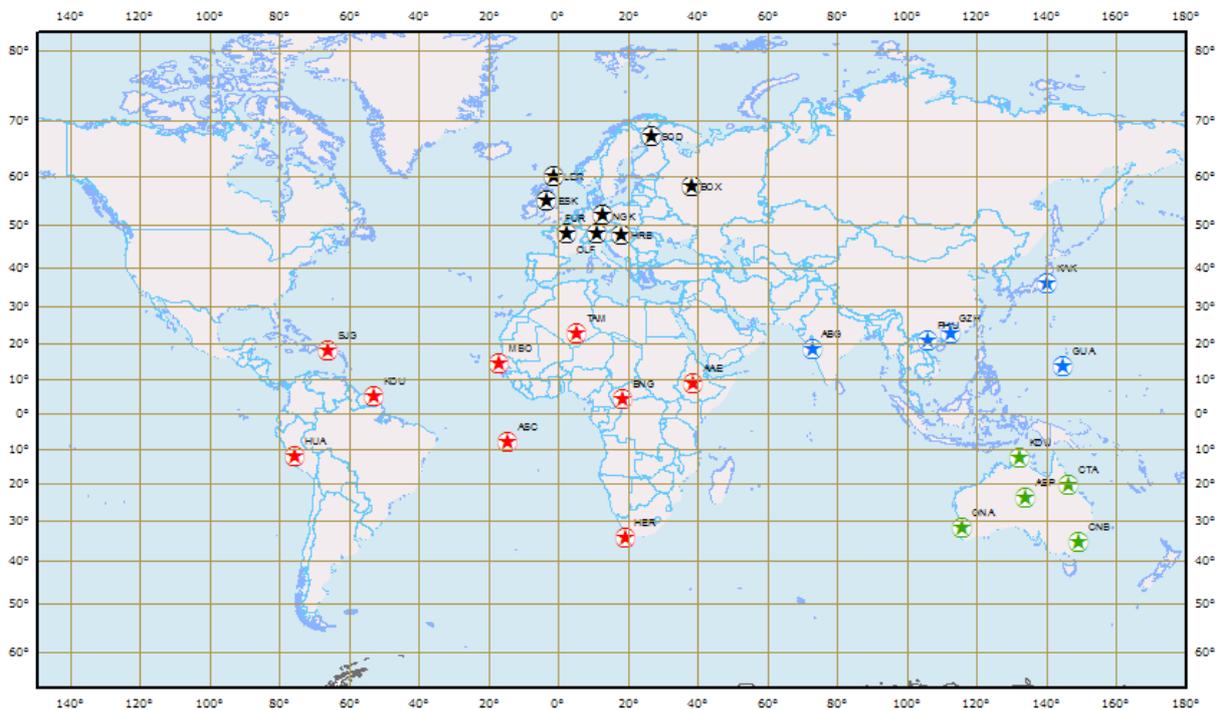


Рисунок 12.1 – Карта 27 обсерваторий, данные которых использовались для распознавания глобальных и региональных всплесков ВУ

На глобальном множестве всплески 2006, 2009 и 2012 гг., определенные прежде по моделям на базе спутниковых данных [5, 6], были успешно распознаны предложенным методом (рис. 12.2), демонстрируя в очередной раз его надежность. Но что более важно, метод позволил распознать новые всплески ВУ в 1996, 1999, 2002 и 2014 гг. (рис. 12.2).

Каждый из всплесков по времени лежит между парой последовательных геомагнитных джерков. Кроме того, распознанные всплески имеют чередующуюся полярность. Таким образом, эти новые результаты обосновывают проявление джерков на поверхности Земли как переходных процессов между двумя последовательными всплесками на поверхности ядра, а также шестилетнюю периодичность феномена однополярных всплесков ВУ на расширенном до 20 лет временном интервале.

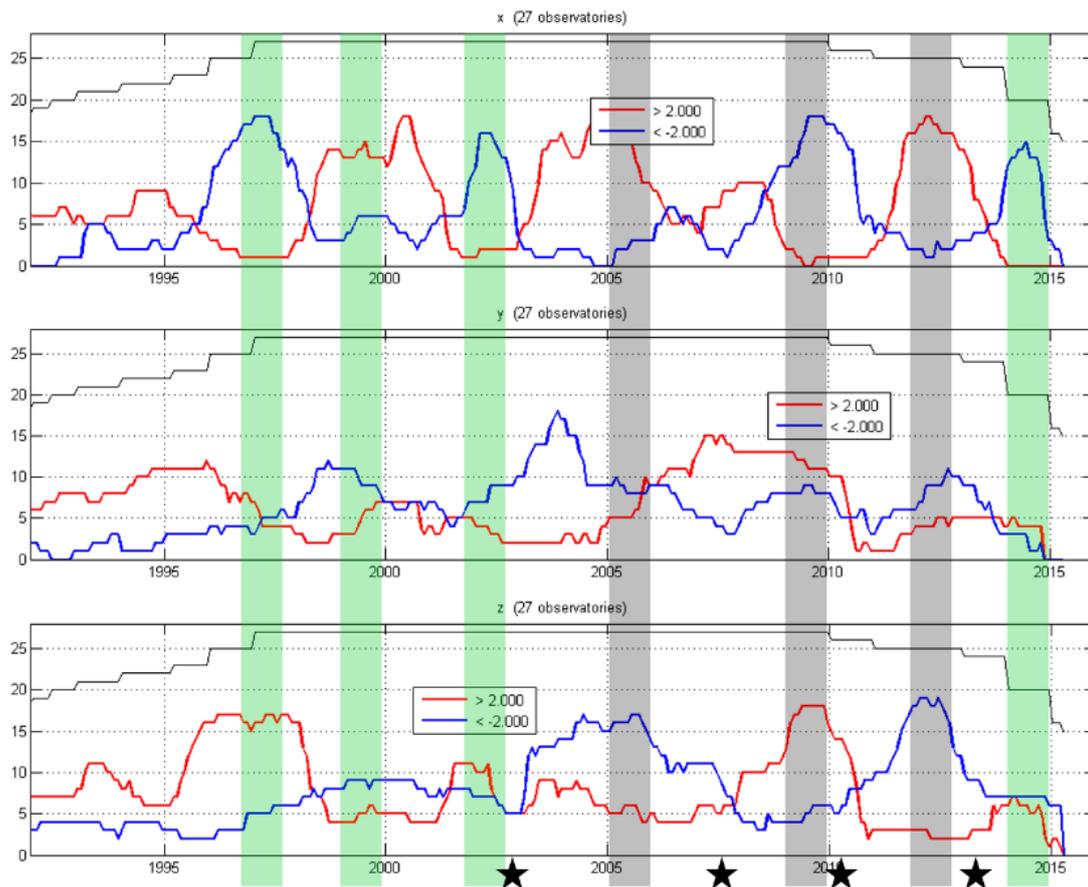


Рисунок 12.2 – Характеристические функции для записей $d^2X/\text{год}^2$ (верхний график), $d^2Y/\text{год}^2$ (средний график) и $d^2Z/\text{год}^2$ (нижний график) с порогом $A=2$ нТл/год², построенные для глобального множества обсерваторий. Временные отметки прежде изученных всплесков ВУ 2006, 2009 и 2012 гг. отмечены серыми прямоугольниками. Временные отметки вновь распознанных всплесков ВУ 1996, 1999, 2002 и 2014 помечены зелеными прямоугольниками. Времена известных геомагнитных джерков после 2000 г. отмечены звездами

Полученный результат является явным указанием на то, что предложенный метод выявляет повышенную энергию ВУ на глобальном уровне, несмотря на то, что (1) выбранные обсерватории обеспечивают ограниченное и неоднородное покрытие поверхности Земли и (2) ВУ не было продолжено вниз до границы ядро–мантия. Ограничение (2) обусловлено тем фактом, что данные, зарегистрированные в одной точке на поверхности Земли, невозможно продлить вниз. Отсюда следует, что в сигнале ВУ, обнаруженном нашим методом, доминируют максимальные масштабы в терминах разложения по сферическим гармоникам. Вместе с тем известно, что на границе ядро–мантия в сигнале всплесков ВУ доминируют средние масштабы, в особенности в

диапазоне степеней разложения от 4 до 6 [6]. Рис. 12.2 также показывает, что характеристическая функция для каждой из трех компонент меняет знак от одного всплеска к последующему. Таким образом, предложенный метод корректно детектирует изменение полярности всплесков на поверхности ядра на глобальном уровне. При этом важно отметить, что данная информация не содержится в энергетическом спектре ВУ и до настоящего момента могла быть извлечена только путем расчета ВУ на поверхности ядра.

Отдельное внимание следует уделить всплеску ВУ за эпоху 2014.5, который также отчетливо виден на глобальных характеристических функциях (см. рис. 12.2). Поскольку последний обнаруженный всплеск ВУ относится к 2012.5, данное обнаружение можно считать свидетельством существования джерка в период 2013–2014 гг., который недавно обсуждался в [11]. Опять же, это обнаружение полностью ожидаемо, поскольку финализирует серию всплеск–джерк–всплеск. Тот факт, что всплески ВУ на глобальных графиках несколько растянуты во времени по сравнению с теми, которые мы видим отдельно по регионам и конкретным обсерваториям (см. отчет за этап 2015 г.), связан с общим убеждением, что геомагнитные джерки (и, как следствие, всплески ВУ) не одновременно проявляются по всему миру; эпохи их возникновения могут варьироваться от одного региона к другому с разницей по времени до 2 лет.

Отдельно были изучены региональные особенности вновь обнаруженных всплесков ВУ с 1991 по 2015 гг. Для этого изучались результаты распознавания отдельно по регионам, помеченным разными цветами на рис. 12.1: атлантический (красный), южно-азиатский (синий), европейский (черный) и австралийский (зеленый). Всплеск ВУ в районе 2002.5 был распознан как в атлантическом, так и южно-азиатском секторах со всеми пороговыми значениями A . Этот всплеск также согласуется с теорией чередования всплесков ВУ и геомагнитных джерков [6], поскольку он предшествует джерку 2003 г. В атлантическом регионе наиболее явно он проявлялся на обсерватории HER, а в южно-азиатском регионе – на обсерваториях ABG, KDU и PHU. Во время всплеска 1999.5 в атлантическом регионе максимальная амплитуда ВУ проявлялась на обсерваториях AAE, BNG и HER, тем самым локализуясь в восточной части Африки. Ранее данный всплеск не изучался, прежде всего, ввиду недостатка спутниковых измерений, требуемых для построения адекватных моделей главного МПЗ. Тем не менее, в некоторых работах [8, 9] обсуждался геомагнитный джерк, который имел место в районе 1998–1999 гг. В соответствии с теорией возникновения джерков между двумя всплесками ВУ, такие всплески следует ожидать в районе 1996 и 1999 гг. Результаты [9] показывают, что проявление этих всплесков наиболее вероятно в австралийском и европейском секторах. Именно поэтому в глобальный набор данных в нашем исследовании мы добавили обсерватории Европы и Австралии (см. рис. 12.1). Результаты распознавания показали, что оба ожидаемых всплеска ВУ 1996–1997 и 1999–2000, сопровождавших джерк 1999 г., хорошо детектируются как локальные экстремумы на характеристических функциях $d^2X/\text{год}^2$ и $d^2Z/\text{год}^2$. Результаты региональных проявлений новых всплесков ВУ приведены в таблице 12.1. В ней представлена информация о наличии наиболее стабильных всплесков ВУ, т.е. видимых на характеристических функциях при разных пороговых значениях A . Кроме того, в таблице приведена информация об их полярностях ('+' – положительная, '-' – отрицательная).

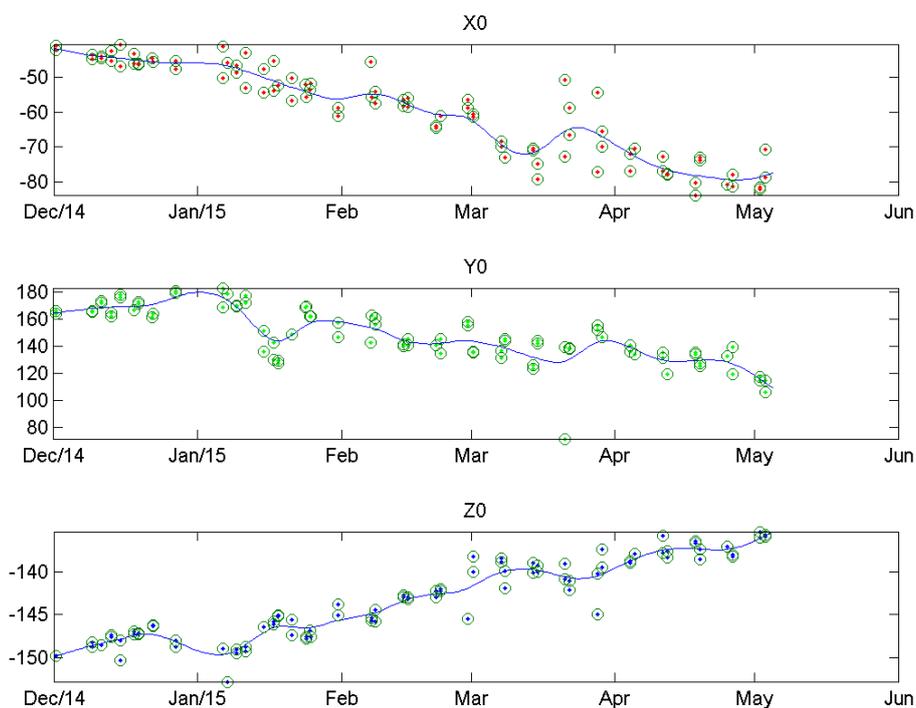
Таблица 12.1 – Региональные устойчивые импульсы ВУ на характеристических функциях и их полярности

Регион / год	Атлантический			Европейский			Южно-азиатский			Австралийский		
	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$	$d^2X/20d^2$	$d^2Y/20d^2$	$d^2Z/20d^2$
1996– 1997	-		+	-		+	-			-		+
1999– 2000	+		-	+			+				-	
2002– 2003	-	+				+	-	-		-		
2014– 2015	-	+	-	-	-	+	-		+	-		-

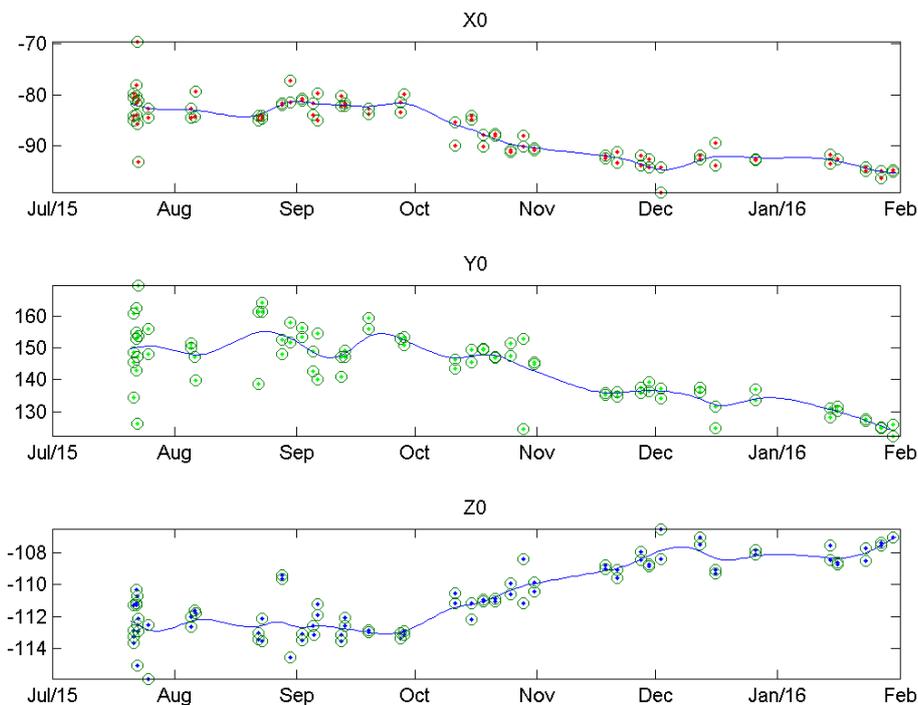
Кроме того, были выполнены верификация и подготовка окончательных (definitive) минутных данных непрерывных наблюдений МПЗ обсерватории «Климовская» (IAGA-код KLI, Архангельская обл.) [3, 10] за 2015 г. в соответствии с высшим стандартом качества ИНТЕРМАГНЕТ. Окончательные данные представляют собой временные ряды полных значений компонент МПЗ с шагом дискретизации 1 минута. Подготовка окончательных данных осуществлялась с использованием следующих записей: вариации трех ортогональных компонент МПЗ (X – северная, Y – восточная и Z – вертикальная), измеренные векторным магнитометром с частотой 1 Гц; модуль полного вектора напряженности МПЗ, измеренный скалярным магнитометром с частотой 0,33 Гц; значения склонения и наклонения, измеренные деклинометром/инклинометром на базе немагнитного теодолита с частотой около 2 раз в неделю.

На первом шаге обработки устранялись техногенные и приборные выбросы с помощью алгоритма SPs. Очищенные данные модуля полного вектора интерполировались кусочно-линейным методом и проходили процедуру передискретизации до частоты 1 Гц. На основе анализа очищенных вариационных данных производился поиск и устранение фрагментов рассинхронизации времени между записями скалярного и векторного магнитометров. По синхронизированным данным была выполнена подстройка коэффициентов преобразования векторного магнитометра. Полученные данные использовались для вычисления наблюдаемых базисных значений для компонент X , Y и Z в моменты времени, соответствующие измерениям склонения и наклонения за период с 1/12/2014 по 1/1/2016. После фильтрации выбросов в наблюдаемых базисных значениях каждый из трех полученных рядов интерполировался алгоритмом GrS (гравитационное сглаживание) с параметром $\lambda = 0,99999$ для построения регулярной базисной кривой по каждой компоненте. В соответствии с руководством ИНТЕРМАГНЕТ [7] регулярные базисные кривые были рассчитаны с шагом дискретизации 1 значение в сутки. Окончательные минутные данные компонент X , Y и Z были получены после проведения поминутного усреднения секундных данных, полученных на первом шаге обработки, и добавления ежесуточных базисных значений. Усреднение данных проводилось согласно алгоритму, описанному в руководстве ИНТЕРМАГНЕТ. В течение первой половины 2015 г. амплитуды окончательных базисных кривых по каждой компоненте превышают допустимый диапазон (рис. 12.3а). Однако их амплитуды за вторую половину 2015 г. существенно меньше и лежат в пределах 5 нТл (рис. 12.3б), что удовлетворяет

требованиям ИНТЕРМАГНЕТ [7]. В связи с повышением качества базисных кривых, начиная со второй половины 2015 г. было принято решение также подготовить квазиокончателные данные за первое полугодие 2016 г.



(а)



(б)

Рисунок 12.3 – Базисные кривые для компонент X, Y и Z обсерватории «Климовская» за первую половину 2015 г. (а) и за вторую половину 2015 г. (б)

Была подготовлена и отправлена в Операционный комитет ИНТЕРМАГНЕТ официальная заявка на включение обсерватории в сеть геомагнитных наблюдений высшего международного стандарта ИНТЕРМАГНЕТ (INTERMAGNET Observatory Application Form). К заявке прилагались рассчитанные окончательные данные за 2015 г. (рис. 12.4) и квазиокончательные данные за первое полугодие 2016 г. Полный комплект заявки также включал в себя наблюдаемые и интерполированные базисные значения за полтора года, а также файл среднегодовых значений МПЗ. В настоящее время заявка прошла предварительную проверку и находится на рассмотрении комитета по обсерваториям ИНТЕРМАГНЕТ.

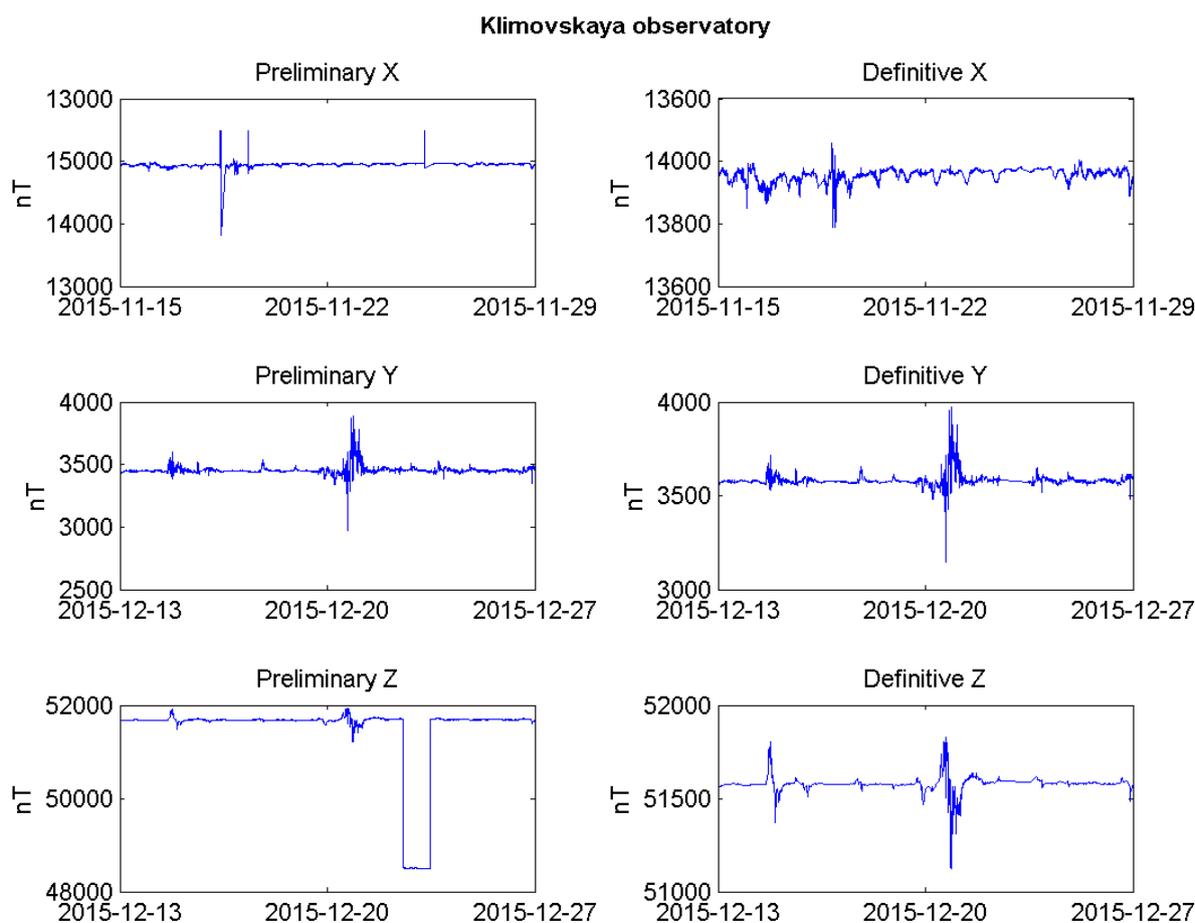


Рисунок 12.4 – Фрагменты предварительных (слева) и окончательных (справа) данных KLI за 2015 г.

Список использованных источников

1. Агаян С.М., Гвишиани А.Д., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Сглаживание временных рядов методами дискретного математического анализа // Российский журнал наук о Земле. 2010. Т. 11. RE40001. DOI: 10.2205/2009ES000436
2. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Гравитационное сглаживание временных рядов // Тр. ИММ УрО РАН. 2011. Т. 17, № 2. С. 62–70.

3. **Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Хохлов А.В.** Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Том 56, №3. С. 365–379.
4. **Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Dobrovolsky M. N., Kagan A.I.** Weighted gravitational time series smoothing // Russ. J. Earth. Sci. 2014. Vol. 14. ES3002. DOI: 10.2205/2014ES000543
5. Chulliat, A., Alken P., Maus S. Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 3321–3329. DOI: 10.1002/2015GL064067
6. Chulliat A., 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
7. St-Louis B. J., Sauter E. A., Trigg D. F., Coles R. L., Regimbald D. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6, 2012. 100 p. [Электронный ресурс] URL: http://www.intermagnet.org/publications/intermag_4-6.pdf
8. Manda M., Bellanger E., Le Mouél J.L. A geomagnetic jerk for the end of the 20th century // Earth and Planetary Science Letters. 2000. Vol. 183, Issue 3–4. P. 369–373. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00284-3
9. De Michelis P., Tozzi R. A Local Intermittency Measure (LIM) approach to the detection of geomagnetic jerks // Earth and Planetary Science Letters. 2005. Vol. 235, Issue 1–2. P. 261–272.
10. **Soloviev A.A., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I., Grudnev A.A., Vavilin E.V., Solovieva E.N.** Klimovskaya: a new geomagnetic observatory // Book of Abstracts of the International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies» / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
11. Torta J.M., Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Finlay C.C. Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 7933–7940. DOI: 10.1002/2015GL065501

13. Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений

Номер гос. регистрации: АААА-А16-116021950120-6 (0145-2015-0015)

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

Представленные здесь материалы предназначены для решения задачи автоматического распознавания предвестников магнитных бурь [1–4]. Описания результатов проекта ОНЗ РАН 2016 г. подразделены на две части.

1. В первой части предложены разработки метода распознавания предвестников начала магнитных бурь, который базировался на оценках обобщенных первых производных моделей сигналов с Sudden Commencement (SC). Данные разработки являются дополнительными по отношению к подходам из [5–7]. Построения моделей были произведены на основе частотно-временных представлений – аппроксимации во временной и частотных областях.

В рамках представленных материалов на исходном интервале рассмотрены наблюдения геомагнитного поля $H(Ti)$ на исходном интервале, $i = 0, \dots, N_f - 1$, на котором выделен интервал $N_{01} \leq i \leq N_{02}$, $N = N_{02} - N_{01} + 1$ – число точек. Аппроксимационные модели SC-сигналов на выделенном интервале были приняты в виде $y_M(c, Ti)$, c – вектор параметров. По значениям первых производных для $\dot{y}_M(c, Ti)$ предполагалось оценивать значения производных для исходных функций геомагнитного поля. В первом приближении полагалось, что появление SC-событий связано с большими значениями рассматриваемых производных.

1.1. Аппроксимационные полиномиальные модели $y_M(c, Ti) = c_1 + c_2 Ti + \dots + c_m (Ti)^{m-1}$ вычислялись для точек $N_{01} \leq i \leq N_{02}$ в форме цифровых линейных фильтров скользящего усреднения

$$\dot{H}^\circ(Ti) = \sum_{s=0}^k a_s H(T(i-s)), \quad k=1, \quad T=1$$

где a_s – весовые коэффициенты. Так, в двухточечном случае с $k=1$ оценки производных находились в виде разности

$$\dot{H}^\circ(Ti) = H(Ti) - H(T(i-1)).$$

1.2. Для SC-сигналов, фактически являющихся импульсными функциями, аппроксимационные модели вычислялись в форме кусочно-линейных сплайнов. Положим, что были заданы два интервала $0 \leq i \leq N_0 - 1$, $N_0 \leq i \leq N - 1$; на первом интервале определена линейная функция $y_M(c_1, Ti) = c_{11} + c_{21} Ti$, на втором – $y_M(c_2, Ti) = c_{12} + c_{22} Ti$. В точке $i = N_0$ осуществлялась стыковка моделей с помощью выполнения равенства: $c_{11} + c_{21} TN_0 = c_{12} + c_{22} TN_0$. При этом координаты векторов c_1, c_2

оказывались принадлежащими гиперплоскости $C_0 = \{c_1, c_2 : (c_{11} + c_{21}TN_0 = c_{12} + c_{22}TN_0)\}$. Для аппроксимационного функционала $S(c)$ нахождение параметров c° сплайновой модели реализовывалось на основе задачи его минимизации с ограничениями-равенствами

$$S(c) = \sum_{i=0}^{N_0-1} (H(Ti) - c_{11} - c_{12}Ti) + \sum_{i=N_0}^{N-1} (H(Ti) - c_{12} - c_{22}Ti)^2, \quad (c^\circ) = \arg\{\min_{c \in C_0} S(c)\}.$$

В данном случае ее решение находилось из системы линейных уравнений. В качестве оценок производных выступали кусочно-постоянные функции

$$\dot{H}^\circ(T(i)) = c_{21}^\circ, \quad 0 \leq i \leq N_0 - 1, \quad \dot{H}^\circ(T(i)) = c_{22}^\circ, \quad N_0 \leq i \leq N - 1.$$

1.3. С помощью полигармонических моделей может быть достаточно адекватно осуществлена аппроксимация SC-сигналов. Полигармонические модели представлялись в виде суммы синусоидальных составляющих

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

где $c^T = (a^T, b^T, \omega^T)$, a, b – векторы линейных параметров, $\omega^T = (\omega_1, \dots, \omega_L)$ – вектор частотных параметров размерности $(L, 1)$, $\omega \in \Omega_0^L$, Ω_0^L – допустимое множество частотных векторов. С использованием построений полигармонических моделей [8] находились оценки первой производной

$$\dot{H}^\circ(T(i)) = \sum_{l=1}^L (-\omega_l^\circ a_l^\circ \cos \omega_l^\circ Ti + \omega_l^\circ b_l^\circ \sin \omega_l^\circ Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N - 1.$$

1.4. Для ДПФ-моделей SC-сигналов допустимо осуществление аппроксимации с незначительными временными затратами, но с определенной потерей в точности. Для наблюдений $H(Ti)$ ДПФ-модели реализовывались на основе вычислений коэффициентов Фурье $c(k) = c_1(k) + jc_2(k)$

$$c(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} H(Ti) e^{-j \frac{2\pi}{N} ki}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1.$$

Действительные ДПФ-модели для SC-сигналов позволили вычислить оценки первой производной $\dot{H}^\circ(Ti)$, $a_k = (c_1(k) + c_2(k))/2$, $b_k = (c_1(k) - c_2(k))/2$

$$\dot{H}^\circ(Ti) = \sum_{k=0}^{N-1} (-\Delta\omega k a_k \cos \Delta\omega k Ti + \Delta\omega k b_k \sin \Delta\omega k Ti).$$

1.5. Для $H_{1p}(Ti), H_{2p}(Ti), H_{3p}(Ti)$ и $H_{0p}(Ti)$ -компонент и модуля вектора напряженности геомагнитного поля на некотором временном интервале с SC, $i = 0, \dots, N - 1$ от системы магнитных обсерваторий, где $p = 1, \dots, P_0$ – номер обсерватории, оценки обобщенных производных $\dot{H}^\circ(Ti)$ представлялись в виде выражения с функцией $R_{rp}(Ti)$, которая реализовывала взвешенное усреднение [17]

$$\dot{H}^{\circ}(Ti) = \frac{1}{4P_0} \sum_{p=1}^{P_0} \sum_{r=0}^3 R_{rp}(Ti) \dot{H}_{rp}^{\circ}(Ti), \quad i = 0, \dots, N-1.$$

Решение о распознавании на основе оценки обобщенной производной $\dot{H}^{\circ}(Ti)$, которая вычислялась в скользящем окне, производилось для последовательных моментов времени. Текущее значение функции обобщенной производной сравнивалось с порогом \dot{H}_p° ; при выполнении неравенства $\dot{H}^{\circ}(Ti) \geq \dot{H}_p^{\circ}$ принималось решение о том, что имеет место SC-событие, что свидетельствует о начале магнитной бури; при невыполнении неравенства принималось решение о том, что нет начала магнитной бури.

Вычисления обобщенных производных и реализация процедуры принятия решения о начале магнитной бури были осуществлены на основе обработки наблюдений с 1-минутной дискретизацией от 19 магнитных обсерваторий AAE, ASP, BEL, BFO, BLC, BMT, BOU, BRW, BSL, CLF, CNH, CSY, CTA, DOU, EBR, ESK, EYR, FCE, FRD, входящих в систему ИНТЕРМАГНЕТ, полученных с помощью специального программного продукта [9, 10]. SC-событие, относящееся к дате 18.12.2014, 19 ч. 03 мин. было принято в качестве контрольного. Рассматривалось вычисление обобщенной производной на интервале с 11.12.2011, 19 ч. 03 мин. по 19.12.2011, 19 ч. 03 мин. На рис. 13.1 представлены расчеты обобщенной производной SC-моделей на основе полиномов первого порядка, позволившие сделать выводы о возможной удовлетворительной эффективности предложенного подхода к распознаванию предвестников.

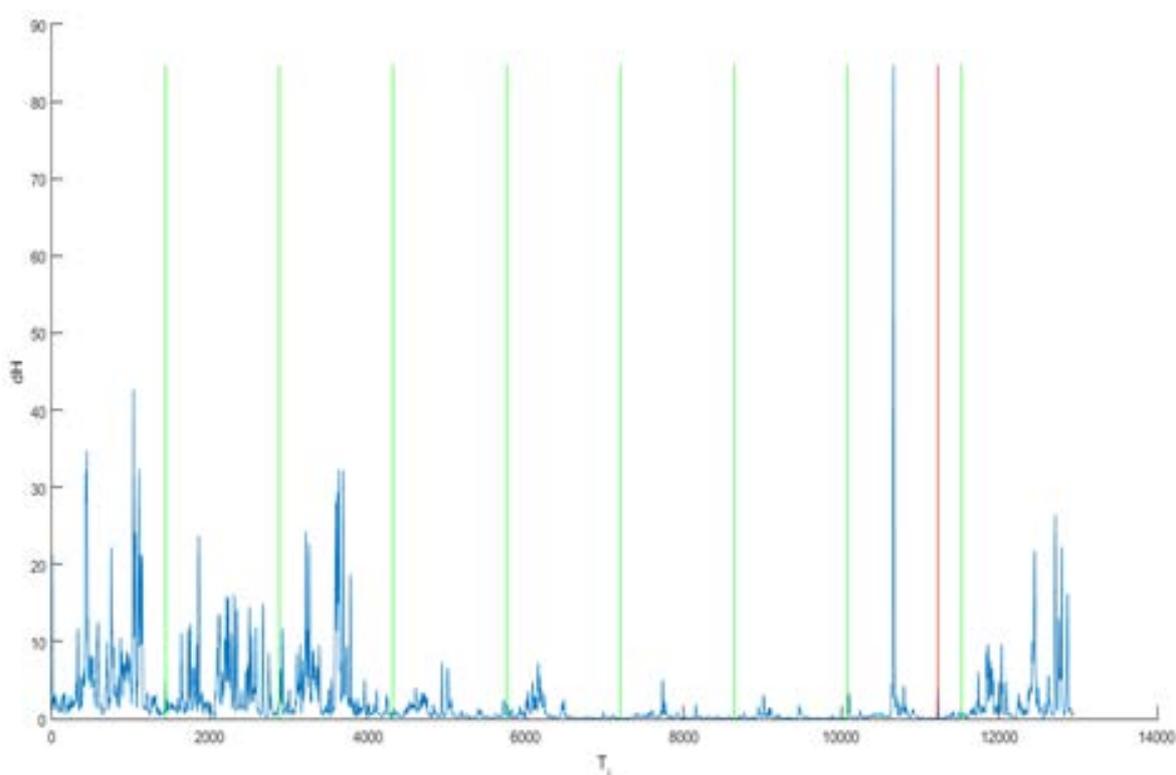


Рисунок 13.1 – Вычисление обобщенных производных и SC-распознавание

2. Во второй части была представлена разработка метода распознавания предвестников, который базировался на наблюдениях от мюонного детектора (МД) солнечных корональных выбросов с использованием двухэтапной фильтрации временных рядов с Форбуш-эффектами. По существу, указанная разработка представляла собой дополнение к первой части и отличалась выработкой предвестника для распознавания, основанного на мюонной диагностике [11].

Плазменные образования корональных выбросов (КВ) Солнца являются результатом проявления процессов его активности. При распространении, обычно со скоростью ≈ 500 км/с, плазменные образования от КВ-событий достигают Земли за время $\approx 1-2$ суток и могут вызвать магнитную бурю.

Поток космических лучей (КЛ) – протонов высокой энергии – может быть использован для идентификации КВ. Пересекая область движущегося плазменного образования КВ, поток протонов КЛ в направлении Земли претерпевает вариации. Попадая в верхние слои атмосферы Земли, протоны КЛ на высотах 10–20 км, которые можно интерпретировать как первичные, вступают в ядерные реакции с нуклонами атомов атмосферы с образованием мюонов и нейтрино. В цепочке таких превращений поток мюонов сохраняет вариации потока первичных протонов.

МД в режиме реального времени измеряет угловые азимутальные и зенитные распределения вариаций интенсивностей потока мюонов, дает возможность получения информации по вариациям их угловых и временных характеристик и является эффективным инструментом исследования возмущений магнитосферы Земли [12–14]. Форбуш-эффект [15] состоит в резком понижении интенсивности мюонного потока, которое регистрируется МД.

Идентификация Форбуш-эффекта была рассмотрена на последовательности матриц угловых распределений интенсивностей мюонных потоков с шагом по времени 1 час. Для примера рассматривалась функция интенсивности $y(k, m, Ti)$ для значений $k = 45, m = 45$; начало времени наблюдения – 00 ч. 00 мин., 15.06.2015 г., дискретность наблюдений – 1 час, $i = 0, 1, \dots, N_f - 1, N_f = 336$; введенная функции была пронормирована. На рис. 13.2 изображена функция $y(45, 45, Ti)$ в виде зашумленной линии с индексом 1, представляющей собой наблюдения интенсивности мюонного потока. Видно, что в интервале 22.06.2015 – 24.06.2015 имело место снижение интенсивности. В это же время происходила магнитная буря. Было сделано заключение, что это снижение связано с Форбуш-эффектом и началом магнитной бури.

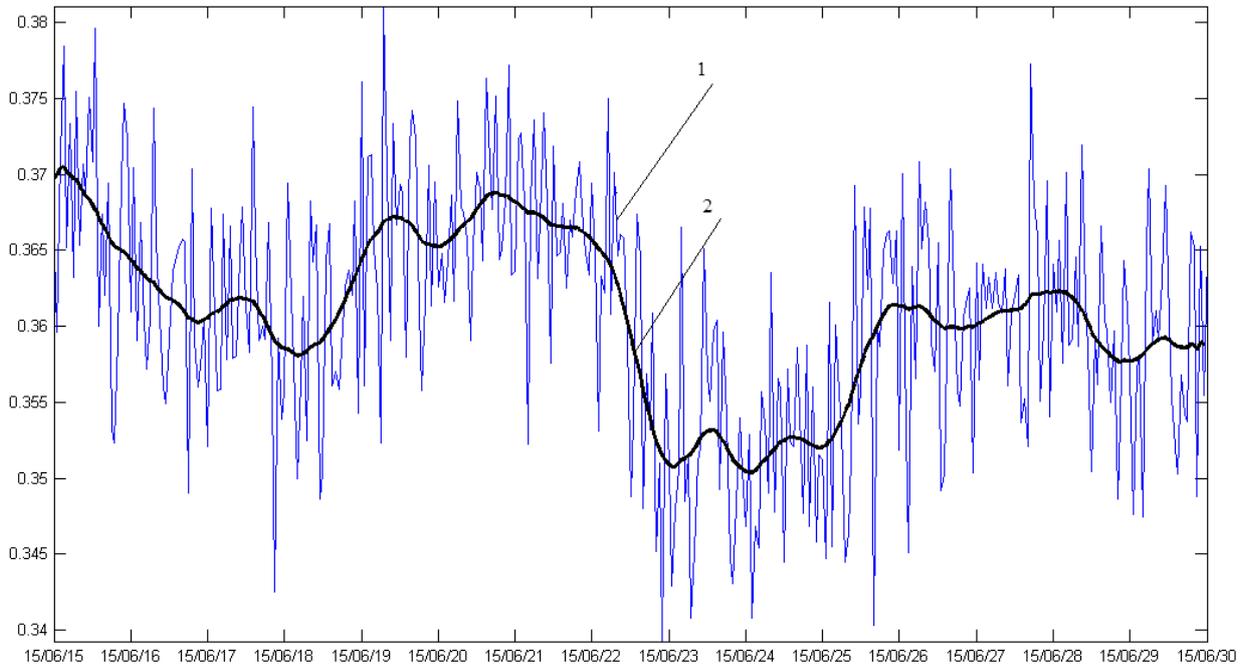


Рисунок 13.2 – 1 - наблюдения интенсивности мюонного потока в зависимости от времени; 2 - результат фильтрации функции наблюдения интенсивности мюонных потоков

Были рассмотрены наблюдения временных рядов $y(k, m, Ti)$ для ряда значений k, m . Для выделения низкочастотного тренда реализовывалась двухэтапная фильтрация [16, 17]. Введены N -точечные скользящие локальные интервалы с граничными точками N_{1j}, N_{2j} , N_d – шаг скольжения, j – номер интервала, для которых были определены кусочно-линейные модели $y_M(c_j, Ti)$, где c_j – векторы параметров. Были сформированы локальные функционалы $S(c_j, y_j)$

$$S(c_j, y_j(k, m)) = \sum_{i=N_{1j}}^{N_{2j}} (y(k, m, Ti) - y_M(c_j, Ti))^2.$$

Нахождение оптимальных оценок параметров $c_j^\circ(k, m)$ было реализовано с помощью решения задач оптимизации локальных функционалов

$$c_j^\circ(k, m) = \arg\{\min_{c_j} S(c_j, y_j(k, m))\}, \quad j = 1, \dots, m_0.$$

Оценки $y_{Mj}^\circ(k, m, Ti)$ вычислялись на основе нелинейных операций, соответствующих первому этапу фильтрации. Производилось взвешенное усреднение суммы скользящих локальных моделей, соответствующее второму этапу фильтрации

$$y_M^\circ(k, m, Ti) = R(i) \sum_{j=1}^{m_0} y_{Mj}^\circ(k, m, Ti).$$

Очевидно, функция $y_M^\circ(k, m, N, N_d, Ti) = y_M^\circ(k, m, Ti)$ должна быть за счет выбора N, N_d сформирована таким образом, чтобы функция разности $\Delta y(k, m, N, N_d, Ti) = y_M^\circ(k, m, N, N_d, Ti) - y(k, m, Ti)$ в максимальной степени походила бы на белый шум.

Отмеченное обстоятельство было использовано для формирования критерия адекватности. Рассматривалась оценка автокорреляционной функции $R_{\Delta y, \Delta y}(n, N, N_d)$ для введенной центрированной и усредненной по k, m функции разности $\bar{\Delta y}(k, m, N, N_d, Ti)$; формировался функционал $\rho(N, N_d, N_{or})$

$$R_{\Delta \bar{y}, \Delta \bar{y}}(n, N, N_d) = \frac{1}{N_f - n} \sum_{i=0}^{N_f-1} \Delta \bar{y}(N, N_d, i) \Delta \bar{y}(N, N_d, i+n), \quad n = 0, 1, \dots, N_f - 1.$$

$$\rho(N, N_d, N_{or}) = \frac{R_{\Delta \bar{y}, \Delta \bar{y}}(T \cdot 0)}{\frac{1}{N_{or}} \sum_{n=1}^{N_{or}} |R_{\Delta \bar{y}, \Delta \bar{y}}(T \cdot n)|}.$$

Оптимальные параметры N°, N_d° для оценки трендовой функции находились на основе задачи максимизации, задавалось значение N_{or}

$$(N^\circ, N_d^\circ) = \arg \{ \max_{N, N_d} \rho(N, N_d, N_{or}) \}.$$

Решение о распознавании начала магнитной бури на основе функции $\bar{\Delta y}(k, m, N, N_d, Ti)$ для N°, N_d° и заданных k, m было произведено на последовательности скользящих локальных интервалов с граничными точками $N_{1s} = N_d^\circ(s-1)$, $N_{2s} = N_{1s} + N^\circ - 1$.

Появление скачкообразного снижения величины интенсивности мюонного потока определено по оценке текущей разности между максимальным $y_{M \max, j}$ и минимальным $y_{M \min, j}$ значением на локальном интервале для оценки функции интенсивности $y_M^\circ(k, m, N^\circ, N_d^\circ, Ti)$

$$\Delta y_{M, j}^\circ = y_{M \max, j}^\circ(k, m, N^\circ, N_d^\circ) - y_{M \min, j}^\circ(k, m, N^\circ, N_d^\circ).$$

При заданной величине порога Δy_M° производилось сравнение текущей и пороговой разности; при выполнении неравенства $\Delta y_M^\circ \leq \Delta y_{M, s}^\circ$ принималось решение о том, что имеет место Форбуш-эффект, свидетельствующий о начале ГМБ; при невыполнении неравенства принималось решение об отсутствии Форбуш-эффекта.

Были применены локальные аппроксимационные кусочно-линейные модели. Для наблюдений (рис. 13.2) была произведена фильтрация с $N = 16, N_d = 1$; полученные результаты отмечены индексом 2. Благодаря фильтрации оказался выделенным низкочастотный тренд, необходимый для решения о появлении Форбуш-эффекта.

Список использованных источников

1. Shinonara M., Kikuchi T., Nozaki K. Automatic Realtime Detection of Sudden Commencement of Geomagnetic Storms // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. 2005. Vol. 52, Issue 3/4. P. 197–205.
2. Segarra A., Curto J. J. Automatic detection of sudden commencements using neural networks // Earth Planets Space. 2013. Vol. 65. P. 791–797.
3. Essam Ghamry, Ali G. Hafez, Kiyohumi Yumoto Effect of SC on frequency content of geomagnetic data using DWT application: SC automatic detection // Earth Planets Space. 2013. Vol. 65. P. 1007–1015.
4. Hafez Ali G., Essam G. Automatic detection of geomagnetic sudden commencement via time–frequency clusters // Advances in Space Research. 2011. Vol. 48, Issue 9. P. 1537–1544.
5. Satoru T. Characteristics of geomagnetic sudden commencement observed in middle and low latitudes // Earth Planets Space. 1998. Vol. 50. P. 755–772.
6. Rastogi R. G. Signatures of storm sudden commencements in geomagnetic H, Y and Z fields at Indian observatories during 1958-1992 // Ann. Geophysicae. 1999. Vol. 17. P. 1426–1438.
7. Хабарова О.В., Руденчик Е.А. О возможности прогноза магнитных бурь по результатам мониторинга осцилляторного режима солнечного ветра. Препринт ИЗМИРАН №1(1154), Трицк, 2003.
8. **Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д., Камаев Д.А., Корнилов А.С.** Алгоритмическое обнаружение аномальных временных участков в наблюдениях за уровнем океана. // Физика Земли. 2016. №2. С.114–126.
9. Иванов Г.И., **Гетманов В.Г.** Предвестники геомагнитных бурь на основе оценок обобщенных производных для сигналов Sudden commencement // 19-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», 2015. URL: <http://mn.mephi.ru/articles/1546>
10. Иванов Г.И., **Гетманов В.Г.** Matlab-программный комплекс для анализа сигналов «Sudden Commencement» и геомагнитных бурь // 19-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», 2015. URL: <http://mn.mephi.ru/articles/1410>.
11. Борог В.В. Основы мюонной диагностики. Уч. пособие. М.: Изд-во МИФИ, 2008. 160 с.
12. Барбашина Н.С., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др. Широкоапертурный мюонный годоскоп УРАГАН // Приборы и техника эксперимента. 2008. №2. С.26–32.
13. Barbashina, N.S., Dmitrieva, A.N., Kompaniets, K.G., et al. Study of dynamics of global disturbances of the Earth's magnetosphere using muon detectors // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2010. Vol. 37, Issue 6. P. 165–166.
14. Shutenko V.V., Barbashina N.S., Kompaniets K.G. et al. Observation of heliospheric disturbances in the muon component of cosmic rays // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2009. Vol. 73 (3). P. 347–349.
15. Абуни А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 3. С. 313–320.
16. **Гетманов В.Г., Сидоров Р.В.,** Иванов И.О., Борог В.В., Крянев А.В. Сравнение возможностей двух методов выделения трендов при обработке временных рядов экспериментальных данных // IV Межд. конф. «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование»: Сб. докл., Москва, НИЯУ МИФИ, 5-7 апреля, М.: НИЯУ МИФИ. 2016. С. 54–55.
17. **Гетманов В.Г., Сидоров Р.В.,** Дабагян Р.А. Метод фильтрации сигналов с использованием локальных моделей и функций взвешенного усреднения // Измерительная техника. 2015. №9. С. 52–57.

14. Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных

Номер госрегистрации: 114101670060 (шифр заявки «2014-14-579-0057-8862»)

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

В Геофизическом центре РАН с 2014 по 2016 г. выполнялись прикладные научные исследования (ПНИ) по теме «Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса (ЭО АПК) для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных» в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.607.21.0058 от 22.09.2014 в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». В 2016 г. был успешно завершён Этап 4 «Экспериментальные исследования» и сдан отчет по заключительному Этапу 5 «Обобщение и оценка результатов исследований».

Основные направления работ в рамках первой очереди экспериментальных исследований включали в себя создание ЭО АПК для мониторинга геомагнитного поля и детектирования экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных и собственно экспериментальные исследования с использованием созданного ЭО АПК в соответствии с разработанными программой и методикой экспериментальных исследований и требованиями ТЗ. Были разработаны методические рекомендации для поддержки и развития сети российских геомагнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, а также документ, содержащий описание применения ЭО АПК и руководство оператора.

ЭО АПК включает в себя две взаимосвязанные компоненты: аппаратную часть, состоящую из набора электронных вычислительных устройств, и программную часть, которая обеспечивает функционирование аппаратной части, обработку данных и выдачу конечного продукта. Аппаратная часть состоит из семейства модулей, в которое входят средства обеспечения поступления данных, сервер обработки электронной почты, FTP-сервер хранения геомагнитных данных в текстовом формате, сервер базы данных, сервер обработки информации/веб-сервер, блок визуализации данных/видео-стенд, цифровой демонстрационный комплекс со сферическим экраном, прототип рабочего места пользователя.

Программная часть состоит из семейства программных модулей, обеспечивающих следующие функции: Организацию сбора обсерваторских и спутниковых данных измерений геомагнитного поля; Загрузку данных измерений в специализированную базу данных; Анализ данных, включающий автоматизированное распознавание техногенных аномалий, расчет квазиокончатальных данных, распознавание природных аномалий,

оценку геомагнитных возмущений по амплитуде и скорости изменения поля, оперативный расчет K -индекса, выделение экстремальных геомагнитных событий по заданным критериям; Модельные расчеты, включающие пространственную интерполяцию часовых вариаций поля, оперативное моделирование суточной вариации, оценки геомагнитных эффектов атмосферных волн; Онлайн доступ к данным и результатам их анализа; Визуализацию результатов.

За отчетный период все программные и аппаратные компоненты прошли проверку соответствия выполненного комплекса работ, состава и функционирования ЭО АПК требованиям ТЗ. В частности, осуществляется непрерывный сбор минутных значений геомагнитного поля в квазиреальном времени с индикацией аномалий естественной и техногенной природы, автоматизированной очисткой данных от помех, верификацией. Организован онлайн доступ к данным через веб-сайт. Имеются онлайн-сервисы обработки пользовательских данных и автоматизированного распознавания техногенных аномалий, а также доступ к результатам модельных прогнозов. Обеспечена возможность удаленного администрирования. Геомагнитные данные по мере поступления визуализируются на видео-стенде. Обеспечена унификация регистрируемых данных, их структурированное хранение и управление в базе данных с пользовательским интерфейсом. База данных и СУБД обеспечивают передачу, накопление и хранение данных. Научно-технические результаты соответствуют требованиям ТЗ к показателям назначения и техническим характеристикам.

Оценки возмущенности геомагнитного поля проводятся в единой, нормированной шкале, а индикаторы геомагнитной активности рассчитываются на базе всех доступных наблюдений, осуществляемых в РФ, с минимальной задержкой. В тестовом режиме опробованы разработанные индикаторы для оценки и прогнозирования экстремальных геомагнитных событий. Также проверены наличие и характеристики моделей, описывающих электродинамические параметры ионосферы, которые непосредственно связаны с уровнем геомагнитной активности и вариациями геомагнитного поля. Методы пространственно-временной интерполяции геомагнитных данных обеспечивают заданную точность. Кроме того, осуществлялась проверка соответствия иных научно-технических результатов требованиям ТЗ к показателям назначения и техническим характеристикам. К ним, в частности, относились результаты апробации и тестирования новых прикладных математических методов обработки данных для использования в целях мониторинга, оценки и прогнозирования состояния геомагнитного поля с проведением сравнительного анализа с традиционными методами выявления аномалий, реализация математических моделей токовых систем на границе магнитосферы и ионосферы и распределения наземных вариаций внешнего геомагнитного поля в виде программных средств и создание моделей вариаций геомагнитного поля и сопряженных электродинамических параметров в ионосфере. Был сформулирован набор методических рекомендаций, разработанных для всех этапов развертывания обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, начиная с самого первого шага – выбора географической точки расположения, и заканчивая подготовкой квазиокончательных магнитограмм.

Программная документация надлежащего качества была подготовлена в полном комплекте, включая документы «Описание применения» и «Руководство пользователя».

Важнейшим результатом экспериментальных исследований явилась разработка методических рекомендаций для поддержки и развития сети российских геомагнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, являющихся главным источником информации о магнитном поле для ЭО АПК. Рекомендации охватывают весь цикл работ по выбору места, строительству, оснащению и штатному функционированию обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. В них детально изложены требования к измерительной аппаратуре, характеристикам магнитного поля в зоне установки обсерватории, материалам для строительства обсерваторских павильонов, вспомогательным конструкциям, эксплуатации магнитометрической аппаратуры и температурному режиму. Отдельный раздел посвящен абсолютным измерениям элементов магнитного поля, которые являются отличительной особенностью геомагнитных обсерваторий. Наконец, представлены конечные требования к качеству получаемых непрерывных измерений магнитного поля. Именно качество итоговых данных является результатом всех этапов развертывания магнитной обсерватории и служит главным показателем для ее сертификации программой ИНТЕРМАГНЕТ.

На заключительном Этапе 5 в соответствии с требованиями ТЗ выполнялись патентные исследования по результатам ПНИ, были даны оценки эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем, были проведены оценки результатов расчетов математического моделирования и интерполирования геомагнитного поля и связанных с ним электромагнитных процессов в окружающей среде. Кроме того, были сформулированы рекомендации по оптимальным технико-экономическим решениям при строительстве и оснащении геомагнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ в регионах РФ, проведены оценки полноты решения задачи и достижения поставленных целей ПНИ, разработаны рекомендации по использованию результатов проведенных ПНИ в реальном секторе экономики с учетом технологических возможностей и особенностей Индустриального партнера, а также в дальнейших исследованиях и разработках, и разработан проект технического задания на проведение ОКР. По результатам были подготовлены отдельные документы: «Отчет о патентных исследованиях», «Проект технического задания на проведение ОКР» и «Рекомендации по использованию результатов проведенных ПНИ в реальном секторе экономики с учетом технологических возможностей и особенностей Индустриального партнера, а также в дальнейших исследованиях и разработках».

Набор параметров, выбранных для оценки эффективности полученных в ходе ПНИ результатов, включал в себя параметры, связанные либо с качественными оценками, либо с количественными. Качественные оценки давались по наличию или отсутствию тех или иных показателей эффективности. Количественные оценки давались по результатам сопоставления в единицах измерения в зависимости от полученного результата, его свойств, технических характеристик. Проведенное сравнение полученных при проведении ПНИ результатов с соответствующими аналогами из практики работы других существующих геомагнитных информационных узлов (GIN) показало, что результаты ПНИ по своим характеристикам в основном соответствуют мировому научно-техническому уровню. Это подтверждается анализом современного технического (аппаратного и программного) оснащения GIN ИНТЕРМАГНЕТ, существующим

подходам к развертыванию и оснащению магнитных обсерваторий, сбору данных и их обработке. Синергическая оценка результатов подтверждает, что взаимное дополнение эффективных возможностей результатов превышает сумму свойств и возможностей ее отдельных элементов вследствие их взаимного дополнения.

Оценки результатов расчетов по математическим моделям распределения наземных вариаций геомагнитного поля методами ДМА с помощью параметра «мера активности», оперативного моделирования Sq-вариации, интерполирования суточной вариации напряженности геомагнитного поля на территории РФ, моделей распределения продольных токов ионосферного электрического потенциала были проведены путем сравнения с экспериментальными данными на достаточно большой статистике. Корреляционные оценки параметров, которые являются наиболее репрезентативными для каждого из моделируемых физических процессов, показали удовлетворительное согласие результатов модельных расчетов и данных прямых наблюдений. Это позволяет оценить качество результатов моделирования как достаточно высокое, а сами модели считать адекватными.

С учетом особенностей индустриального партнера, можно выделить две области использования результатов ПНИ, а именно: пространственная ориентация при проведении наклонно направленного бурения по магнитному склонению и разработка действующего центра сбора и анализа наземных и спутниковых геомагнитных данных. Создание АПК является стратегически важным для развития сферы геомагнитных исследований в РФ. Полученный в результате продукт будет являться единым центром обработки всех поступающих данных и единым центром предоставления данных для практического использования. АПК будет включать в себя все ранее полученные результаты интеллектуальной деятельности и будет поставляться как полноценный продукт со всем необходимым программным и аппаратным окружением. Разработанный ЭО АПК по своим характеристикам превышает мировой уровень, главным образом за счет внедрения новейших математических методов интеллектуального анализа данных.

В ходе конференции «Тектоника, геодинамика и петрология литосферы» 14 января 2016 г. в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск, Россия) директор Геофизического центра РАН, руководитель проекта академик А. Д. Гвишиани принял участие в рабочем совещании для обеспечения эффективной работы и дальнейшего развития геомагнитной обсерватории «Новосибирск» («Ключи»), входящей в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ. Кроме того, обсуждался вопрос о возможности развертывания новой обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ на острове Самойловский в дельте реки Лена в качестве совместного проекта ИНГГ СО РАН и ГЦ РАН. Заместитель руководителя работ по проекту А. И. Рыбкина приняла участие в ряде мероприятий международной конференции GEO-Plenary (GEO-группа земных наблюдений), которая состоялась при организационной поддержке Государственной корпорации по космической деятельности РОСКОСМОС и Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РОСГИДРОМЕТ.

На всех этапах выполнения ПНИ развивался и поддерживался веб-сайт <http://fcp2014.gcras.ru>, созданный и запущенный в эксплуатацию в рамках выполнения

15. Проект организации международной конференции «Системный анализ данных для изучения природных опасностей»

Грант РФФИ №16-05-20339 Г

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

При поддержке РФФИ (грант 16-05-20339) 18–21 июля 2016 г. в пос. Роза Хутор Адлерского района г. Сочи Краснодарского края прошла международная конференция «Системный анализ данных для изучения природных опасностей». Организаторами конференции выступили Геофизический центр РАН, Министерство образования и науки Российской Федерации, Международный институт прикладного системного анализа (IIASA, Австрия). Соорганизаторами мероприятия стали Комитет по данным для науки и техники (CODATA ICSU), Национальный центр космических исследований (CNES), Международная ассоциация геомагнетизма и аэрономии (IAGA), Федеральное агентство научных организаций, Международный геодезический и геофизический союз, Российский фонд фундаментальных исследований, Российская академия наук, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Национальный геофизический комитет РАН, КСА инновационная группа.

Председателем конференции был директор ГЦ РАН, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н. Алексей Джерменович Гвишиани, а сопредседателем конференции – директор Международного института прикладного системного анализа (IIASA), профессор Павел Кабат.

Конференция стала выдающимся событием 2016 г. в области геофизики, геологии и системного анализа данных. Мероприятие объединило ученых, исследователей, специалистов в области геофизических наблюдений и компьютерных технологий, экспертов-практиков, конечных пользователей и представителей государственных структур, чья деятельность связана с мониторингом окружающей среды, обнаружением опасностей, анализом и моделированием данных, оценкой уязвимости и рисков. Всего в конференции приняли участие более 150 ведущих ученых и специалистов из 14 стран мира – России, США, Великобритании, Финляндии, Швейцарии, Франции, Германии, Австрии, Нидерландов, Италии, ЮАР, Ирана, Индии, Узбекистана. Мероприятие получило широкое освещение в региональных и центральных СМИ.

11 участников конференции – это академики и член-корреспонденты РАН: В. В. Адушкин, В. Г. Бондур, А. Д. Гвишиани, А. О. Глико, В. И. Богоявленский, Л. А. Вайсберг, В. А. Верниковский, Л. И. Лобковский, А. А. Маловичко, П. С. Мартышко, В. А. Петров.

Мероприятие было посвящено обсуждению современных проблем применения методов системного анализа данных геофизических наблюдений для выявления экстремальных состояний окружающей среды. Тематически конференция охватила основные вопросы, связанные с наблюдением, обнаружением и моделированием геофизических экстремальных событий; разработкой и внедрением методов и

инструментов мониторинга; возникновением экстремальных событий в природных системах; глобальной и локальной оценкой опасных природных и техногенных явлений; проблемами обработки и анализа больших массивов данных; приложением баз геоданных и геоинформационных систем к оценке природных опасностей. Отдельно стоит отметить, что на конференции были представлены результаты 16 проектов, финансируемых в рамках грантов Российского научного фонда (РНФ) и 12 результатов грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).



Рисунок 15.1 – Церемония открытия конференции

Научная программа конференции включала в себя следующие сессии:

- Динамика геофизических систем, анализ данных и экстремальные события;
- Возмущения электромагнитного поля Земли и геомагнитные наблюдения;
- Катастрофические события на поверхности Земли: тектонические и наведенные землетрясения, вулканическая активность, оползни, песчаные бури;
- Климатические, геофизические и экологические риски и экстремальные события в Арктическом регионе;
- ГИС-технологии в науках о Земле и их практическое применение;
- Геоинформационное обеспечение безопасности разработки месторождений и подземное строительство.

Неотъемлемой частью конференции также стали деловые встречи и научные совещания.

18 июля в рамках конференции состоялось Рабочее совещание, посвященное развитию российской сети магнитных обсерваторий. В ходе совещания обсуждались проблемы развития сети магнитных обсерваторий в России и их участия в международном проекте ИНТЕРМАГНЕТ. Приглашенные к участию в совещании поделились информацией о текущем состоянии российской сети магнитных обсерваторий и обозначили существующие в этой области проблемы. В частности, был поднят вопрос передачи данных в Центр геомагнитных данных в режиме реального времени. Кроме того,

участниками совещания было высказано предложение проводить регулярные сверки обсерваторских инклинометров/деклинометров на территории России.

Важным вопросом для обсуждения на совещании стала подготовка структуры нового крупного магнитометрического проекта для его представления на конкурс финансирования Минобрнауки в 2017 году. Участниками совещания также была поднята тема дооснащения и модернизации действующих российских обсерваторий магнитометрическим оборудованием, имеющимся в распоряжении ГЦ РАН. Была затронута и проблема финансирования.

В совещании приняли участие заместитель директора ИЗМИРАН по направлению магнетизм Земли и планет, заведующий отделом переменного магнитного поля Земли, к.ф.-м.н. Валерий Григорьевич Петров; старший научный сотрудник лаборатории наземных геомагнитных исследований СПбФ ИЗМИРАН, к.ф.-м.н. Андрей Львович Котиков; инженер-программист лаборатории робототехники Горно-Алтайского государственного университета (ГАГУ) Дмитрий Владимирович Кудин; научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований Геофизического центра РАН (ГЦ РАН), к.ф.-м.н. Роман Викторович Сидоров; проректор по научной деятельности Казанского федерального университета, заведующий кафедрой геофизики и геоинформационных технологий, д.г.-м.н. Данис Карлович Нургалиев; директор Института геофизики УрОРАН, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. Петр Сергеевич Мартышко.

В качестве конвинеров выступили директор ГЦ РАН, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н. Алексей Джерменович Гвишиани; заместитель директора ГЦ РАН по науке, заведующий лабораторией геоинформатики и геомагнитных исследований, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Анатолий Александрович Соловьев; старший научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН, к.ф.-м.н. Роман Игоревич Красноперов.

В ходе Рабочего совещания была установлена конференцсвязь с магнитными станциями «Арти», «Новосибирск» и другими.

В России проект ИНТЕРМАГНЕТ развивается под научным руководством академика А. Д. Гвишиани. С 2010 года работы проводятся сотрудниками лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН под руководством заведующего лабораторией и заместителя директора по науке ГЦ РАН, чл.-корр. РАН А. А. Соловьева.

Мировая сеть магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ известна своими высочайшими требованиями к качеству записей компонент магнитного поля Земли. Российский сегмент ИНТЕРМАГНЕТ на сегодняшний день включает в себя десять магнитных обсерваторий: «Иркутск», «Новосибирск», «Магадан», «Якутск», «Паратунка», «Хабаровск», «Борок», «Арти», «Восток» и «Санкт-Петербург».

20 июля состоялась дискуссия «The Great Debate» (Большие дебаты), в ходе которой были подведены итоги конференции.

Панельная дискуссия «The Great Debate» претендует на звание центрального события международной конференции, что обусловлено высоким уровнем научной и

практической подготовки участников события. В завершающей конференции дискуссии приняли участие директор Международного института прикладного системного анализа (IIASA), профессор, сопредседатель конференции Павел Кабат; академик-секретарь ОНЗ РАН, профессор Александр Олегович Глико; директор Международного совета по науке (ICSU), доктор Хейде Хакман; генеральный секретарь Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA), профессор Миара Мандеа; директор департамента Инновационного центра внутренней безопасности по управлению и взаимодействию в области продвинутого анализа данных (CCICADA), профессор Фред Робертс; президент Международного совета по науке (Комитет данных в области науки и технологий, CODATA), профессор Джеффри Болтон. Модератором дискуссии выступил директор ГЦ РАН, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., председатель конференции Алексей Джерменович Гвишиани.



Рисунок 15.2 – The Great Debate. Слева направо: Фред Робертс, Хейде Хакман, Павел Кабат, Александр Глико, Миара Мандеа, Джеффри Болтон

Во время панельной дискуссии, озаглавленной «Какими будут научные и технологические данные и их системный анализ в 21 веке?», выдающиеся руководители международных научных организаций и признанные во всем мире ученые обсудили наиболее важные в 21 веке направления развития системного анализа, науки о данных, наблюдений Земли и других научных дисциплин.

Среди тем, которые оказались в центре внимания участников дискуссии, были следующие:

- Соотношение между стремительным ростом количества данных и методами системного анализа для их обработки;
- Основные направления развития системного анализа в 21 веке;
- Перспективы применения математических методов для решения прикладных задач системного анализа;

- Принципы междисциплинарного международного сотрудничества ученых и политики открытых научных данных в 21 веке;
- Необходимые условия для успешного прогнозирования геоопасностей;
- Будущее науки о данных: какой она будет в 21 веке, и как должны меняться системы геонаблюдений в связи с феноменом больших данных.

В последний день конференции прошли два научных мероприятия с привлечением международных экспертов – Russian Data Citation Workshop и семинар Арктического проекта Международного института прикладного системного анализа (ИАСА) и Арктической программы РАН «Interdisciplinary scientific collaboration towards sustainable Arctic».

Data Citation Workshop – это серия мероприятий, организуемых целевой группой «Data Citation Standards and Practices» (Стандарты и практика цитирования данных) Комитета по данным для науки и техники Международного совета по науке (CODATA-ICSTI) в разных странах мира и направленных на распространение культуры и практики цитирования данных в мировом научном сообществе.

Организованное в рамках международной конференции рабочее заседание «Russian Data Citation Workshop» было посвящено цитированию данных в области наук о Земле. Проведение подобного мероприятия в России стало возможным благодаря поддержке исполнительного директора CODATA доктора Саймона Ходсона.

В России цитирование данных – относительно новая тема. Сейчас как в международном, так и в российском геофизическом сообществе растет понимание того, что получение новых данных не может более рассматриваться как некая вспомогательная деятельность, а становится полноценной научной задачей. В рабочем заседании «Russian Data Citation Workshop» приняли участие российские ученые и исследователи, а также зарубежные коллеги, имеющие опыт применения и распространения культуры цитирования данных в разных странах.

Заседание «Interdisciplinary scientific collaboration towards sustainable Arctic» было посвящено вопросам, связанным с изучением Арктического региона. Модераторами собрания выступили главный научный сотрудник Геофизического центра РАН, д.ф.-м.н. Рената Юрьевна Лукьянова и координатор по науке в Университете Хельсинки, научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (ИАСА), доктор Анни Райсел.

На заседании были представлены 6 докладов, каждый из которых был посвящен одному из направлений изучения Арктического региона. В качестве докладчиков были приглашены член-корреспондент РАН, д.г.-м.н Валерий Арнольдович Верниковский; ведущий научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования атмосферы в СПбГУ, член Международной комиссии по радиации (International Radiation Commission), д.ф.-м.н. Владимир Станиславович Косцов; заместитель директора Института водных проблем РАН по научной работе, д.ф.-м.н. Александр Наумович Гельфан; научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (ИАСА), доктор Анни Райсел; заведующий лабораторией океанологических и климатических

исследований Антарктики ААНИИ, к.ф.-м.н. Александр Вячеславович Клепиков; заместитель директора по научной работе ИПНГ РАН, член-корреспондент РАН, д.т.н. Василий Игоревич Богоявленский. Приглашенным на заседание гостем стал Матвей Дмитриевич Шпаро – известный российский полярный путешественник, общественный деятель, директор Центра дополнительного образования «Лаборатория путешествий».

Отдельно стоит отметить присутствовавших на конференции всемирно известных представителей научного сообщества. В роли приглашенных докладчиков выступили: доктор Хайде Хакман (директор Международного совета по науке, Франция/Южная Африка/Германия, ICSU); доктор Алик Измаил-Заде (генеральный секретарь Международного союза геодезии и геофизики, Германия/Россия, IUGG); профессор Джеффри Болтон (почетный профессор геологии, почетный иностранный профессор Школы наук о земле в Университете Эдинбурга, президент Международного совета по науке: Комитет данных в области науки и технологий, Шотландия, The University of Edinburgh/Франция, CODATA); доктор Миара Мандеа (генеральный секретарь Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии, Франция, IAGA); доктор Кусумита Арора (глава магнитной обсерватории в Национальном институте геофизических исследований, Индия, NGRI); доктор Антонелла Пересан (сотрудник отделения математики и наук о Земле в университете Триеста, Италия, Universita degli Studi di Trieste); профессор Фред Робертс (директор департамента Инновационного центра внутренней безопасности по управлению и взаимодействию в области продвинутого анализа данных, США, CCICADA).

По итогам конференции в электронном виде был опубликован сборник тезисов докладов всех участников, а избранные статьи по материалам представленных на конференции докладов были опубликованы в специальном выпуске журнала *Russian Journal of Earth Sciences*, индексируемого в Web of Science (RSCI).

Основные события конференции были освещены в ряде российских научных и новостных СМИ. Электронные публикации о прошедшем мероприятии доступны на сайтах «Научной России», Российского научного фонда, Российской академии наук, Федерального агентства научных организаций, Русского географического общества, «Московского комсомольца», «Вести Сочи», «Россия Кубань», «АиФ Кубань» и т.д. Отдельно стоит отметить, что на конференции присутствовали корреспонденты из ИА ТАСС, подготовившие на основе интервью с участниками конференции две публикации. Всего пресс-портрет конференции представлен 28 публикациями.

16. Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа

Грант РФФИ №15-05-07436

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

В 2016 году 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.

Итак, имеется временной ряд f , заданный на конечном, в общем случае, нерегулярном множестве узлов $T = \{t_1 < \dots < t_N\}$. Ряд f анализируется экспертом E .

Предполагается, что эксперт E имеет точку зрения на динамику f в каждом узле $t \in T$ и задается при этом рядом вопросов:

1. В какой мере $\mu E_f(t) \in [0;1]$ интересующая эксперта E динамика ряда f выражена (активна) в узле t ?

Ответ на этот вопрос составляет основу того, что называется мониторингом активности ряда f с экспертной точки зрения E . Мера активности μE_f дает ключ к точечным E -аномалиям: E -аномальными на f называются моменты t , в которых $\mu E_f(t) \geq 0,75$ (если некоторое свойство выражено в шкале $[0;1]$, то естественно считать аномальными его проявления, попадающие в отрезок $[0,75;1]$).

2. Какие фрагменты ряда f являются интересными с позиции эксперта E ?

Обозначим множество E -аномальных узлов через $LA(\mu E_f)$:

$$LA(\mu E_f) = \{t \in T : \mu E_f(t) \geq 0,75\}$$

Формирование $LA(\mu E_f)$ также входит в задачу мониторинга активности.

В силу произвольности ряда f его локально аномальные узлы LA могут представлять собой подмножество в T , нуждающееся в дополнительной работе (предварительной топологической фильтрации и последующей кластеризации). Дело в том, что в первую очередь интерес представляют одновременно связанные и достаточно массивные выходы меры μE_f за аномальный уровень $0,75$, поскольку именно их нужно считать проявлениями (следами) глобальных аномалий на f с позиции E .

Обозначим их совокупность через $A(\mu E_f)$:

$$A(\mu E_f) = \{A_1, \dots, A_L\}$$

Переход $LA(\mu E_f) \rightarrow A(\mu E_f)$ происходит с помощью алгоритма *DPS*, разработанного в ГЦ РАН.

3. Как сравнивать и ранжировать E-аномалии f ?

В рамках проекта разработан аппарат, позволяющий сравнивать фрагменты между собой и ранжировать их.

Локализация пространства

Локализация пространства T в узле t осуществляется с помощью нечетких структур δ_t на T , нормированных в t и убывающих с возрастанием расстояния от t :

$$(\delta_t(t) = 1) \wedge (|\tilde{t} - t| > |\bar{t} - t| \Rightarrow \delta_t(\tilde{t}) \leq \delta_t(\bar{t}))$$

Структуры δ_t называются *мерами близости* на T к узлу t . Они центрируют T вокруг t путем придания узлам \bar{t} весов $\delta_t(\bar{t})$, играют роль окрестностей t в T и формализуют взгляд эксперта E на T в t .

Эксперт E (формализация)

Динамический показатель D – неотрицательный функционал на T , параметризованный T

$$D: F(T) \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$$

где $F(T)$ – пространство функций на T .

Значения $D(f, t)$ обозначаются через $F_f(t)$ и понимаются как количественные оценки поведения функции f в узле $t \in T$ при подходе D к ее динамике.

Существует открытый к пополнению набор базовых показателей, хорошо зарекомендовавших себя на практике.

Динамические показатели связаны с очень естественными и важными, но самыми простыми точками зрения эксперта E на динамику ряда f . Общий случай складывается из простых, причем сложение не может быть прямым, механическим. Дело в том, что изначально динамические показатели D_f для разных D не сравнимы друг с другом и их объединение требует дополнительных усилий в виде мер максимальности или динамической активности показателя D_f .

Мера максимальности μ_{esmax}

Мера динамической активности μD_f является функцией принадлежности на T к нечеткому понятию «активности функции f в узле t с позиции показателя D ». Мера активности $\mu D_f(t)$ получается из показателя $D_f(t)$ с помощью той или иной конструкции меры максимальности μ_{esmax} .

Мера максимальности $\mu_{\text{esmax}_B}(x)$ – нечеткая структура на \mathbb{R} , отвечающая для конечного взвешенного распределения $B = \{(b_k, \omega_k) |_{k=1}^M, \omega_k > 0\}$ на вопрос: «В какой степени число x является большим по модулю B »? В ДМА для меры μ_{esmax} имеется четыре конструкции: «нечеткие сравнения», «колмогоровские средние», «нечеткие средние», «итерационные грани».

Мера активности μE_f

Переход $D_f \rightarrow \mu D_f$ переводит анализ функции f на язык нечеткой логики и нечеткой математики: меры активности μD_f для разных D принимают значения в единой шкале отрезка $[0;1]$ и могут сочетаться в любых составах и любых количествах с помощью многочисленных операций НЛ и всякого рода усреднений, которые мы обозначим через $*$. Становится возможным придать смысл сложной активности f по совокупности динамических показателей D в узле $t \in T$:

$$\mu D_f(t) = *_{D \in D} (\mu D_f(t)) \quad (1)$$

Во многом такое моделирование взгляда эксперта E является искусством и состоит в подборе базовых динамических показателей $D(E)$ и правильном их соединении $*(E)$:

$$\mu E_f(t) = *(E)_{D \in D(E)} (\mu D_f(t)) \quad (2)$$

1. Соединения $*$ с помощью нечеткой конъюнкции дают возможность одновременно учесть все базовые динамики из $D(E)$:

$$\mu E_f(t) = \Gamma_{D \in D(E)} (\mu D_f(t)) \quad (3)$$

2. Соединения $*$ с помощью нечеткой конъюнкции \perp дают возможность проявить себя каждой базовой динамике из $D(E)$:

$$\mu E_f(t) = \perp_{D \in D(E)} (\mu D_f(t)) \quad (4)$$

3. Предположим, что эксперт E имеет изначальное предпочтение на базовых динамиках из $D(E)$ в виде весов $\omega(D)$, тогда одним из возможных соединений $*$, способных учесть это обстоятельство, будет взвешенное усреднение

$$\mu E_f(t) = \frac{\sum_{D \in D(E)} \omega(D) \mu D_f(t)}{\sum_{D \in D(E)} \omega(D)} \quad (5)$$

Мониторинг активности μE_f

Анализ меры μE_f и ее базовых составляющих μD_f^m , $D^m \in D(E)$ составляет суть мониторинга f экспертом E . Он включает в себя:

1. непосредственный анализ активности μE_f , позволяющий понять, в какой степени интересующая E динамика выражена на f в каждый момент $t \in T$. Результат – дизъюнктивное разбиение T на три составляющие

$$T = LB(\mu E_f) \vee LPA(\mu E_f) \vee LA(\mu E_f) \quad (6)$$

- $LB(\mu E_f)$: локально фоновые узлы

$$LB(\mu E_f) = \{t \in T : \mu E_f(t) \in [0; 0,5)\} \quad (7)$$

- $LPA(\mu E_f)$: локально потенциально аномальные узлы

$$LPA(\mu E_f) = \{t \in T : \mu E_f(t) \in [0,5; 0,75)\} \quad (8)$$

- $LA(\mu E_f)$: локально аномальные узлы

$$LA(\mu E_f) = \{t \in T : \mu E_f(t) \in [0,75; 1]\} \quad (9)$$

2. статистический анализ совокупности базовых активностей $\{\mu D_f^m, D^m \in D(E)\}$ на уровне первых двух моментов: средние и ковариационные характеристики $\overline{\mu D_f^m}$ и $Cov(\mu D_f^{m_1}, \mu D_f^{m_2})$. Результат – кодирование поведения f на T с позиции E и возможность сравнения с поведением другого ряда \bar{f} на, вообще говоря, другом периоде \bar{T} с позиции того же E .

Поиск E -аномалий: этап первый – функциональная кластеризация

Поиск E -аномалий будет проиллюстрирован на функции f (рис. 16.1) и простой меры активности μL_f (рис. 16.2), соответствующей динамическому показателю изрезанности.

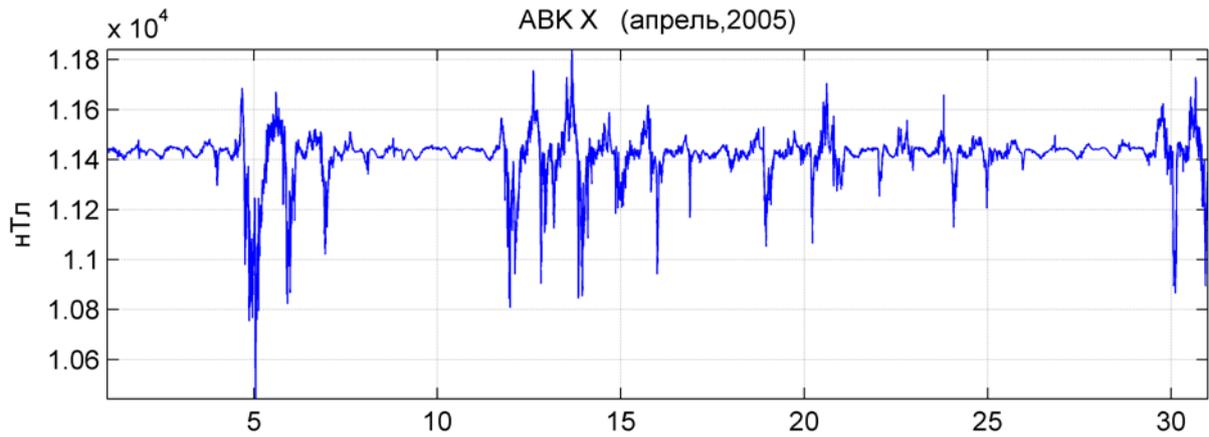


Рисунок 16.1 – Исследуемая функция

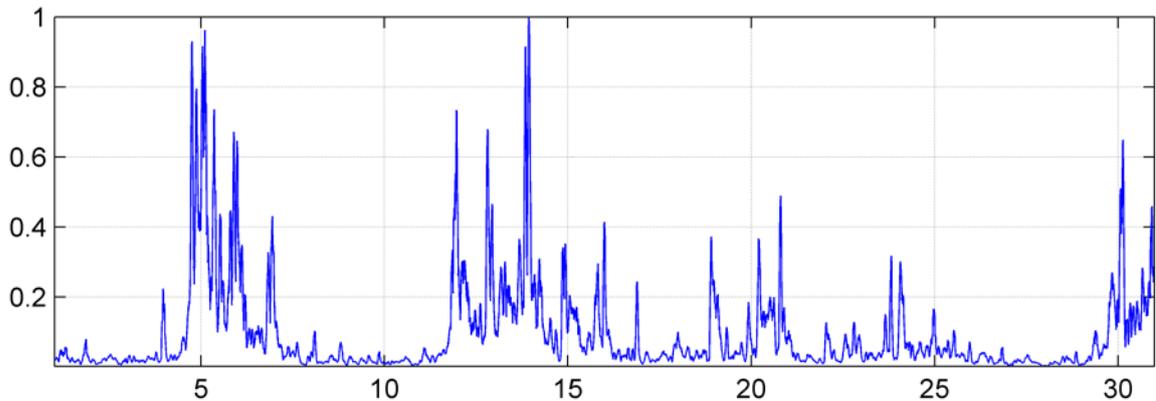


Рисунок 16.2 – Показатель «Изрезанность»

Определим плотность P на T по мере динамической активности μD_f : пусть $\Delta > h$ – параметр локального обзора, A – подмножество в T , t – узел из T , тогда

$$P_A(t) = \sum \frac{\mu E_f(\bar{t})}{|T|} : \bar{t} \in [t - \Delta, t + \Delta] \cap A$$

Результат работы алгоритма DPS по такой плотности на T при фиксированном α представляет собой первую часть аномальных для функции f узлов на периоде наблюдений T с позиции эксперта E (рис. 16.3):

$$T(\alpha) = DPS(T | P, \alpha, \mu E_f)$$

Множество $T(\alpha)$ представляется в виде дизъюнктивного объединения отрезков $[a_k, b_k]$, $k = 1, \dots, m$. Каждый $[a_k, b_k]$ лежит в T и не имеет пропусков внутри себя (рис. 16.3):

$$T(\alpha) = \bigvee_{k=1}^m [a_k, b_k]$$

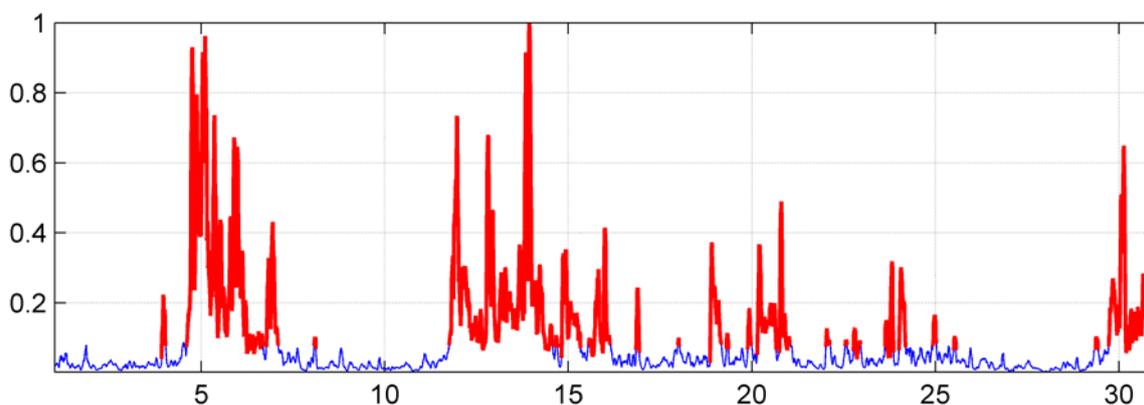


Рисунок 16.3 – *DPS* : шаг 1. Результаты выделения аномалий на показателе активности

Поиск аномалий: этап второй – интервальная кластеризация

Совокупность интервалов $\{[a_k, b_k]_l^m\}$ обозначим через $X(\alpha)$ и введем меру близости ρ между двумя интервалами из $X(\alpha)$:

$$\rho([a_{k_1}, b_{k_1}], [a_{k_2}, b_{k_2}]) = \frac{|[a_{k_1}, b_{k_1}] \cup [a_{k_2}, b_{k_2}]|}{|\min(a_{k_1}, a_{k_2}), \max(b_{k_1}, b_{k_2})|}$$

Близость ρ позволяет построить плотность P на $X(\alpha)$: если $S \subset X(\alpha)$, $[a_k, b_k] \in X(\alpha)$, то

$$P_S = \max_{[a_{\bar{k}}, b_{\bar{k}}] \in S \setminus [a_k, b_k]} \rho([a_k, b_k], [a_{\bar{k}}, b_{\bar{k}}])$$

Результат работы алгоритма *DPS* по такой плотности на $X(\alpha)$ при фиксированном β представляет собой вторую часть аномальных для функции f точек на периоде наблюдений T с позиции эксперта E (рис. 16.4, 16.5)

$$X(\alpha)(\beta) = DPS(X(\alpha) | P, \beta, \mu E_f)$$

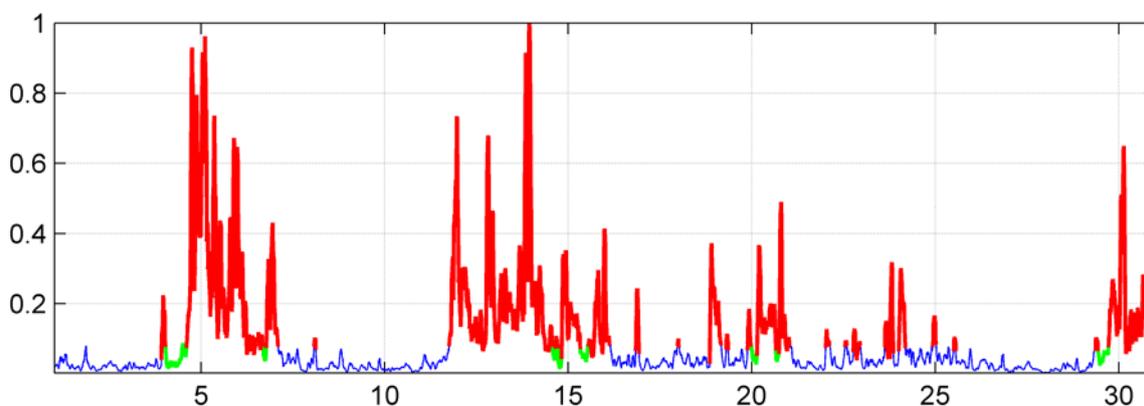


Рисунок 16.4 – *DPS* : шаг 2. Кластеризация интервалов

Алгоритм *DPS* на втором этапе показывает, какие отрезки из $X(\alpha)$ нужно дополнительно соединить в одну аномалию – это в точности отрезки из $X(\alpha)(\beta)$.

Таким образом, окончательно аномальными для функции f с позиции эксперта E будут достаточно изолированные отрезки из $X(\alpha)$, не вошедшие в $X(\alpha)(\beta)$, а также новые отрезки, полученные после объединения по группам отрезков из $X(\alpha)(\beta)$.

Совокупность всех аномалий обозначим через $A = A(\mu E_f)$:

$$A = \{A_l = A_l(\mu E_f) \mid_{l=1}^L\}$$

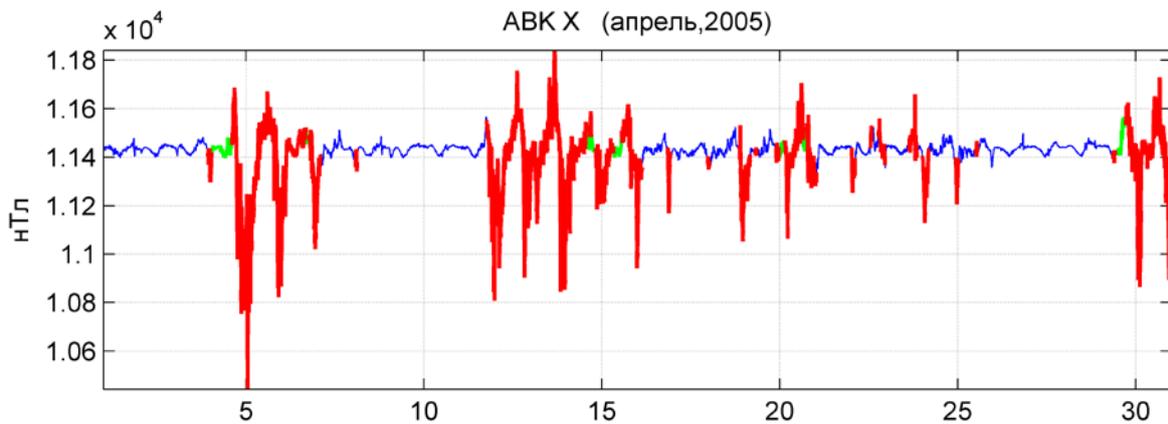


Рисунок 16.5 – *DPS* : итог. Редукция к исходной функции

17. Интеллектуальный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных с использованием передовых технологий сферической визуализации

Грант РФФИ №15-35-20983

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

В 2016 г. было создано единое геоинформационное пространство на базе сферической визуализации, предназначенное для комплексного анализа геофизических процессов. Сформирована обширная тематическая база пространственных данных по геофизике и геодезии. Геоданные оформлены в виде цифровых тематических карт и опубликованы на ГИС-сервере в формате сетевых картографических сервисов. Доступ к сервисам организован средствами стандартных сетевых протоколов передачи картографической информации, поддерживаемых Открытым геопространственным консорциумом (Open Geospatial Consortium – OGC). Опубликованные сервисы поддерживают два основных протокола передачи данных – WMS и KML [13, 14, 15]. В полный перечень картографических сервисов, опубликованных на ГИС-сервере, входят: ЦМР GEBCO [18] и SRTM [21]; FCAZ-зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений; данные по гравитационному полю, аномалии геоида; глубины до поверхности Мохоровичича от уровня моря; магнитное поле Земли и его возмущенная составляющая по данным спутниковой миссии Swarm; цифровая карта магнитных аномалий мира WDMAM-2 [16].

В ходе проекта разработана технология построения и визуализации на сферическом экране динамических карт на базе поступающих данных в режиме реального (квазиреального) времени с использованием методов геоинформатики. Построение карт осуществляется на базе опубликованных на ГИС-сервере картографических сервисов с использованием ПО «Орбус» [10, 11]. Разработанная технология позволяет автоматически обновлять визуализируемые данные по мере обновления исходных ГИС-слоев. Соответствующий программный модуль включен в ПО «Орбус» для отображения данных, опубликованных в виде сервисов ESRI ArcGIS (рис. 17.1а).

Модуль предоставляет возможность выбора нескольких слоев данных из указанного картографического сервиса. Данные, входящие в состав ГИС-сервиса, могут обновляться с разной периодичностью. Разработанный модуль дает возможность настройки, при которой ПО «Орбус» автоматически подгружает новые данные с сервера по заданному расписанию. Пример визуализации в ПО «Орбус» приведен на рис. 17.1б.

В 2016 г. была реализована визуализация геомагнитных спутниковых данных Swarm на комплексе со сферическим экраном. В ГЦ РАН организована система получения данных со спутников Swarm, а также система хранения полученных данных. Секундные данные с трех спутников Swarm поступают на сервер ГЦ РАН с 3-дневной задержкой и хранятся на сервере в формате txt. На основе данных, используя функционал ArcGIS REST API [12], создаются усредненные за 10 суток слои данных. На основе полученных

данных создаются GeoTIFF-файлы, которые с помощью скрипта конвертируются в растровый формат PNG и визуализируются с помощью ПО «Орбус».

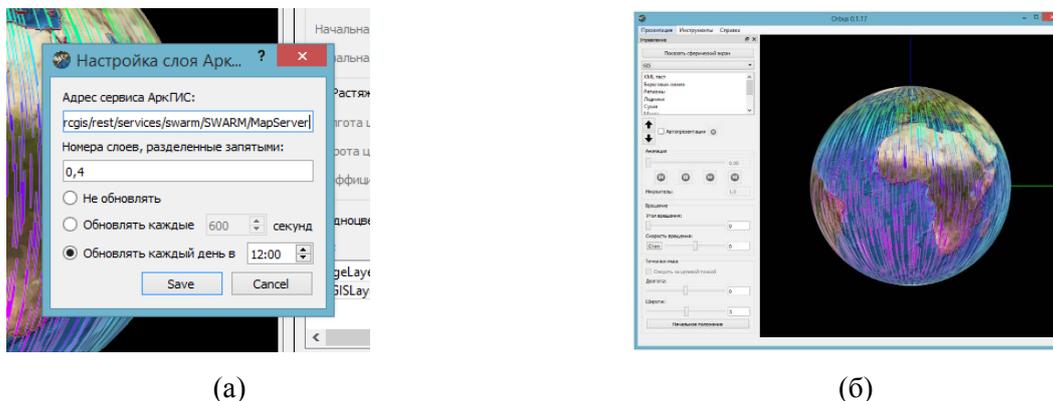


Рисунок 17.1 – ПО «Орбус»: (а) добавление слоя ArcGIS; (б) отображение слоя ArcGIS с данными полной напряженности, зарегистрированными спутником Swarm за 6–15 ноября 2016 г.

Создана технология автоматизированного глобального мониторинга метеорологических наблюдений в режиме квазиреального времени. Реализована трансляция метеорологических данных с использованием ресурса OpenWeatherMap. Ресурс объединяет данные разномасштабных прогнозов – от усредненных и глобальных до локальных и более точных. Для визуализации доступны следующие метеорологические явления: погодные данные в крупных городах, средняя температура по всему миру, облачность (в процентах), осадки (в мм), наличие снежного покрова, скорость ветра (м/с). Все данные подгружаются в режиме реального времени. В базе данных ПО «Орбус» хранятся отдельные папки под каждую из описанных категорий данных с параметрами визуализации, а также легендой, отображаемой поверх каждого слоя данных для удобства расшифровки и интерпретации (рис. 17.2а).

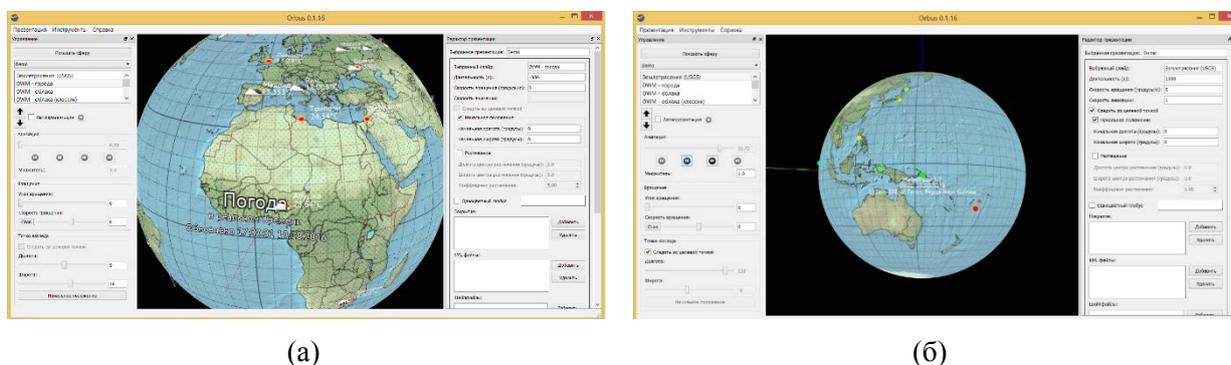


Рисунок 17.2 – Пример работы ПО «Орбус» в режиме автоматической визуализации: (а) отображение погодных данных в режиме реального времени в крупных городах мира; (б) отображение сейсмической активности по миру (землетрясения с магнитудой более 2,5 за неделю 10–16 октября 2016 г.)

В ходе проекта реализована система автоматизированного глобального мониторинга сейсмических событий в режиме квазиреального времени. В качестве исходных используются данные с сайта Геологической службы США (ГС США). Данные можно получать в разных форматах (KML, GeoJSON и другие), за разные периоды времени (час, день, неделя, месяц) и в разных диапазонах магнитуд (от одной до пяти). ПО «Орбус» использует данные в формате GeoJSON. Данные не сохраняются в кэше, а подгружаются с сайта в режиме реального времени. Благодаря этому минимизируются задержки в визуализации, а также гарантируется отображение самой последней информации по мере обновления на сайте Службы. При запуске ПО происходит скачивание актуальных данных с сайта ГС США. Интервал анимации составляет 60 секунд: за это время показываются все землетрясения, произошедшие за выбранный временной диапазон в хронологическом порядке. Каждое землетрясение изображается пунсоном, размер которого пропорционален его магнитуде, а цвет – глубине. Сферический экран автоматически центрируется на отображаемых землетрясениях. Таким образом, в режиме автопрезентации есть возможность наблюдать сводку землетрясений за предшествующую неделю (рис. 17.2б).

Построены динамические карты сейсморайонирования на базе методов нечеткой математики и выявлены характерные закономерности в развитии сейсмических процессов. В 2013 г. в ГЦ РАН была разработана алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [1, 2, 3, 19]. Она служит для распознавания зон возможного возникновения эпицентров сильных ($M \geq M_0$) землетрясений и автоматизированного построения динамических карт сейсмической опасности территории. При помощи системы FCAZ проведено распознавание и построены карты зон возможного возникновения эпицентров сильнейших ($M \geq 7,75$) землетрясений в горном поясе Анд Южной Америки, сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) в Калифорнии, значительных землетрясений на Кавказе ($M \geq 5$), а также в Крыму и на западе Северного Кавказа ($M \geq 4,5$). Достоверность построенных карт оценена с помощью контрольных экспериментов и сравнением их с картами, полученными классическим методом ЕРА [0, 4, 5, 6, 7, 8]. На основе накопленных в ходе реализации проекта данных проведен анализ сейсмического режима планеты и выявлены характерные закономерности возникновения эпицентров сильных землетрясений. В качестве каталога сильных землетрясений использовался каталог ANSS с магнитудой $M \geq 5,0$ за период январь–октябрь 2016 г. [20]. За рассматриваемый период произошло 1 280 землетрясений с $M \geq 5,0$ (рис. 17.3). Из них 364 с $M \geq 5,5$, 100 – $M \geq 6,0$, 32 – $M \geq 6,5$, 12 – $M \geq 7,0$ и 3 землетрясения с $M \geq 7,5$. Сильнейшими землетрясениями являются: землетрясение 2 марта с $M=7,8$ в Индийском океане; 16 апреля с $M=7,8$ в Эквадоре; 29 июля с $M=7,7$ у Северных Марианских островов в Тихом океане.

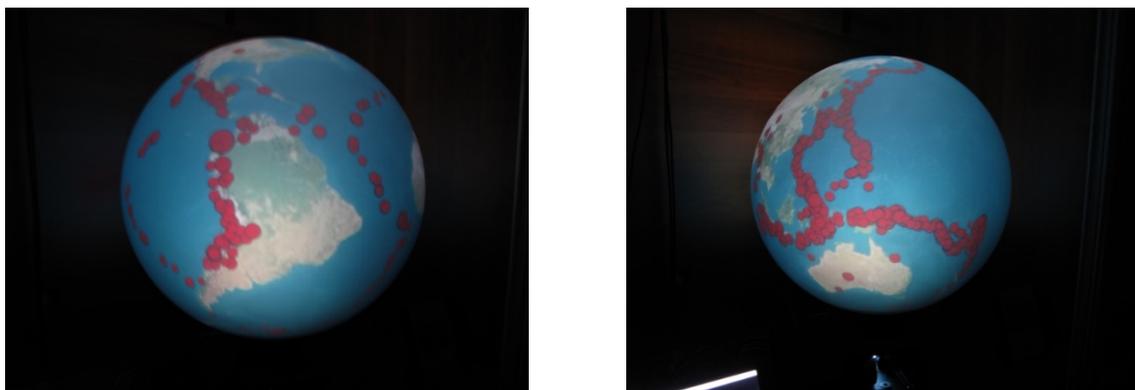


Рисунок 17.3 – Эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$ за период январь–октябрь 2016 г. на сферическом экране

Реализована технология глобального мониторинга возмущенной составляющей магнитного поля Земли по спутниковым данным с привлечением оперативных моделей главного магнитного поля. Пространственно-временные вариации магнитного поля, наблюдаемого спутниками в околоземном пространстве, содержат вклад от трех основных источников: токи в ионосфере и магнитосфере, возникающие в результате солнечной активности (внешнее поле), динамические процессы в жидком ядре (главное поле) и намагниченность пород (аномальное поле). При оперативном мониторинге по спутниковым данным внешнее поле является основным предметом мониторинга, поскольку достаточно интенсивно и наиболее изменчиво по времени. Интенсификация внешнего поля выражается в виде отклонений получаемых измерений от некоторого нормального фона, который обеспечивает главное поле. Таким образом, для оценки возмущенной составляющей на временном интервале менее года следует привлечь модель, наиболее точно описывающую главное магнитное поле Земли (ГМПЗ) и его пространственную изменчивость за рассматриваемый год. В качестве модели ГМПЗ использовалась наиболее точная на данный момент – Swarm Initial Field Model [25]. Для оценки возмущенной составляющей магнитного поля, регистрируемого группой спутников Swarm, рассматривались отклонения наблюдаемых значений от модельных. Было создано приложение, позволяющее генерировать цифровые карты распределения возмущенной составляющей магнитного поля вдоль траекторий пролетов спутников Swarm. Программа расчета выглядит следующим образом. Рассматривается регулярная географическая сетка с шагом 1° по всему земному шару. Рассчитываются значения координат центров ячеек и соответствующие каждой ячейке значения высот положения спутника при попадании в ячейку. По этим данным определяются модельные значения трех компонент главного магнитного поля, которые впоследствии вычитаются из наблюдаемых, усредненных внутри каждой ячейки, данных. В ходе работы программы применительно к 3-дневному интервалу данных происходит генерация 12 слоев (3 спутника, 3 компоненты и модуль вектора магнитного поля). Для регуляризации данных на глобальную географическую сетку используется интерполяция методом естественной окрестности [26]. В результате формируется растровый слой с размером ячейки $1 \times 1^\circ$. Разработанная технология позволяет проводить глобальный анализ пространственно-временного распределения геомагнитных возмущений. Рассмотрим работу программы

применительно к двум 3-дневным интервалам: 15–17 февраля 2016 г. и 18–20 апреля 2016 г. Первый интервал характеризовался повышенной магнитной активностью, второй – пониженной. Важно учитывать, что все значения в течение выбранных трех дней получены в двух локально-временных секторах с разницей в 12 часов. Таким образом, представленный анализ разностей наблюдаемых и модельных значений отражает не только пространственную, но и пространственно-временную изменчивость поля вблизи поверхности Земли. При анализе результатов можно наблюдать закономерное повышение возмущенности магнитного поля, в особенности в полярных зонах, за период повышенной магнитной активности. 17 февраля 2016 г. планетарный Кр-индекс геомагнитной активности достигал 6 баллов. В результате усиления магнитной активности наибольшие отклонения наблюдались в горизонтальных компонентах и полной напряженности поля. Наблюдаемое смещение максимумов отклонений от географических полюсов вызвано несовпадением осей магнитного диполя и вращения Земли. При уменьшении временного окна, например, до 1 дня, можно более детально оценивать эволюцию развития возмущенной составляющей магнитного поля Земли (рис. 17.4).

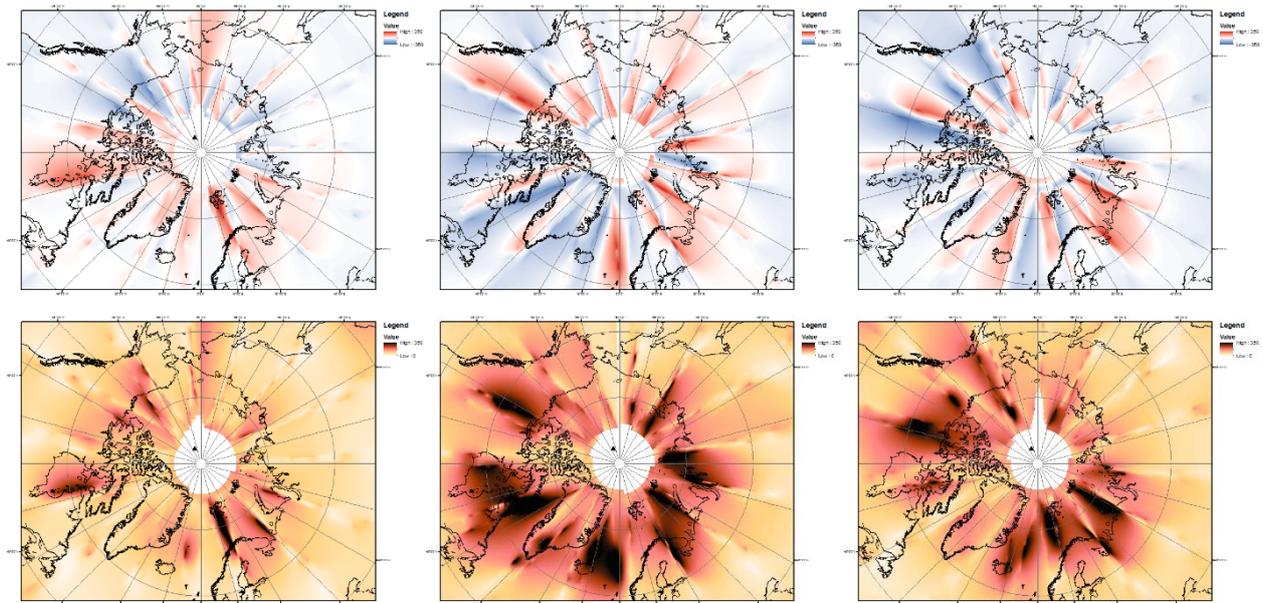


Рисунок 17.4 – Оценка возмущенной составляющей магнитного поля Земли 15 (слева), 16 (посередине) и 17 (справа) февраля 2016 г. в северной полярной области: компонента X (сверху) и модуль F (снизу). Треугольником помечен северный геомагнитный полюс

В ходе проекта в базу геоданных для последующей визуализации на сферическом экране были включены следующие данные о гравитационном поле Земли: аномалии геоида; аномалии Буге; аномалии в свободном воздухе; аномальное поле, создаваемое осадочным чехлом; аномальное поле, создаваемое плотностными неоднородностями консолидированной земной коры; остаточное мантийное гравитационное поле; изостатические аномалии гравитационного поля. Значения аномалий геоида для всего земного шара, аномалии Буге и аномалии в свободном воздухе рассчитаны на основе высокоточной глобальной модели гравитационного поля EIGEN-6c2 [17]. Аномалии

высоты геоида отражают вариации в распределении масс внутри Земли [9]. В базу геоданных включена глобальная модель аномалий геоида для всего мира (рис. 17.5а).

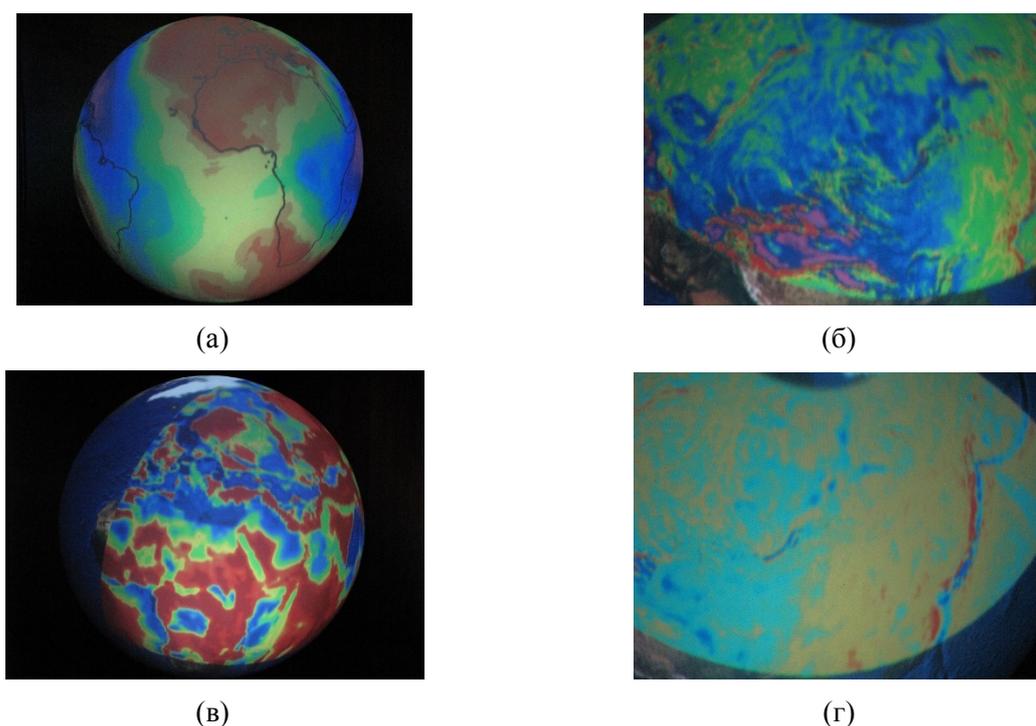


Рисунок 17.5 – Визуализация на сферическом экране: (а) аномалии геоида [17]; (б) аномалии силы тяжести в свободном воздухе, регион Восточной Евразии [17]; (в) аномальное гравитационное поле, вызываемое осадочным чехлом [24]; (г) изостатические аномалии силы тяжести [22, 23]

Она дает общее представление об основных регионах положительных и отрицательных аномалий, явно демонстрируя реальную фигуру Земли. Рассчитанные на основе модели EIGEN-6с2 аномалии в свободном воздухе и аномалии Буге позволяют с высокой точностью восстановить основные плотностные неоднородности земной коры и мантии. Детальность представленных в базе ГИС-слоев (пространственное разрешение ~10 км) позволяет выявлять крупные и крупнейшие аномалообразующие структуры, связанные с особенностью геологического и тектонического строения отдельных регионов Евразии. Положительным аномалиям соответствуют области с более плотными породами, а отрицательным – менее плотные (рис. 17.5б).

В базу геоданных также включены результаты моделирования аномалий гравитационного поля, вызванных раздельным влиянием осадочного чехла (рис. 17.5в), неоднородностей консолидированной коры и мантии. Данные для построения этих трех тематических слоев были получены по результатам детального анализа накопленной геолого-геофизической информации об отдельных регионах Евразии. При создании модели аномального поля, вызываемого осадочным чехлом, были использованы данные о мощности осадков и их плотности с учетом изменения с глубиной. Модель распределения гравитационных аномалий, вызванных плотностными неоднородностями коры от подошвы фундамента до границы Мохоровичича, рассчитывалась относительно постоянной величины плотности, равной $2,85 \text{ г/см}^3$. Значение в каждой точке отражает

влияние аномальных масс в консолидированной коре всей Земли. Значения остаточного мантийного гравитационного поля вычислялись путем исключения аномальных эффектов консолидированных слоев и топографии (батиметрии) из измеренных значений гравитационного поля. Таким образом, полученное результирующее поле отражает неоднородности в мантии [22, 23]. Изостатические аномалии силы тяжести, включенные в базу геоданных, также отражают плотностные неоднородности верхней мантии. Они связаны с вариациями ее температурного и минерального состава и являются одними из движущих сил вертикальных и горизонтальных движений литосферных блоков. Поле изостатических аномалий было рассчитано на основе численной модели распределения плотностей земной коры Северной Евразии. Рассчитанные полные изостатические аномалии силы тяжести включают длинноволновую (длины волн более 2400 км) и региональную составляющие. Длинноволновая часть поля изостатических аномалий отражает глубинные плотностные неоднородности и динамический эффект мантийной конвекции. Региональная компонента характеризует эффект локальных нарушений изостатического равновесия литосферы и плотностные неоднородности коры. Значительные положительные аномалии (более 100 мГал) характеризуют отдельные структуры Восточно-Европейской платформы и Восточной Сибири (рис. 17.5г). Визуализация данных по гравитационному полю Земли на сферическом экране, комбинирование и наложение различных тематических ГИС-слоев позволяет эффективно анализировать характерные особенности глубинного строения Земли [22, 23].

Список использованных источников

1. **Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А.** Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
2. **Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзедобоев Б.А.** Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 44–57.
3. **Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М.** О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013. № 6. С. 3–19.
4. **Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М.** Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23.
5. **Гвишиани А.Д., Дзедобоев 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. (в печати).
6. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
7. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительная сейсмология. Вып. 6. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1973. С. 107–133.

8. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф.С., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Вычислительная сейсмология. Вып. 9. Исследование сейсмичности и моделей Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М., 1976. С. 3–91.
9. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. (2007) Физическая геодезия. [Перевод с английского] М.: Изд-во МИИГАиК, 2007, 427 с.
10. **Рыбкина А.И., Бобков А.Е., Никифоров О.В., Пятыгина О.О.** Программно-аппаратный комплекс для визуализации геофизических данных на сферическом экране // Научная визуализация. 2015. Т. 7, №2. С. 38–49.
11. Свидетельство о регистрации РИД «Программа визуализации данных для сферических экранов Орбус (ORBUS)» №2014618293 от 14.08.14
12. ArcGIS Server REST API, 2016. Получено из ArcGIS Resources: URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/rest/apiref/>
13. ArcMap. Интерактивная справка. ESRI, 2016. Доступно по адресу: URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/>
14. Burggraf D. (Ed.) OGC KML 2.3. Open Geospatial Consortium Inc., 2015. 266 p.
15. De la Beaujardiere J. (Ed.) OpenGIS Web Map Server Implementation Specification. Version 1.3.0. Open Geospatial Consortium, Inc., 2006, 85 p.
16. Dyment, J., Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Thebault, E., Catalan, M., the WDMAM Task Force, the WDMAM Evaluators, and the WDMAM Data Providers World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0, 2015. URL: <http://www.wdmam.org>
17. Förste C., Bruinsma S.L., Shako R., 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. Abstract No. EGU2012-2821
18. GEBCO. General Bathymetric Chart of the Oceans, 2016. URL: <http://www.gebco.net/>
19. **Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B.** Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. 2013. V. 12, № 1. P. 1–10.
20. The ANSS Comprehensive Catalog (ComCat) URL: <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>
21. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Washington, DC, USA: CGIAR-CSI SRTM 90m Database, 2008. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>
22. 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, No. 2. P. 25–144. DOI: 10.2205/2001ES000062
23. Kaban M.K., Schwintzer P., Reigber Ch. A new isostatic model of the lithosphere and gravity field // Journal of Geodesy. 2004. Vol. 78. P. 368–385.
24. Kaban M., Stolk W., Beekman F., Cloetingh S. Density structure of the crust and upper mantle of Asia. (S7-038). International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems GGHS, October 9-12, 2012, Venice, Italy.
25. Olsen N. et al. The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 1092–1098. DOI: 10.1002/2014GL062659
26. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2) / In V. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley, 1981. P. 21–36.

18. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионах России (Камчатка, Сахалин и Курильские острова) на основе кластеризационного исследования эпицентров землетрясений

Грант РФФИ №16-35-00603 мол_а
Руководитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзобов

Из всей совокупности существующих методов распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений наиболее достоверным на сегодня можно считать классический метод распознавания с помощью алгоритма дихотомии с обучением «Кора-3». Этот метод в литературе часто называют методом EPA (Earthquake-Prone Areas recognition) [1]. Метод EPA создан и развит в работах советских и российских математиков и геофизиков академиков И. М. Гельфанда, В. И. Кейлис-Борока, А. Д. Гвишиани, чл.-корр. Ал. А. Соловьева, а также В. Г. Кособокова, Е. Я. Ранцман, А. И. Горшкова, В. А. Гурвича и др. Как показала независимая проверка, на сегодня более 80% сильных землетрясений, произошедших в исследованных методом EPA регионах, после публикации соответствующих работ, произошли в местах, распознанных ранее данным методом как потенциально высокосейсмичные. При этом более 30% землетрясений произошли в распознанных зонах, в которых ранее не были зафиксированы сейсмические события прогнозируемой магнитуды [7]. Это является мощным подтверждением эффективности использования распознавания образов в определении потенциальных высокосейсмичных зон.

В Геофизическом центре Российской академии наук под руководством академика РАН А. Д. Гвишиани создана оригинальная алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning), позволяющая проводить распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений принципиально отличным от EPA способом. При этом результирующие карты EPA и FCAZ могут быть эффективно сопоставимы. Система FCAZ представляет собой суперпозицию применений алгоритма DPS (Discrete Perfect Sets), позволяющего проводить топологическую фильтрацию массива и отсекающую от него несущественные (неплотные) части, и алгоритма E^2XT , осуществляющего однозначно формализованное отображение DPS-кластеров в плоские зоны ненулевой меры с точными границами в пределах рассматриваемого региона, определяемые формой содержащихся в них распознанных DPS-кластеров.

Ядром системы FCAZ является алгоритм топологической фильтрации DPS (Discrete Perfect Sets) [2, 3]. Он выделяет в конечном множестве евклидова пространства плотные области заданного уровня плотности α . Задача алгоритма DPS состоит в построении такого множества, что его плотность будет не меньше уровня α во всех своих точках. Подчеркнем, что алгоритм DPS эффективен в решаемой нами задаче потому, что он «притягивает» практически все рассматриваемые объекты в кластеры, не оставляя изолированных точек.

Принципиальная новизна FCAZ состоит в том, что система обладает формализованным блоком перехода от классификации точечных объектов (эпицентров слабых землетрясений) на высоко- и низкосейсмичные к искомым плоским высокосейсмичным зонам с определенными границами. В системе FCAZ за такой формализованный переход отвечает алгоритм E²XТ [2, 3].

В рамках гранта РФФИ в 2016 г. с помощью алгоритмической системы FCAZ было выполнено распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильнейших ($M \geq 7^{3/4}$) землетрясений на востоке Камчатки.

В 1984 году распознавание мест возможного возникновения сильнейших землетрясений на востоке Камчатки было выполнено методом ЕРА [4]. Следует заметить, что в работе [4] авторами не проводилось обучение алгоритмов распознавания. Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ были получены авторами путем переноса критериев высокой сейсмичности с горного пояса Анд на территорию Камчатки.

При распознавании мест возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений на Камчатке в качестве объектов распознавания мы использовали эпицентры землетрясений из каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [5] за период 1962–2015 гг.

Для выбора порога магнитуды M_R , начиная с которого эпицентры будут использоваться как объекты распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды M_c (completeness magnitude) в каталоге. Оказалось, что для рассматриваемого каталога $M_c = 3,5$. Учитывая это, было принято решение использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с $M \geq M_R = 3,5$.

Каталог коровых сильнейших землетрясений Камчатки, начиная с 1900 г., был сформирован на основе рассматриваемого инструментального каталога, а также каталогов из работ [4, 6, 7].

Карта-схема мест возможного возникновения эпицентров сильнейших ($M \geq 7^{3/4}$) землетрясений на Камчатке, определенных А. Д. Гвишиани, М. П. Жидковым и Ал. А. Соловьевым методом ЕРА, была опубликована в 1984 году [4]. С момента ее публикации на Камчатке произошло одно новое сильное землетрясение. Его эпицентр согласуется с результатами распознавания [4], что повышает достоверность последних.

DPS-кластеризация эпицентров землетрясений осуществлялась с использованием критерия выбора уровня максимальной плотности [2]. Было выполнено 2 итерации алгоритма DPS. Искомые DPS-кластерами были объявлены все распознанные связные компоненты. При этом в распознанные кластеры вошло 70,5% от рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с $M \geq 3,5$).

К высокосейсмичным кластерам был применен алгоритм E²XТ. На рис. 18.1 показаны распознанные системой FCAZ зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений на Камчатке. Так как внутри распознанных зон попадают почти все землетрясения $M \geq 7^{3/4}$, то с достаточно большой степенью достоверности мы можем интерпретировать эти зоны как зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 7^{3/4}$ на Камчатке.

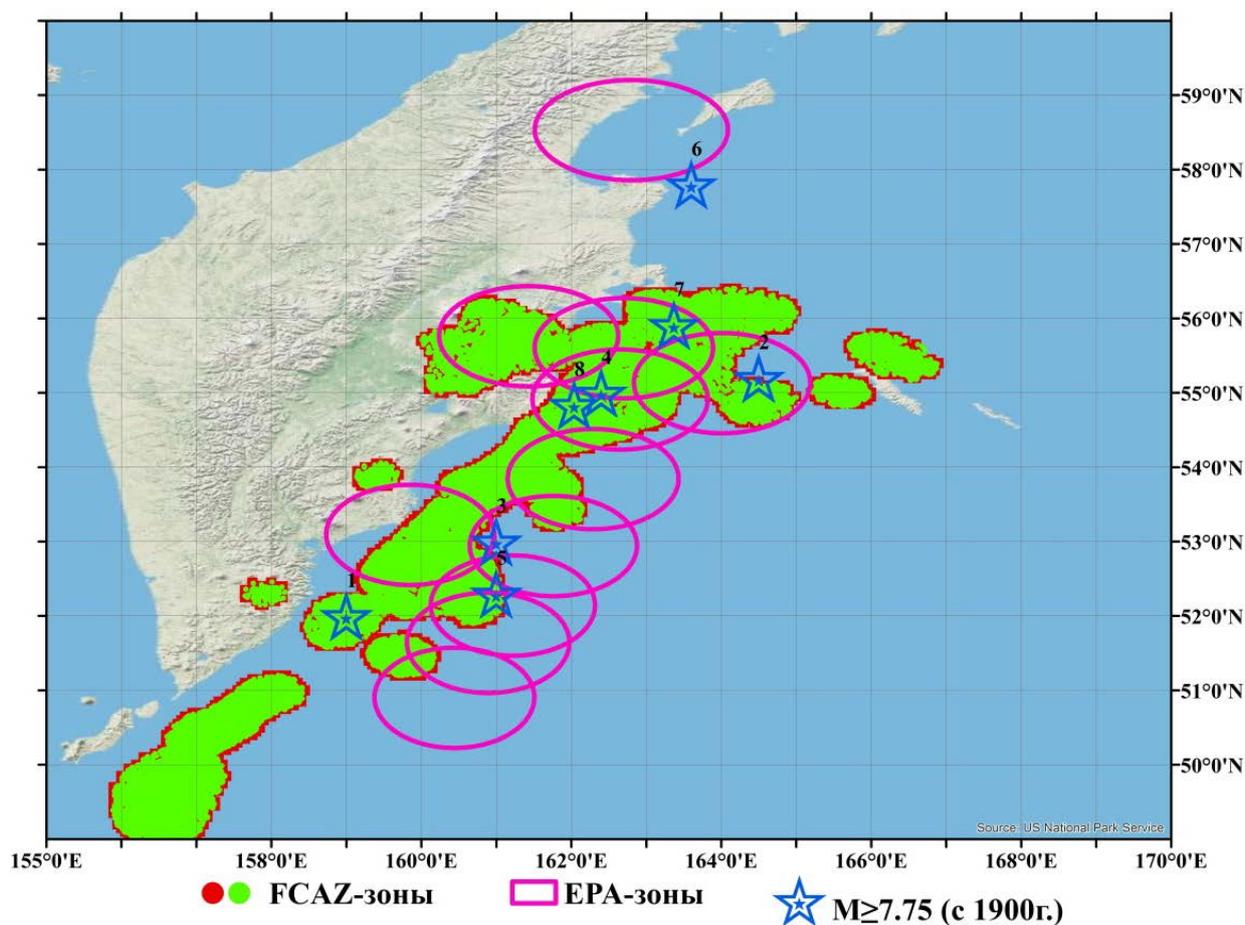


Рисунок 18.1 – Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших ($M \geq 7^{3/4}$) землетрясений на Камчатке, распознанные системой FCAZ и методом ERA

Как видно из рис. 18.1, распознанные зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров сильнейших ($M \geq 7^{3/4}$) землетрясений. Эпицентры практически всех землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ попадают во FCAZ-зоны или располагаются на их границах. Из 8 рассматриваемых нами сильнейших землетрясений эпицентр только одного (12,5%) не попал в распознанные FCAZ-зоны (рисунок), создавая ошибку типа «пропуск цели». Это эпицентр землетрясения, произошедшего 22 ноября 1969 года на севере рассматриваемого региона (№ 6 на рис. 18.1).

Оценка достоверности распознавания потенциальных высокосейсмичных зон осуществляется контрольными экспериментами. Как правило, при распознавании методом FCAZ мы проводим два типа контрольных экспериментов: «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». При эксперименте «индивидуальная сейсмическая история» FCAZ-зоны строятся по результатам DPS-кластеризации эпицентров только за 20 лет перед сильными землетрясениями. Эксперимент заканчивается анализом взаимного расположения распознанных зон и эпицентра сильного землетрясения, для которого эти зоны были распознаны. Во втором эксперименте из используемого каталога исключаются эпицентры за несколько последних лет. После чего строятся FCAZ-зоны по результатам DPS-кластеризации оставшихся в

каталоге эпицентров землетрясений. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентров сильных землетрясений из отброшенной части каталога.

Так как на Камчатке за последние десятилетия произошло только одно землетрясение с $M \geq 7^{3/4}$, то описанные выше контрольные эксперименты становятся взаимно заменяющими. Поэтому нами был проведен только эксперимент «полная сейсмическая история».

При проведении эксперимента из рассматриваемого каталога были исключены эпицентры за несколько последних лет. После чего были построены FCAZ-зоны по результатам DPS-кластеризации эпицентров землетрясений с $M \geq 3,5$ за 1962–1990 гг. При этом использовались те же значения свободных параметров алгоритмов DPS и E²XТ, что и при обработке всего каталога в основном варианте распознавания. Эксперимент завершается анализом расположения эпицентра землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$, произошедшего в 1997 г. Сравнение основного результата распознавания (рисунок) и полученных в эксперименте FCAZ-зон «полной сейсмической истории» показывает, что они достаточно близки. Эпицентр землетрясения 1997 г. находится внутри распознанных в результате эксперимента FCAZ-зон, хотя информация о нем никак не использовалась при распознавании. Таким образом, результат контрольного эксперимента следует признать успешным. Он говорит в пользу достоверности интерпретации полученных FCAZ-зон как зон возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений на Камчатке.

Было проведено сравнение зон возможного возникновения землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ на Камчатке, распознанных методом ЕРА [4] и системой FCAZ. На рис. 18.1 показаны ЕРА-зоны [4], оцифрованные в [7]. Особенности построения схемы морфоструктурного районирования Камчатки и распознавания алгоритмом «Кора-3» можно объяснить то, что эпицентры некоторых землетрясений (№ 1 и № 6), используемых для обучения алгоритма «Кора-3» при ЕРА-распознавании, не попадают в зоны ЕРА.

Сравнение зон возможного возникновения сильнейших землетрясений на Камчатке, распознанных сегодня алгоритмической системой FCAZ и 32 года назад методом ЕРА, приведено на рис. 18.1. Из рисунка видно, что ЕРА и FCAZ-зоны достаточно хорошо согласовываются. Площадь FCAZ-зон занимает примерно 78% от площади ЕРА-зон. При этом 7 эпицентров из 8 рассматриваемых попадают в зоны FCAZ.

Список использованных источников

1. **Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А.** Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 176 с.
2. **Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М.** Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23.
3. **Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М.** О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013. № 6. С. 3–19.

4. **Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А.** К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Физика Земли. 1984. № 1. С. 20–33.
5. Камчатский филиал Геофизической службы РАН. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов. URL: <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 536 с.
7. **Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В.** Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20.

19. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря по данным спутниковой альтиметрии

Грант РФФИ №16-35-50059 мол_нр
Руководитель: в.н.с., д.ф.-м.н. С. А. Лебедев

Традиционные методы измерения уровня на уровневых постах в Балтийском море имеют ряд недостатков: 1) данные измерений включают современные вертикальные движения земной коры (СВДЗК), которые вносят значительную ошибку в расчеты межгодовой изменчивости уровня; 2) неравномерность распределения уровневых постов по побережью моря не позволяет провести анализ изменчивости уровня моря по всей его акватории; 3) частота проведения измерений на различных постах может существенно отличаться (так на одних постах измерения проводятся каждый час, на других – 2 раза в сутки); 4) доступ к информации с максимальной частотой измерений часто ограничен.

Спутниковая альтиметрия обладает рядом преимуществ по сравнению с измерениями на уровневых постах. Измерения высоты морской поверхности (ВМП) или уровня моря проводятся относительно отчетного эллипсоида, связанного с центром масс Земли, поэтому СВДЗК исключены из измерений. Альтиметрические измерения проводятся в микроволновом диапазоне, обладающем высокой проникающей способностью радиоволн через атмосферу, в результате чего наблюдения могут проводиться в любое время суток, в любую погоду, при наличии в воздухе достаточно высоких концентраций аэрозолей. Измерения ВМП проводятся по всей морской акватории, что позволяет исследовать изменчивость уровня как для моря в целом, так и для его отдельных частей. Доступ к данным спутниковой альтиметрии открыт для всех исследователей. Это дает возможность проводить исследования любой акватории Мирового океана. Таким образом, спутниковая альтиметрия является альтернативным методом исследования изменчивости уровня моря.

Регион Балтийского моря характеризуется большими СВДЗК, поэтому традиционные методы измерения уровня на уровневых постах вносят значительную ошибку в расчетах межгодовой изменчивости уровня моря. В связи с неравномерным расположением устьев балтийских рек на берегах моря речной сток неодинаков в его разных районах. Больше половины материкового стока поступает в восточные районы моря. Временная неравномерность речного стока проявляется в сезонных и межгодовых изменениях его величин. В юго-западной части Балтийского моря приток талых вод наступает уже в марте, а в центральной части Балтийского моря в апреле. В Рижском заливе главный максимум стока наступает весной, небольшое повышение осенью, в то время как Финский залив характеризуется самым высоким стоком талых вод в мае–июне. Ежегодный минимум стока речных вод наблюдается летом в центральной части Балтийского моря, а осенью и зимой – в северных районах. На уровеньный режим Балтийского моря большое влияние оказывает ледовый режим, что затрудняет проведение альтиметрических измерений ВМП. Морской лед появляется сначала в заливах в октябре–ноябре. Побережье Ботнического и значительная часть побережья (кроме южного берега)

Финского залива покрываются припаем толщиной до 65 сантиметров. Центральная и южная части моря обычно льдом не покрываются. Лед начинает таять в апреле, хотя на севере Ботнического залива дрейфующий лед может встречаться и в июне. Часто встречается всплывший донный лед.

Основной задачей проекта было исследование сезонной и межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря по данным спутниковой альтиметрии. Однако для верификации данных дистанционного зондирования потребовались традиционные измерения с уровенных постов. По проекту были созданы три базы данных: база данных ежечасных измерений на 24 уровенных постах Шведского гидрометеорологического института (SHMI), база данных среднемесячных измерений на 19 постах из Архива постоянной службы среднего уровня моря (PSMSL) и региональная база данных альтиметрических спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2/3 (J1/2/3) на основе Radar Altimeter Database System (RADS). Расположение постов и треков спутников T/P и J1/2 представлено на рис. 19.1.

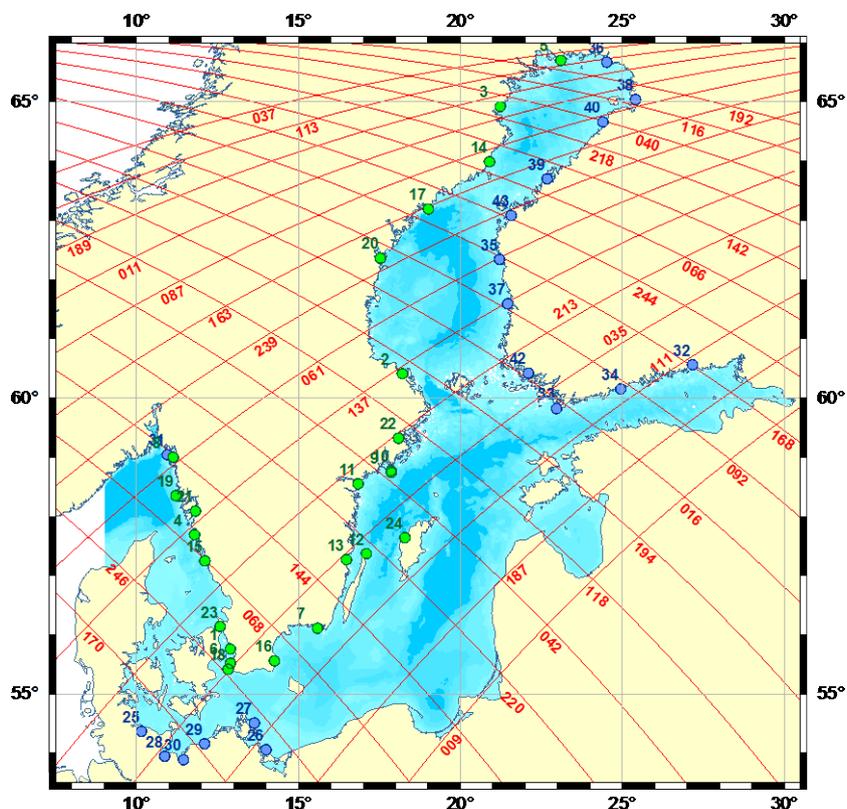


Рисунок 19.1 – Расположение уровенных постов и треков спутников T/P и J1/2 по акватории Балтийского моря. Зелеными кружками отмечено положение уровенных постов SMHI, синими – международной службы PSMSL

Для анализа уровня Балтийского моря наиболее оптимальными являются данные альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2/3. Это обусловлено следующими причинами: точность измерения высоты морской поверхности для этих спутников максимальна; временной масштаб повторения измерений вдоль трека – 9,916 суток – наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной изменчивости

уровенного режима Балтийского моря; массивы данных этих спутников можно объединить в единый временной ряд при условии учета систематической ошибки.

Обработка данных спутниковой альтиметрии проводилась с применением программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) с учетом всех необходимых поправок.

При обработке данных альтиметрических измерений вышеперечисленных спутников использовались все необходимые поправки: поправка на «сухую» атмосферу, рассчитанная по модели ECMWF, поправка на влажность, рассчитанная по данным бортового микроволнового радиометра и ионосферная поправка, рассчитанная по измерениям альтиметра на двух рабочих частотах. Поправка на состояние подстилающей поверхности, или электромагнитное смещение (electromagnetic bias – EMB) рассчитывалась по модели Трана (Tran). Поправка обратного барометра не использовалась, так как данные уровенных постов содержат данную поправку. Поправка на морские приливы и нагрузка на дно не использовалась. Поправка на приливы в земной коре рассчитывалась по модели Маккарти (McCarthy) и Петита (Petit). Поправка на полюсный прилив рассчитывалась по модели Петита и Лазума (Luzum).

Объединение данных спутников Т/Р и J1/2 в единый ряд альтиметрических измерений требует проведения анализа данных за временной интервал работы спутников в режиме тандема. Такой режим работы предполагал, что спутники имеют одинаковые параметры орбиты, треки спутников совпадают, а разница по времени в пролете одного спутника за другим минимальна. Для спутников J1 и Т/Р и спутников J1 и J2 эта разница в среднем 70 с. Спутники Т/Р (344–364 циклы) и J1 (1–21 циклы) работали в тандеме с января по август 2002 г., а спутники J1 (239–259 циклы) и J2 (0–20 циклы) – с августа 2008 г. по январь 2009 г.

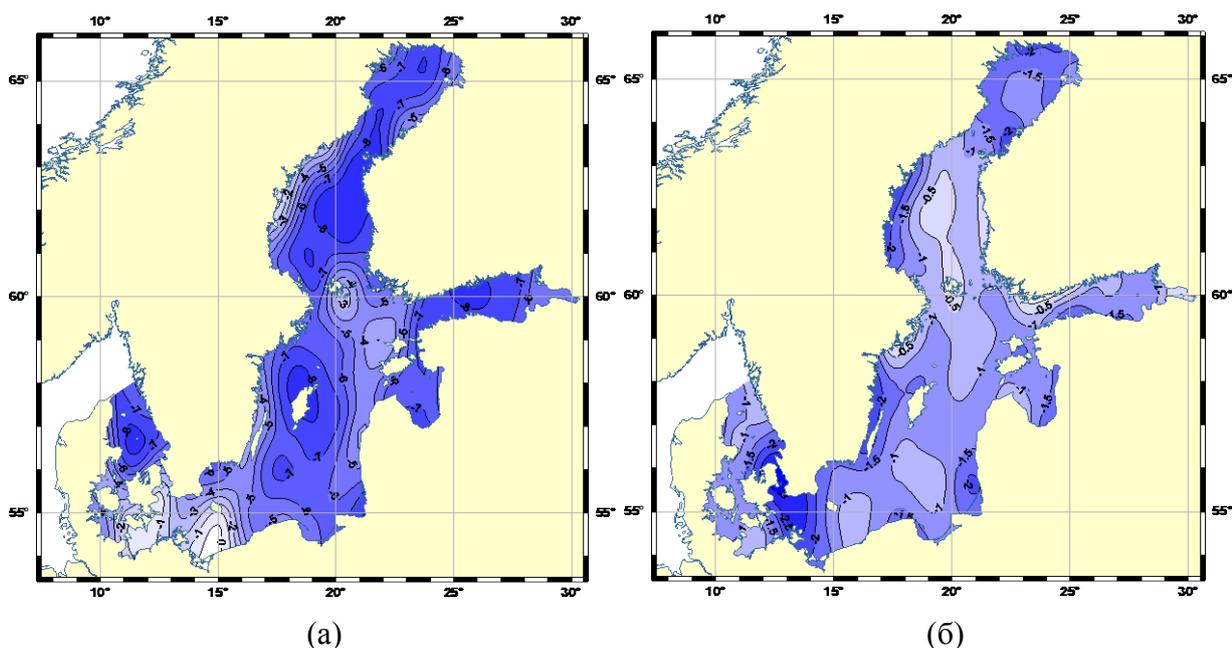


Рисунок 19.2 – Систематическая ошибка или разница в измерениях ВМП (см) между спутниками Т/Р и J1(а) и J1 и J2 (б)

Разница между альтиметрическими измерениями ВМП со спутников Т/Р и J1 (или систематическая ошибка) для Балтийского моря в среднем составила $-5,72 \pm 2,12$ см. Максимальная разница (более -8 см) наблюдается в центральной части пролива Каттегат, в районе о. Готланд, в центральной части Ботнического моря и в Финском заливе у побережья Финляндии (рис. 19.2а). В районе дельты реки Одер картина меняется, измерения спутника Т/Р превышают измерения спутника J1 более чем на 0,25 см. Разница в измерениях ВМП спутников J1 и J2 для Балтийского моря в среднем составила $-1,15 \pm 0,65$ см (рис. 19.2б). Максимальная разница между измерениями ВМП этих спутников (более -2,5 см) наблюдается в Центральной части моря у границ с Датскими проливами, а минимальная (менее -0,5 см) в центральной части Ботнического моря.

Для верификации альтиметрических измерений на треках выбирались точки, близлежащие к уровенным постам, для которых строились ряды альтиметрических измерений, по времени максимально приближенные к измерениям на постах. Результаты показали, что для 20 из 24 постов SHM1 коэффициент корреляции уровня моря контактных и дистанционных измерений лежит в диапазоне 0,889–0,969, а для 13 из 19 уровенных постов PSMSL лежит в диапазоне 0,803–0,959. Более низкие коэффициенты корреляции наблюдаются для уровенных постов, расположенных в районе Датских проливов или в проливе Каттегат.

Сезонная изменчивость анализировалась по временной изменчивости аномалий уровня моря в фиксированных точках на треках и в точках пересечения восходящих и нисходящих треков. Максимальные величины средней амплитуды сезонного хода уровня (более 50 см) наблюдаются в Финском и Рижском заливах, куда впадают полноводные реки Нева (годовой сток $83,5 \text{ км}^3$) и Даугава (годовой сток $19,7 \text{ км}^3$), а наименьшие (менее 30 см) – в проливе Каттегат и Датских проливах (рис. 19.3а). Среднеквадратичные отклонения средней амплитуды сезонного хода более 11 см наблюдаются в Финском и Ботническом заливах, а минимальные значения (менее 8 см) – в проливе Каттегат и Датских проливах (рис. 19.3б).

За временной период 1993–2015 гг. во временном ходе уровня Балтийского моря было выделено 6 интервалов роста и 6 интервалов падения уровня моря (рис. 19.4). Так с января 1993 г. по май 1994 г. уровень моря падал со скоростью $-19,21 \pm 2,31$ см/год. В следующие шесть месяцев (по декабрь 1994 г.) наблюдался сильный подъем уровня моря со скоростью $+39,29 \pm 4,02$ см/год. Короткий период уже резкого падения уровня Балтийского моря со скоростью $-29,40 \pm 3,72$ см/год наблюдался с декабря 1994 г. по февраль 1996 г. С февраля 1996 г. по ноябрь 1998 г., уровень Балтики снова рос со скоростью $+7,44 \pm 0,65$ см/год, а с ноября 1998 г. по декабрь 2002 г. – падал со скоростью $-1,47 \pm 0,32$ см/год. Затем с декабря 2002 г. по январь 2005 г. уровень моря поднимался со скоростью $+12,25 \pm 1,71$ см/год. С января 2005 г. по март 2006 г. уровень моря падал со скоростью $-15,40 \pm 3,72$ см/год, а в следующий временной интервал с марта 2006 г. по январь 2007 г. наблюдалась максимальная скорость подъема уровня моря $+66,02 \pm 0,83$ см/год. С января 2007 г. по февраль 2010 г. уровень Балтийского моря падал со скоростью $-7,26 \pm 0,32$ см/год. Следующие 23 месяца (с февраля 2010 г. до января 2012 г.) уровень моря рос со скоростью $+16,57 \pm 1,37$ см/год. В настоящее время уровень Балтийского моря поднимается со скоростью $17,37 \pm 0,83$ см/год. В среднем за весь период

1992–2015 гг. колебания уровня моря имели положительную тенденцию межгодовой изменчивости $+0,42 \pm 0,07$ см/год.

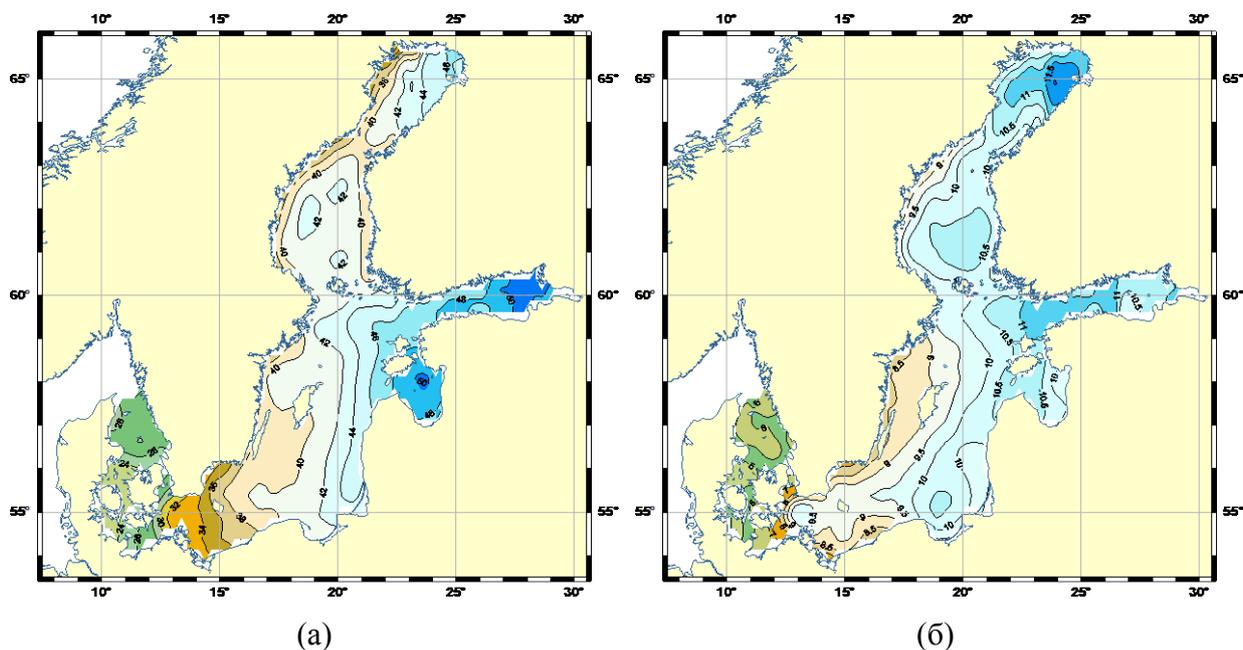


Рисунок 19.3 – Карты средней величины амплитуды сезонного хода уровня (см) (а) и ее среднеквадратичного отклонения (б)

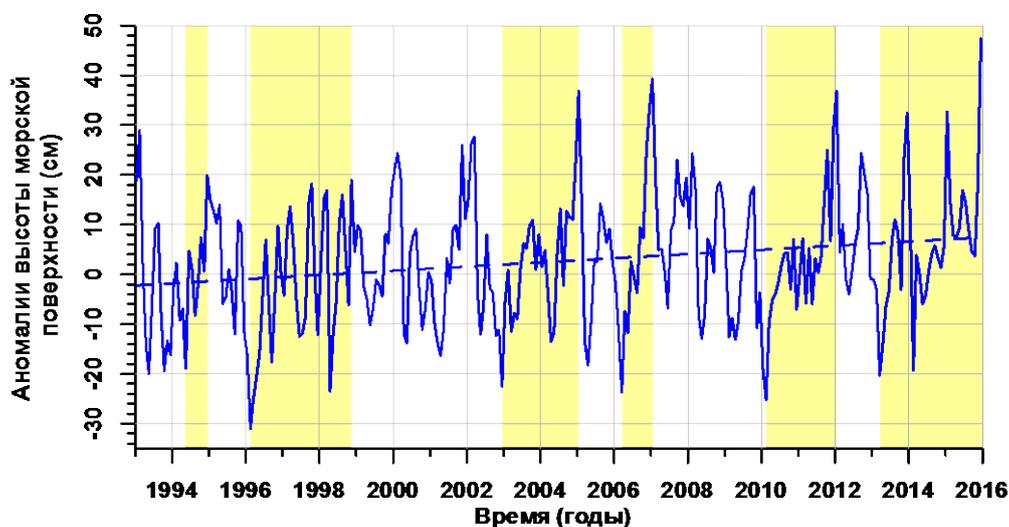


Рисунок 19.4 – Временная изменчивость аномалий высоты морской поверхности Балтийского моря по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 за период с января 1993 г. по декабрь 2015 г. Периоды роста выделены желтым цветом

Однако для каждого выделенного временного интервала подъема или падения уровня Балтийского моря наблюдалась неравномерность по пространству скорости изменчивости уровня. Поэтому для каждого интервала и временного интервала в целом (рис. 19.5) были построены карты пространственной неоднородности скоростей изменения уровня моря с шагом по широте и долготе $0,25^\circ$. На основании этих карт была

построена консолидированная карта нормированных скоростей межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря (рис. 19.6).

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 (рис. 19.5). 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.

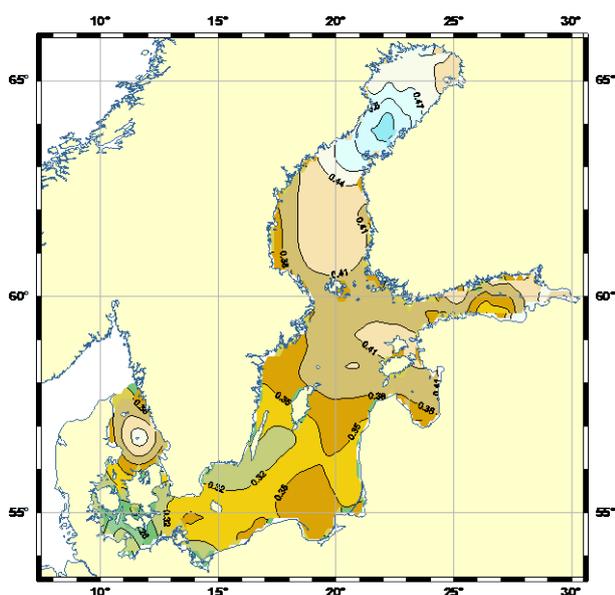


Рисунок 19.5 – Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Балтийского моря (см/год) с января 1993 г. по декабрь 2015 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2.

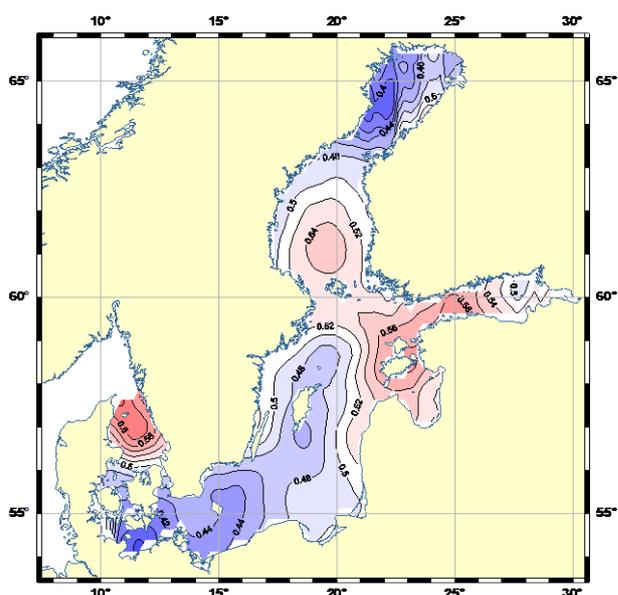


Рисунок 19.6 – Нормированные скорости изменения уровня Балтийского моря по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с января 1993 г. по декабрь 2015 г.

Таким образом, основные результаты, полученные по проекту, совпадают с ожидаемыми результатами:

1. Выделены интервалы роста и падения уровня Балтийского моря за временной период 1993–2015 гг.
2. Построены карты пространственной изменчивости уровня моря для каждого из выделенных на предыдущем этапе временных интервалов.
3. Построены консолидированные карты пространственной неоднородности роста и падения уровня Балтийского моря.

20. Создание методики мониторинга сейсмической активности на основе методов дискретного математического анализа

Грант Президента РФ МК-4555.2016.5
Руководитель: с.н.с., к.ф.-м.н. Б. А. Дзедобоев

Для целей оценки сейсмической опасности необходимо проведение непрерывного геофизического мониторинга в целом, и в первую очередь – сейсмического мониторинга. В этой связи разработка методов мониторинга сейсмической активности на базе алгоритмов дискретного математического анализа является, безусловно, актуальной.

Дискретный математический анализ (ДМА) является новым подходом к анализу данных, разработанным в Геофизическом центре РАН. ДМА – это серия алгоритмов, нацеленных на решение основных задач анализа данных [2, 3, 6, 11 и др.]. ДМА-алгоритмы и их комбинации позволяют проводить мониторинг сейсмического процесса, нерегулярного как во времени, так и в пространстве.

Разрабатываемый ДМА-мониторинг сейсмической активности территории заключается в использовании хорошо зарекомендовавших себя ДМА-методов для анализа каталогов землетрясений. Сейсмический процесс анализируется путем изучения его поведения в узлах координатной сетки с заданным шагом (реперных точках) и построения мер активности. В качестве меры активности мы используем величину μ , определяемую по алгоритму топологической фильтрации (кластеризации) DPS (Discrete Perferct Sets) [5, 7, 8, 11, 12]. Алгоритм DPS является частью ДМА [1, 3, 4]. Он выделяет в конечном множестве евклидова пространства плотные области заданного уровня плотности α . На выходе получается множество точек α -плотное в каждой своей точке.

Рассматриваемая в настоящей работе мера μ изменяется в пределах $[-1; 1]$. В отличие от классической меры сейсмической активности [9], мера μ отражает меняющуюся во времени относительную плотность эпицентров в сравнении с пространственным окружением. Локальное увеличение во времени меры μ может отражать увеличение активности слабых землетрясений, часто сопровождающих финальный этап подготовки сильного землетрясения [13, 14]. Таким образом, вариации меры μ во времени могут служить и для диагностики периодов повышения степени сейсмической опасности и оценки места готовящегося землетрясения.

Под мониторингом сейсмической активности в настоящей работе мы понимаем анализ и изучение поведения совокупности временных рядов меры μ в реперных точках. Временные ряды строятся с постоянным шагом T . На каждом шаге рассматривается временной интервал t_i длительности T . Для каждого интервала с помощью алгоритма DPS выделяется плотное подмножество эпицентров землетрясений. Одним из двух входных параметров алгоритма DPS является параметр $\beta \in [-1; 1]$, определяющий уровень плотности. Параметр β варьируется с постоянным шагом для переноса результатов DPS-анализа каталога землетрясений за период времени t_i на узлы мониторинга и тем самым для построения ДМА-методами для каждого узла сетки η_j нечеткой меры активности $\mu_{\eta_j}(t_i)$

[16] сейсмического процесса. В качестве нечеткой меры активности в данной работе принято максимальное значение $\beta^* \in [-1; 1]$, при котором узел является достаточно близким к выделенному плотному подмножеству эпицентров землетрясений. В данном случае критерием близости является попадание хотя бы одного эпицентра из выделенного подмножества в круг радиуса R с центром в узле. Если узел не является близким ни к одному из выделенных алгоритмом DPS подмножеств, то его мера активности равна -1.

Так как сейсмический процесс в некоторой пространственной окрестности является нерегулярным во времени, а изменение уровня его активности, часто указывающего на увеличение или уменьшение потенциального сейсмического риска, происходит на протяжении некоторого временного интервала, то при оценке сейсмической активности в момент времени t_i необходимо учитывать ее память по времени. Для этого в каждый момент времени t_i для каждого узла сетки η_j значение меры μ пересчитывается с учетом памяти на временном интервале $[t_{i-\Delta}, t_{i-1}]$ в виде степенного усреднения с весовыми коэффициентами. Тем самым, мы получаем, что при вычислении меры $\mu_\Delta(t_i)$ используются данные о сейсмическом процессе за Δ предшествующих интервалов времени. Так как степенное усреднение работает только на множестве неотрицательных чисел, то мера μ предварительно переводится из отрезка $[-1; 1]$ в отрезок $[0; 1]$. Мера μ_Δ изменяется в пределах $[0; 1]$.

Тестирование разработанного подхода к мониторингу сейсмической активности проведено для территории Калифорнии и прилегающих штатов США в пределах 30° – 44° с.ш., 113° – 126° з.д. Использовался каталог ANSS (Advanced National Seismic System) за период 1962–2015 гг. Брались эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 2,9$, т.к. их представительность в каталоге за рассматриваемый период достаточно высока. Шаг по времени – $T=1$ месяц, шаг сетки по долготе и широте – $0,5^\circ$, шаг по β – $0,05$, $q=-2$ [12], $\Delta=12$ месяцев, $R=80$ км.

Анализ полученных с помощью разработанной методики результатов мониторинга сейсмической активности проводился за период 1980–2015 гг., т.к. начиная с 1980 г. каталог достаточно полон для всей изучаемой в работе территории.

В качестве примера на рис. 20.1 представлено пространственное распределение меры μ_Δ по состоянию на 1 апреля 2010 г. Легко заметить две зоны с большими значениями меры активности сейсмического процесса. Это зона на юге центральной Калифорнии вблизи границы со штатом Невада и зона на границе с Мексикой. Внутрь второй зоны попадает эпицентр землетрясения 4 апреля 2010 г. с магнитудой $M=7,2$, расположенный на севере Мексики. Чуть меньшие значения меры μ_Δ имеют две зоны: побережье центральной Калифорнии и в океане вблизи побережья на севере Калифорнии. В апреле 2010 г. в этих зонах произошли землетрясения с $M=4,0$ – $4,5$.

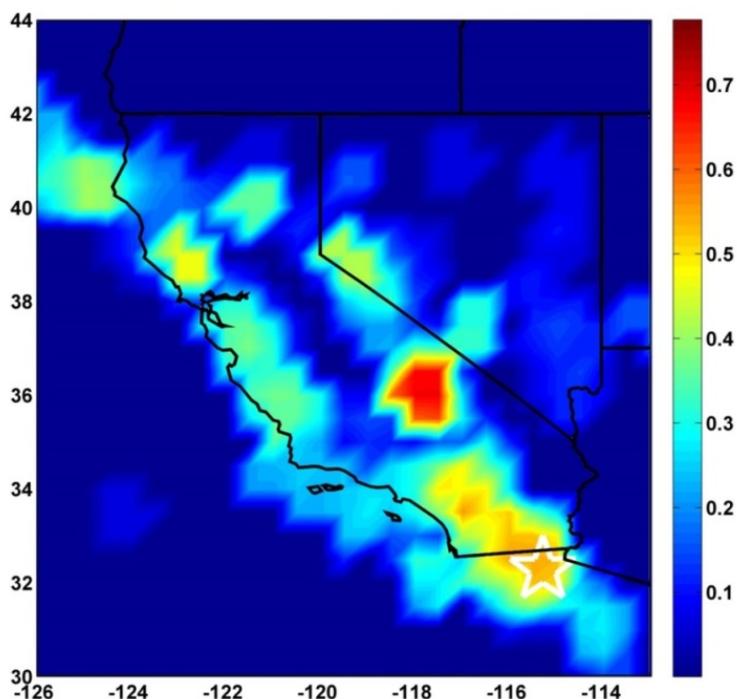


Рисунок 20.1 – Значение меры μ_{Δ} по состоянию на 1 апреля 2010 г. Белой звездой показан эпицентр землетрясения 4 апреля 2010 г. с $M=7,2$

На рис. 20.2 показано изменение во времени значений меры μ_{Δ} в трех реперных точках, расположенных в разных районах изучаемого региона. Как видно из рисунка, все землетрясения с $M \geq 5$, эпицентры которых находятся в окрестности рассматриваемых узлов сетки, произошли при значениях меры μ_{Δ} больших 0,45. Примерно половине землетрясений с $4,5 \leq M < 5$ предшествует превышение мерой μ_{Δ} значения 0,45.

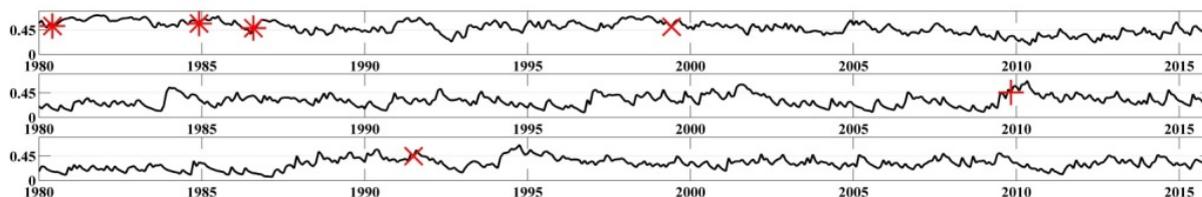


Рисунок 20.2 – Изменение во времени значений меры активности μ_{Δ} в трех реперных точках. Плюсиками показаны землетрясения с $5 \leq M < 5,5$; крестиками – $5,5 \leq M < 6$; звездочками – $M \geq 6$

За рассматриваемый период времени на изучаемой территории произошло 258 сейсмических событий с $M \geq 5$ с учетом афтершоков и 146 в смысле основных толчков. Значительная часть из них произошла на фоне превышения мерой активности μ_{Δ} уровня 0,45.

Была проведена оценка эффективности разработанного метода мониторинга сейсмической активности с помощью диаграммы ошибок [10]. Рассматриваемое пространство и время разбиты на ячейки $1 \text{ месяц} \times 0,5^\circ$. Если ввести порог μ_0 для меры μ_Δ , то превышение этого порога может рассматриваться как прогноз землетрясения с $M \geq 5$ в данной пространственной ячейке в течение последующего интервала времени. Землетрясения с $M \geq 5$ с эпицентрами вне ячеек с прогнозом считаются пропуском цели. Их доля ν изображается на диаграмме ошибок по оси ординат (рис. 20.3). По оси абсцисс изображена вероятность τ случайного попадания землетрясения с $M \geq 5$ в ячейку с прогнозом в соответствии с заданной моделью сейсмичности [15]. Как правило, используется простейшая модель сейсмичности, в которой вероятность землетрясения пропорциональна числу зарегистрированных в данной пространственной ячейке землетрясений, с магнитудой, например, $M \geq 4$. Поэтому величина τ часто интерпретируется как доля пространства–времени тревог, взвешенная по сейсмичности [14]. Чем больше отклонение диаграммы ошибок от диагонали (диагональ соответствует случайному угадыванию), тем эффективнее алгоритм [10]. Из диаграммы (рис. 20.3) видно, что эффективность разработанной методики мониторинга сейсмической активности весьма высока. Полученные результаты значительно отличаются от случайного угадывания.

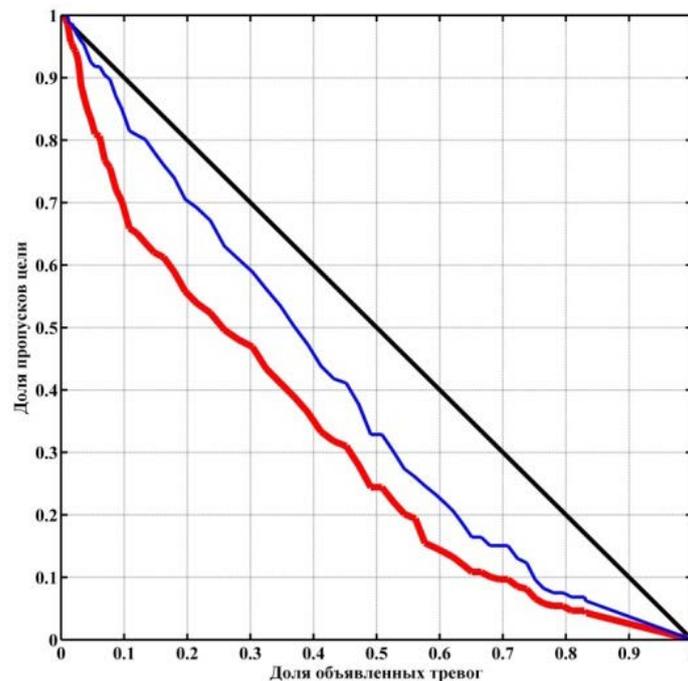


Рисунок 20.3 – Диаграмма ошибок. Красной линией показана зависимость между процентом пропусков цели и процентом объявленных тревог для всех землетрясений с $M \geq 5$ в изучаемом регионе, синей – только для основных толчков с $M \geq 5$

Список использованных источников

1. Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Злотники Ж., Родкин М.В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН. 2005. Вып. 1. С. 143–155.
2. 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.
3. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 26–31.
4. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002. № 2. С. 104–122.
5. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзобоев Б.А. Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 44–57.
6. Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринев В.Н., Богоутдинов Ш.Р. Геоинформационные технологии: методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. 2008. № 2. С. 3–14.
7. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23.
8. Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013. № 6. С. 3–19.
9. Ризниченко Ю.В. Сейсмическая активность и энергия максимальных землетрясений // Проблемы геофизики Средней Азии и Казахстан. М., 1967. С. 36–51.
10. Шебалин П.Н. Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания менее года // Алгоритмы прогноза землетрясений (Вычислительная сейсмология. Вып. 37). М.: ГЕОС. 2006. С. 5–180.
11. Agayan S.M., Bogoutdinov S.R., Dobrovolsky M.N. Discrete perfect sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. Vol. 50. № 2. P. 176–190.
12. Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B. Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. 2013. Vol. 12. No. 1. P. 1–10.
13. Keilis-Borok V., Ismail-Zadeh A., Kossobokov V., Shebalin P. Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction // Tectonophysics. 2001. V. 338. I. 3–4. SI. P. 247–260.
14. Kossobokov V., Shebalin P. Earthquake Prediction // Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer, 2003. P. 141–207.
15. Shebalin P., Narteau C., Holschneider M., Zechar J. Combining earthquake forecast models using differential probability gains // Earth, Planets and Space. 2014. Vol. 66:37. P. 1–14.
16. Soloviev A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Kulchinskiy R. and Zlotnicki J. Mathematical Tools for Geomagnetic Data Monitoring and the INTERMAGNET Russian Segment // Data Science Journal. 2013. Vol. 12. P. WDS114–WDS119.

21. Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ–Крым и Алтай–Саяны–Прибайкалье

Номер гос. регистрации: 115080540013

Проект РНФ №15-17-30020

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

Выполнены исследования по определению в регионе Кавказ–Крым мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений (с магнитудой $M \geq M_0$) для различных значений порога M_0 (4,5; 5,0; 6,0). В случае $M_0=6,0$ путем применения алгоритма распознавания образов «Кора-3» были сформулированы характерные признаки высокосейсмичных узлов (пересечений морфоструктурных линейментов) Кавказа [6]. При этом использован набор геолого-геофизических характеристик узлов, расширенный по сравнению с традиционным за счет включения в него геомагнитных характеристик, отражающих литосферные аномалии магнитного поля Земли. На основе полученных характерных признаков определены места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6,0$ в пределах Горного Крыма и прилегающего морского шельфа, включая зону континентального склона. Эти места показаны на рис. 21.1. Они подтверждают высокий сейсмический потенциал района Ялты, где в 1927 г. произошли 2 события с $M=6,0$ и $M=6,8$. Эпицентры этих землетрясений попадают в окрестности пересечений, отнесенных к высокосейсмичным. Землетрясения в интервале магнитуд 5,0–5,9, расположенные на Черноморском шельфе и континентальном склоне, также попадают в окрестности таких пересечений. Полученные результаты указывают на возможность возникновения землетрясений $M \geq 6,0$ в других областях Горного Крыма и прилегающей акватории Черного моря, где ранее такие события не наблюдались, в частности, в районе Алушты.

Для двух пороговых значений M_0 (4,5; 5,0) с помощью модифицированной версии оригинальной алгоритмической системы FCAZm [1] проведено распознавание мест возможного возникновения эпицентров землетрясений в объединенном регионе, включающем Крым и западную часть Северного Кавказа. Выбор такого региона обусловлен его тектоническим строением и наличием активной зоны сочленения мегантиклинорий [3]. На рис. 21.2 показаны полученные в рассматриваемом регионе зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений для $M_0=4,5$.

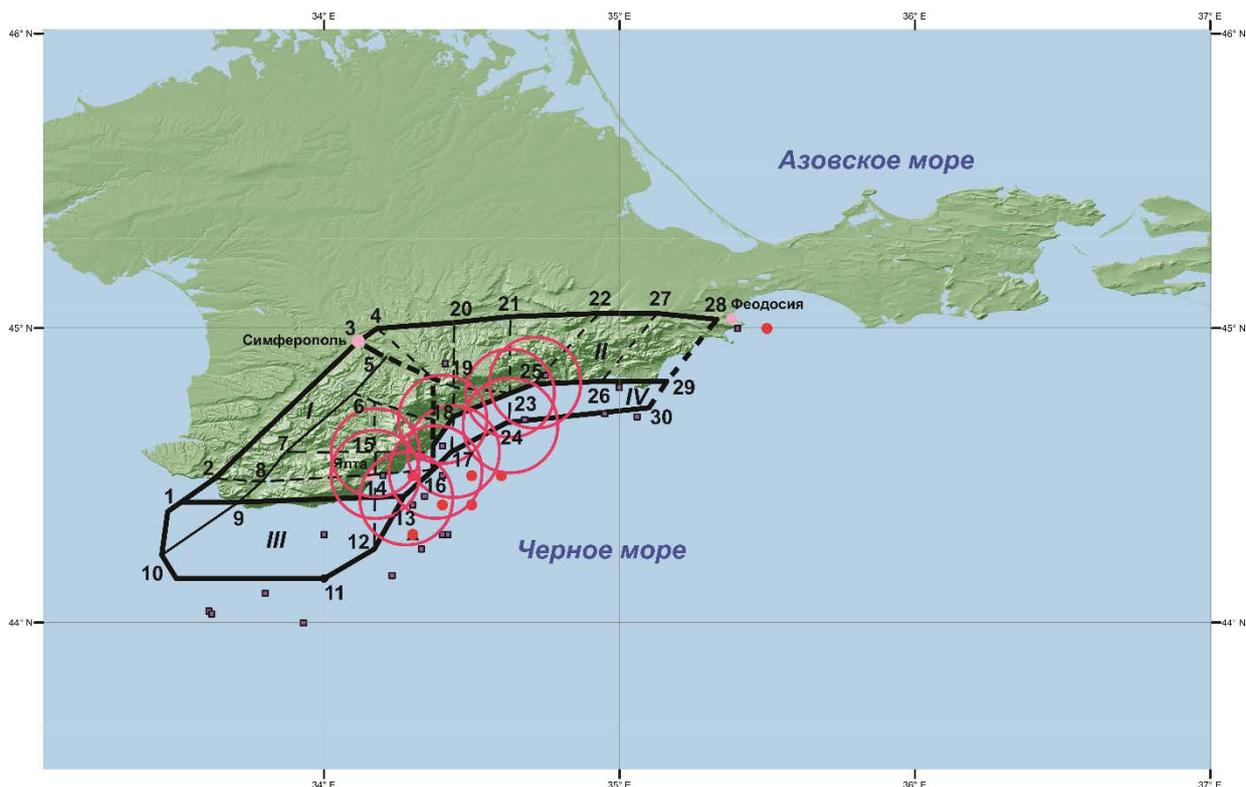


Рисунок 21.1 – Схема морфоструктурного районирования и места возможного возникновения сильных землетрясений Горного Крыма. Красными кружками показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$; черными квадратами – эпицентры землетрясений с $4,0 \leq M \leq 4,9$. Высокосейсмичные пересечения обведены красными окружностями

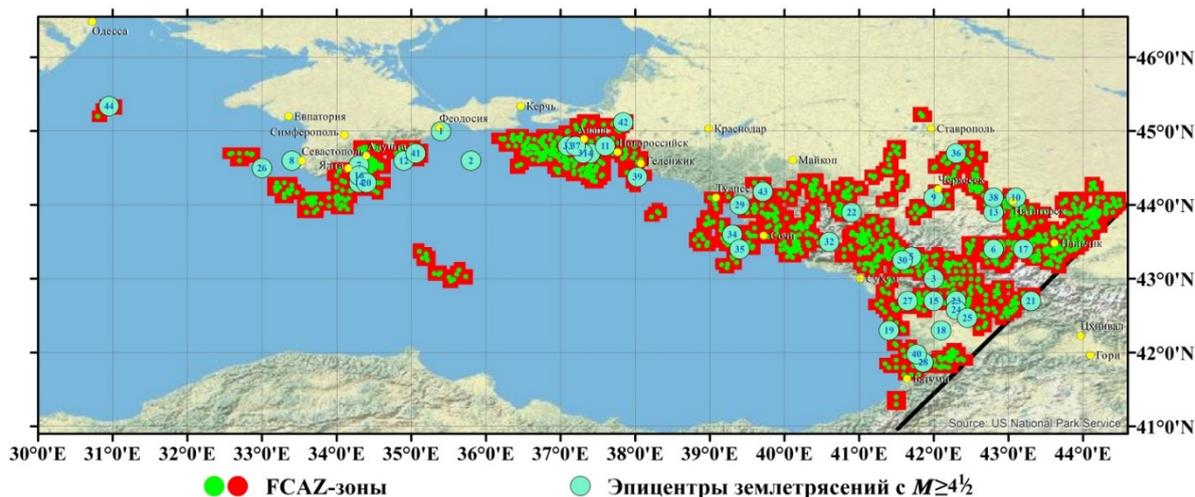


Рисунок 21.2 – Зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 4,5$; распознанные системой FCAZm, и эпицентры землетрясений с $M \geq 4,5$

На основе расчета коэффициентов общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ) для региона Большой Кавказ–Крым получены и картированы значения сейсмической опасности в терминах ожидаемого максимального ускорения на скальном основании и значения двух модельных рисков для населения. Риск для населения в ячейке x размера

0,25×0,25 градуса вычисляется по двум формулам: $R_{ii}(x) = H(x)P(x)p(x)$ и $R_{iv}(x) = H(x)P(x)p^3(x)$, 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 кубу 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 Большого Кавказа и Крыма показаны на рис. 21.3 и 21.4. Величина риска выражается 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, как и ожидалось, мега-города и их агломерации находятся в верхней части распределения для каждого из двух рассмотренных рисков. В таблице 21.1 суммированы оценки сейсмической опасности и рисков для 18 городов Большого Кавказа с населением от 100 тысяч жителей и 5 крупнейших городов Крыма. В случае городов в качестве ячейки рассматривается площадь соответствующего города.

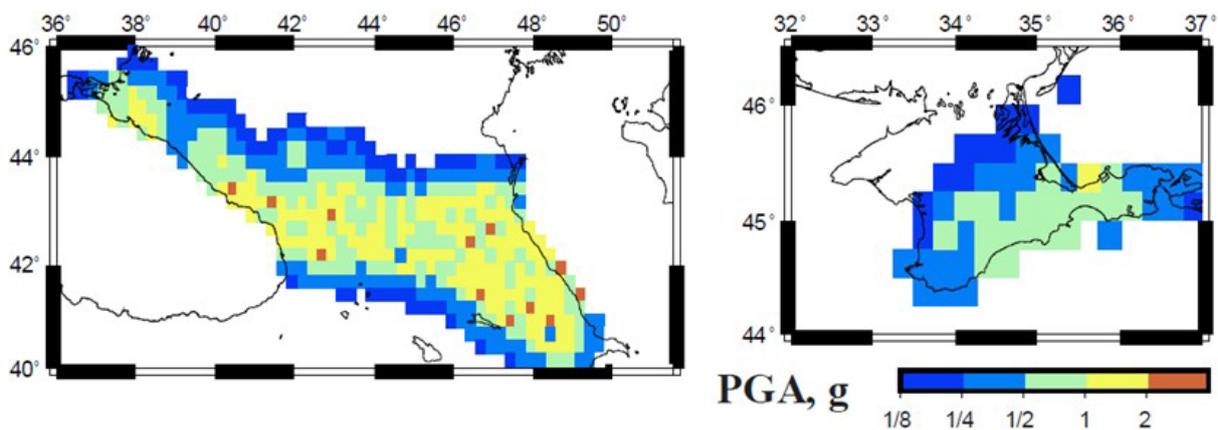


Рисунок 21.3 – Карты сейсмической опасности Большого Кавказа и Крыма в терминах максимального пикового ускорения на скальном грунте, ожидаемого с вероятностью 10% в период продолжительностью 50 лет, полученные на основе региональных оценок коэффициентов ОЗПЗ

Таблица 21.1 – Оценки сейсмической опасности и рисков для крупнейших городов Большого Кавказа и Крыма

Город	Население	$S, \text{ km}^2$	PGA, g	$R_{ii}, \text{ au}$	$R_{iv}, \text{ au}$
Краснодар	853,848	339	0,41	746	436
Махачкала	587,876	468	1,19	739	108
Ставрополь	429,571	172	0,08	73	42
Севастополь*	416,263	1080	0,43	58	1
Сочи	401,291	177	0,81	618	293
Симферополь	336,460	107	0,54	477	432
Владикавказ	307,478	291	1,34	368	38
Грозный	287,410	324	1,93	415	30
Новороссийск	266,977	81	1,35	1000	1000
Нальчик	239,040	67	0,81	585	687
Керчь	148,932	108	0,16	28	5
Пятигорск	145,448	97	0,43	78	16
Майкоп	144,055	59	0,54	161	90
Хасавьюрт	138,420	40	1,22	492	544
Кисловодск	129,993	72	0,70	138	42
Черкесск	123,128	70	0,62	113	32
Дербент	122,354	70	1,61	292	83
Невинномысск	117,891	100	0,32	37	5
Назрань	113,288	80	1,15	155	29
Каспийск	110,080	33	1,14	353	364
Евпатория	106,202	291	0,11	3	0,1
Ессентуки	105,881	50	0,33	63	26
Ялта	78,452	18	0,46	132	225

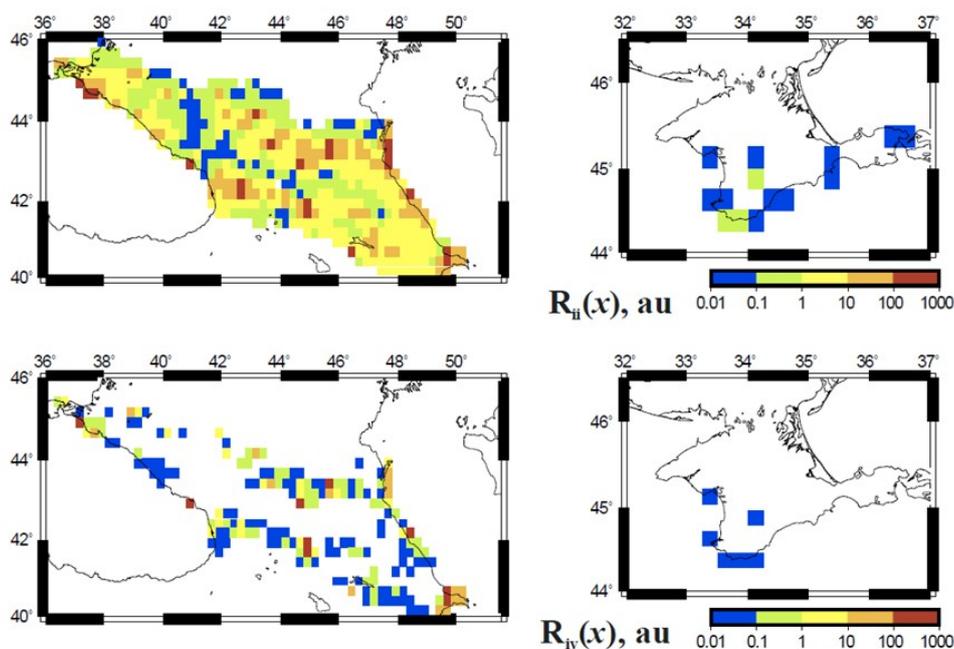


Рисунок 21.4 – Карты сейсмического риска для Большого Кавказа и Крыма в терминах $R_{ii}(x) = H(x)P(x)p(x)$ (верхние карты) и $R_{iv}(x) = H(x)P(x)p^3(x)$ (нижние карты), полученные на основе региональных оценок коэффициентов ОЗПЗ

Выполнена работа по подготовке калиброванного каталога землетрясений региона Алтай–Саяны–Прибайкалье, в которой использованы база данных WDC (World Data Center) за 1962–1991 гг., ежегодники «Землетрясения Северной Евразии» за 1997–2009 гг. и «Землетрясения России» за 2004–2013 гг., а также выборки по территории региона из оперативно обновляемых глобальных баз данных ЕГС РАН, USGS, ISC и EMSC. Каталоги имеют определения разных типов магнитуд. Исходя из анализа этих каталогов, становится очевидно, что их представительность менялась во времени. Так, например, в региональном каталоге землетрясений региона Алтай–Саяны за 1997–2009 гг. это происходило три раза: в 2001, 2005 и 2007 годах. Для построения карт оценок коэффициентов ОЗПЗ на территории региона Алтай–Саяны–Прибайкалье, так же как и в случае Большого Кавказа и Крыма, использовались наиболее полные региональные каталоги. В качестве примера на рис. 21.5 приведены карты коэффициентов A , B и C для региона Алтай–Саяны по данным за 2004–2013 гг. ОЗПЗ [2] позволяет учитывать обычно игнорируемый линейный размер области рассмотрения L_0 и представляет собой обобщение классического соотношения Гутенберга-Рихтера для годового числа землетрясений $N(M, L)$ в диапазоне магнитуд в окрестности M и размеров в окрестности L : $\lg(N(M, L)) = A + B(5 - M) + C \lg(L)$, где коэффициенты A и B имеют тот же физический смысл, что и в соотношении Гутенберга-Рихтера, а коэффициент C характеризует локально дробную размерность носителя эпицентров землетрясений. Коэффициент A нормирован к одному году и характеризует ожидаемое число землетрясений магнитуды 5,0 в сейсмоактивной области с линейным размером в единицу длины из региона $L_0 \times L_0$. Наличие двух оригинальных компиляций в ежегодниках «Землетрясения Северной Евразии» и «Землетрясения России», помимо сопоставления наличия и параметров

конкретных землетрясений, позволяют анализировать изменчивость таких карт для поиска признаков изменяющейся во времени и пространстве опасности наиболее сильных землетрясений. Этим вопросам предполагается уделить особое внимание в дальнейшей работе по проблеме оценки сейсмической опасности и рисков от землетрясений и сопутствующих им явлений.

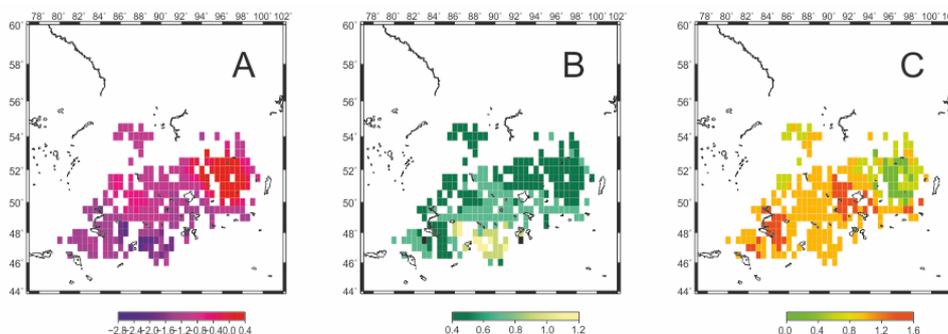


Рисунок 21.5 – Оценка коэффициентов А, В и С общего закона подобия для землетрясений на территорию региона Алтай–Саяны–Прибайкалье

На основе схемы морфоструктурного районирования Кавказа построена блоковая структура, отражающая реальную геометрию разломов и блоковое строение региона. Выполнено несколько десятков численных экспериментов с целью моделирования динамики блоковой структуры и возникающей при этом сейсмичности. В основе моделирования лежат следующие главные принципы [7, 4]: 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 был выбран тот, который в наибольшей степени отражает реальную сейсмичность Кавказа. Из сравнения расположения эпицентров искусственных землетрясений с $M \geq 6$, полученных в этом варианте, и эпицентров землетрясений Кавказа с $M \geq 6$ из каталога Национального центра информации о землетрясениях США (NEIC) по состоянию на 1 августа 2012 г. следует, что распределение эпицентров искусственных землетрясений во многом воспроизводит реальную сейсмичность Кавказа. На рис. 21.6 представлены кумулятивные графики повторяемости, построенные для каталога искусственных землетрясений и каталога реальных землетрясений Кавказа. Графики повторяемости имеют практически тот же самый наклон. Из сравнения этих графиков повторяемости, предполагая, что интенсивности потоков искусственных и реальных землетрясений близки, можно дать оценку периода времени, которому соответствует искусственный каталог. С учетом того, что каталог землетрясений Кавказа покрывает интервал, составляющий примерно 100 лет, искусственный каталог соответствует примерно 8 000 лет. Сравнение положений эпицентров сильных искусственных

землетрясений с результатами распознавания высокосейсмичных областей Кавказа [5, 6] показывает наличие таких эпицентров в некоторых высокосейсмичных областях, где по данным наблюдений сильных землетрясений до сих пор не происходило.

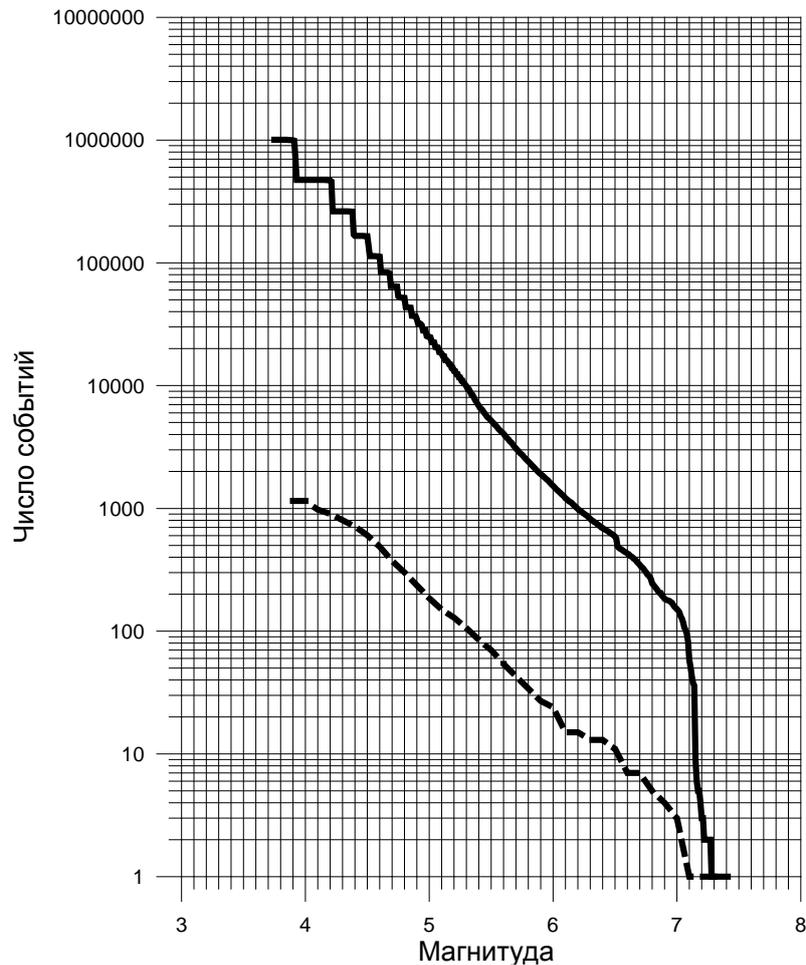


Рисунок 21.6 – Кумулятивные графики повторяемости, построенные для каталога искусственных землетрясений (сплошная линия) и реальной сейсмичности Кавказа (пунктирная линия)

С целью разработки на основе дискретного математического анализа новых алгоритмов искусственного интеллекта, применимых для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, сформулирована и решена следующая задача: в исходном конечном множестве альтернатив на основе совокупности скалярных признаков построить подмножество, близкое к заданному. Для этого создан алгоритм «Барьер», в котором по каждому признаку строится мера различия между произвольными альтернативами. Идея построения состоит в выявлении и количественном оценивании барьера, мешающего близости альтернатив в данном признаке. Меры барьера играют роль метрик на исходном множестве, принимают значения в единичном отрезке и потому допускают соединения операциями нечеткой логики. Эти обстоятельства позволяют придать точный смысл понятиям близости к заданному подмножеству на основе совокупности признаков. В результате был создан новый алгоритм распознавания образов, который был реализован в виде программы для ЭВМ. Алгоритм применен для

решения задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе.

На основе ГИС технологий создана База данных по результатам оценок сейсмической опасности Кавказа и Крыма. База данных включает следующую информацию:

1. географическая основа региона;
2. города и населенные пункты;
3. калиброванный каталог землетрясений региона (в каталоге для каждого события представлена только одна магнитуда, полученная из имеющихся данных);
4. результаты морфоструктурного районирования;
5. результаты распознавания мест сильных землетрясений;
6. результаты определения высокосейсмичных зон с помощью системы FCAZm;
7. значения коэффициентов ОЗПЗ;
8. результаты моделирования динамики блоковой структуры и сейсмичности: схема блоковой структуры и каталог искусственных землетрясений.

В состав базы данных входит программное обеспечение, позволяющее вычислять максимальную магнитуду и пиковое ускорение на скальном грунте, ожидаемые с вероятностью p в период продолжительностью N лет, на основе значений коэффициентов ОЗПЗ. База данных позволяет для заданной области или населенного пункта формировать пользовательские запросы на получение следующих видов информации:

1. эпицентры землетрясений с магнитудами из заданного диапазона;
2. морфоструктурные линеаменты, попадающие в область с указанием их рангов;
3. распознанные места сильных землетрясений (точки – пересечения или круги вокруг пересечений);
4. высокосейсмичные зоны, определенные с помощью системы FCAZm;
5. максимальная магнитуда землетрясений, ожидаемых в области с вероятностью p в течение N лет (результат выдается либо в виде одного числа для всей области, либо в виде карты области со значениями в узлах регулярной сетки);
6. максимальное пиковое ускорение на скальном грунте от землетрясений, ожидаемое в области с вероятностью p в период продолжительностью N лет (результат выдается либо в виде одного числа для всей области, либо в виде карты области со значениями в узлах регулярной сетки);
7. разломы блоковой структуры, принадлежащие области;
8. эпицентры искусственных землетрясений с магнитудами из заданного диапазона.

Предусмотрена возможность визуализации пространственных данных, содержащихся в Базе, с использованием сферического компьютерного экрана.

Выполнены исследования по разработке на основе методов системного анализа подходов к оценке сейсмической опасности путем интегрирования результатов, получаемых различными методами (распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений, определение высокосейсмичных зон, с помощью системы FCAZm, оценка сейсмической опасности на основе ОЗПЗ и т.п.). Сформулированные подходы реализованы в виде программ для ЭВМ.

Составлена предварительная схема морфоструктурного районирования (МСР) территории региона Алтай–Саяны–Прибайкалье с целью ее использования в качестве основы для распознавания в регионе мест возможного возникновения сильных землетрясений, определения сейсмоконтролирующих узлов для их последующей классификации на высоко- и низкосейсмичные с помощью методов распознавания образов. Исходными данными для составления схемы МСР послужили топографические и геологические карты в масштабах 1:500 000 – 1:1 000 000, а также космические снимки и литературные данные. Схема МСР (рис. 21.7) отображает 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 идентифицированы пересечения морфоструктурных линеаментов (морфоструктурные узлы), и с цифровых карт формата ГИС измерены значения их геолого-геофизических характеристик, включая данные по литосферным магнитным аномалиям.

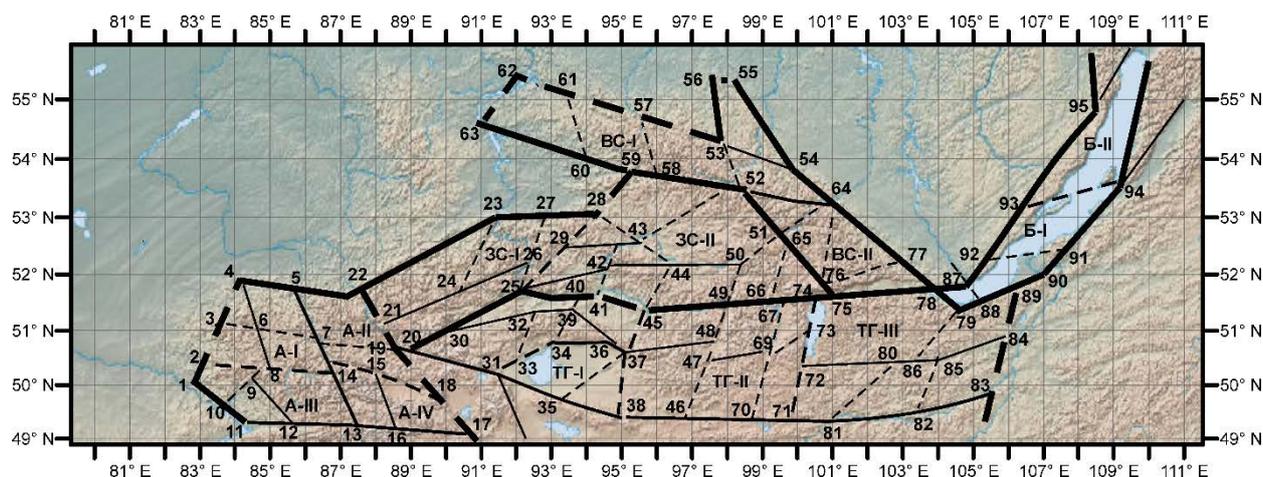


Рисунок 21.7 – Предварительная схема морфоструктурного районирования региона Алтай–Саяны–Прибайкалье. Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные. А – Алтай, Б – Байкал, ЗС – Западный Саян, ВС – Восточный Саян, ТГ – Тувинские горы. Римскими цифрами обозначены номера мегаблоков, арабскими – номера пересечений линеаментов

В рамках Проекта совместно с механико-математическим факультетом МГУ им. М. В. Ломоносова проведена (12–15 июля 2016 г.) Школа для молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности». Проведение школы было поддержано Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) при Международном совете по науке (ICSU). В школе приняли участие 32 слушателя, из которых 29 – студенты и молодые ученые (в возрасте до 35 лет). Слушатели представляли 16 научных и образовательных учреждений. Одиннадцать российских и семь иностранных ученых прочитали для слушателей Школы 27 лекций.

Список использованных источников

1. **Гвишиани А.Д., Дзедобов Б.А., Агаян С.М.** Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23.
2. Кособоков В.Г., Некрасова А.К. Общий закон подобия для землетрясений: глобальная карта параметров // Анализ геодинамических и сейсмических процессов. М.: ГЕОС, 2004. С. 160–175 (Вычисл. сейсмология. Вып. 35).
3. Полухтович Б.М., Попадюк И.В., Самарский А.Д., Хныкин В.И. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности юго-западной части Индоло-Кубанского прогиба // Геология нефти и газа. 1981. № 1. С. 43–77.
4. **Соловьев А.А.** Моделирование динамики систем блоков и разломов и сейсмичности // Труды Института математики и механики УрО РАН. Том 17, № 2. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2011. С. 174–190.
5. **Соловьев А.А.,** Новикова О.В., Горшков А.И., Пиотровская Е.П. Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // ДАН. 2013. Т. 450, № 5. С. 599–601.
6. **Соловьев Ал.А.,** Горшков А.И., **Соловьев Ан.А.** Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21–27.
7. Ismail-Zadeh A., Mouël J.-L., **Soloviev A.,** Tapponnier P., Vorobieva I. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in the Tibet-Himalayan region // EPSL. 2007. Vol. 258, Issue 3–4. P. 465–485.

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

Проект РФФ №16-17-00121

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

Решение поставленных в проекте задач по снижению риска возникновения и уменьшению последствий катастроф природного и техногенного происхождения не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики для расчета индуцированных в технологических системах токов, а требует и выяснения физической природы некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. В частности, было необходимо установить наличие связи между границами аврорального овала и наземными ультра-низкочастотными (УНЧ) магнитными вариациями; выявить соотношение между крупномасштабной квазистационарной ионосферной токовой системой и наложенными на нее локализованными резко-нестационарными токовыми структурами; установить физическую связь между магнитными УНЧ флуктуациями, авроральным овалом и вариациями фазы сигналов спутниковой навигационной системы GPS, и др.

Усовершенствован «волновой УНЧ индекс», аналогичный часовым геомагнитным индексам, для характеристики уровня турбулентности в системе солнечный ветер–магнитосфера–ионосфера [3]. Физической основой этого индекса является тот факт, что процессы переноса энергии в пограничных областях магнитосферы имеют турбулентный характер, который отражается в наземных и спутниковых наблюдениях в УНЧ диапазоне (2–10 мГц) – частотном диапазоне естественных магнитосферных МГД волноводов и резонаторов. Для расчета глобального наземного индекса использованы данные мировой сети магнитометров. 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 1991–2016, но эта база данных продолжает уточняться и расширяться. Индекс может быть использован в различных областях космической геофизики – физика суббури, ускорение релятивистских электронов, взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой, и т.д. В частности, УНЧ индекс включен в статистическую модель для предсказания потоков релятивистских электронов в районе геостационарной орбиты. База данных и детальное описание УНЧ индекса находятся в свободном доступе через специально разработанный сайт <http://ulf.gcras.ru/>. База данных содержит ежемесячные ASCII файлы со значениями УНЧ индекса и основных параметров космической погоды, магнитограммы использованных станций и графики индекса.

Пространственное распределение волновой активности диапазона Pc5 (периоды от минуты до десятка минут), наблюдаемой на мировой сети магнитометров, во время магнитных бурь сопоставлялось с положением границ аврорального овала [2]. Полярная и экваториальная границы аврорального овала определялись по данным УФ наблюдений на спутнике IMAGE или по модели OVATION, основанной на данных спутников DMSP. В

начальную фазу бури эпицентр спектральной мощности широкополосных Pc5 колебаний отображается внутрь аврорального овала (рис. 22.1). Во время восстановительной фазы максимум спектральной мощности узкополосных Pc5 волн находится внутри аврорального овала или вблизи его экваториальной границы. При этом квази-монохроматические Pc5 волны демонстрируют типичные резонансные особенности в широтном распределении амплитуды и фазы. Таким образом, положение аврорального овала является предпочтительной широтой для возбуждения магнитосферного альвеновского резонатора. Этот эффект не учитывается современными теориями УНЧ волн, но он важен для развития более адекватных моделей.

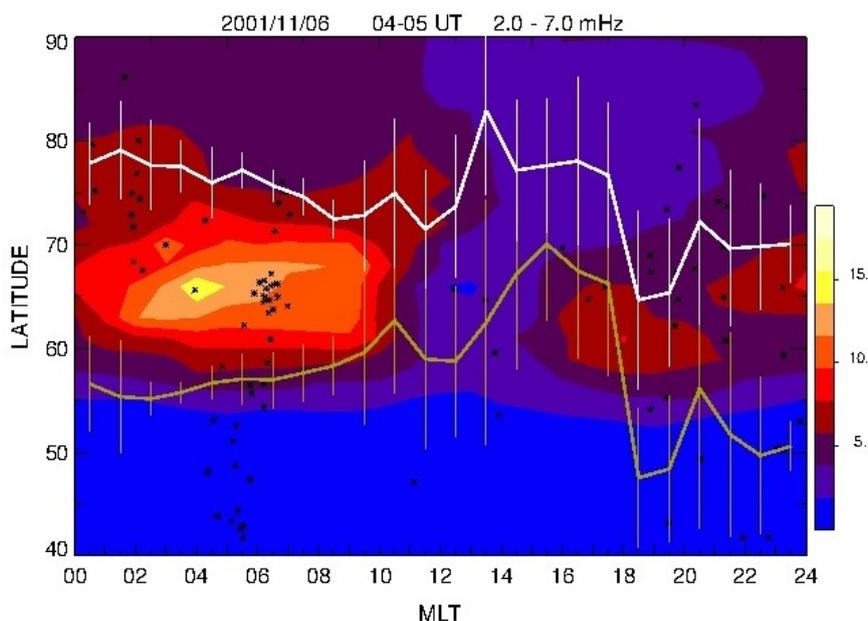


Рисунок 22.1 – Глобальное пространственное распределение волновой активности диапазона Pc5 во время магнитной бури 6 ноября 2011 г. и положение границ аврорального овала по данным УФ наблюдений на спутнике IMAGE из базы данных Британской антарктической службы

Для основной магнитосферной структуры на высоких широтах – аврорального овала – характерно наличие резких градиентов и высокого уровня турбулентности плазмы, что значительно снижает устойчивость и провоцирует сбои в системах радиосвязи и глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [1]. Резкая интенсификация аврорального овала происходит при суббурях и тесно связана с активизацией ионосферного электроджета. При экстремальных проявлениях солнечной активности доминирующим драйвером западного электроджета являются высокоскоростные потоки солнечного ветра [9]. Однако задача определения динамики границ овала в ходе развития магнитных бурь по данным наземных магнитных станций остается нерешенной, несмотря на отдельные обнадеживающие результаты. 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. Однако, измерения на низкоорбитальных аппаратах над заданным регионом могут проводиться только с интервалом ~ 100 мин. В то же время наземные наблюдения показывают, что магнитные шумы и волны диапазона Pc5 преимущественно локализованы внутри аврорального овала [2]. Этот экспериментальный факт до сих пор не получил надежной теоретической интерпретации. В качестве одного из возможных механизмов в [3] теоретически рассмотрена возможность генерации альвеновских колебаний силовых линий флуктуациями магнитосферного продольного тока, связывающего авроральный ионосферный электроджет и магнитосферную токовую систему. Пространственная амплитудно-фазовая структура возбуждаемых этим механизмом альвеновских колебаний хорошо согласуется с наблюдаемой резонансной структурой Pc5 пульсаций. На основании предложенной модели предложен дополнительный простой способ мониторинга аврорального овала по наземным геомагнитным данным по максимуму в широтном распределении мощности Pc5 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.

Рассмотрены возмущения сигналов навигационной спутниковой системы GPS при начале суббури 5 апреля 2010 г. [1]. Для анализа ионосферных возмущений использованы данные 69 GPS станций системы IGS в регионе Аляска (Канада). Одновременно проанализированы данные сетей магнитометров CARISMA, GIMA, CANMOS, INTERMAGNET, дополненные данными сканирующих фотометров и риометров сети NORSTAR. Во время взрывной фазы суббури наиболее интенсивные магнитные возмущения (до ~ 2000 нТ) наблюдались в Аляске и Северной Канаде. 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 одновременным увеличением ПЭС, достигающего до нескольких TECu. Сопоставление 2D карт пространственного распределения спектральной мощности магнитных флуктуаций в диапазоне Pc5 и ионосферных сцинтилляций 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 систем можно использовать для изучения пространственно-временной эволюции ионосферной проекции суббури. Сбои GPS сигналов бывают двух типов: «инструментальные», при которых происходит полная потеря сигнала; и скачки фазы сигнала, соответствующие резким физически нереальным скачкам ПЭС (>1 TECu/min). Преимущественно скачки фазы приходится на высокие широты, при этом 70% из них происходят, когда радиотрасса проходит через авроральный овал (рис. 22.2).

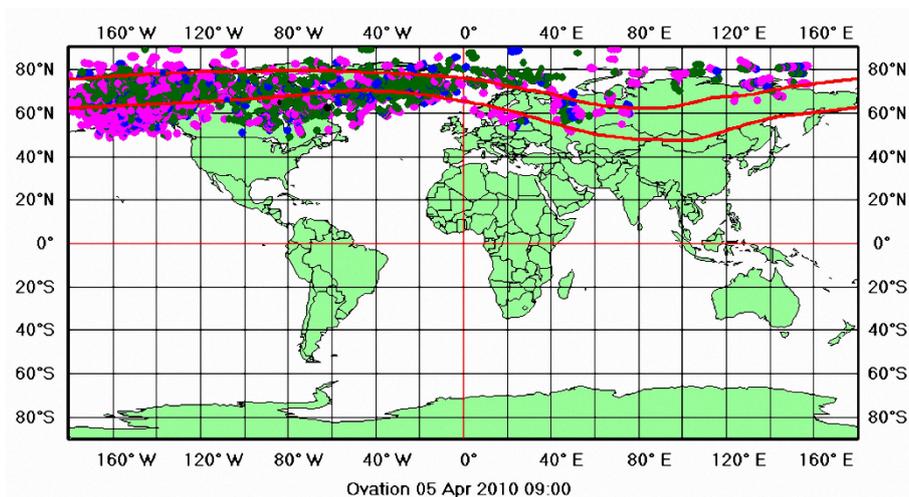


Рисунок 22.2 – Положение подионосферных точек, соответствующих нефизичным скачкам фазы GPS сигнала, в период 08–11 UT 5 апреля 2010 г. и границ аврорального овала (красные линии)

Резкие изменения геомагнитного поля могут приводить к сбоям в работе энергосистем, вызванным геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). Тем не менее, в отечественной нормативной документации влияние ГИТ на электроэнергетические системы и на надежность работы электрооборудования до сих пор не учитывается, хотя задача учета (а в перспективе – прогноза) потенциально опасных для электрических сетей геомагнитных возмущений является актуальной именно для России из-за большой протяженности электрических сетей на авроральных и субавроральных широтах. Магнитная буря 17 марта 2015 г. (буря «Святого Патрика») имела необычайно длительную главную фазу (~17 часов), во время которой происходило много суббуревых активизаций. Используя мировую сеть магнитометров в Северном полушарии [10], проанализировали совместно пространственную локализацию и эволюцию во времени интенсивности аврорального электроджета, определяемой по возмущениям С-Ю компоненты геомагнитного поля, и вариабельность геомагнитного поля, определяемую по преобразованию Гильберта от производной поля dB/dt . Пространственные карты в координатах широта–местное время показывают, что области с наибольшей вариабельностью геомагнитного поля не совпадают с «эпицентрами» суббури и интенсивности электроджета. Также не наблюдается однозначного соответствия во времени между интенсивностью суббури и уровнем вариабельности поля. Моменты наибольшей вариабельности поля совпали с периодами наибольших ГИТ, зарегистрированных в энергетических сетях Кольского полуострова. Таким образом, хотя в космической геофизике активно разрабатываются различные модели предсказания интенсивности магнитных бурь и вызванных ими геомагнитных возмущений по наблюдениям межпланетной среды, эти модели не могут быть непосредственно применены для предсказания интенсивности и положения ГИТ.

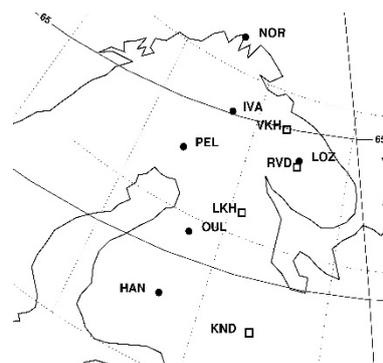
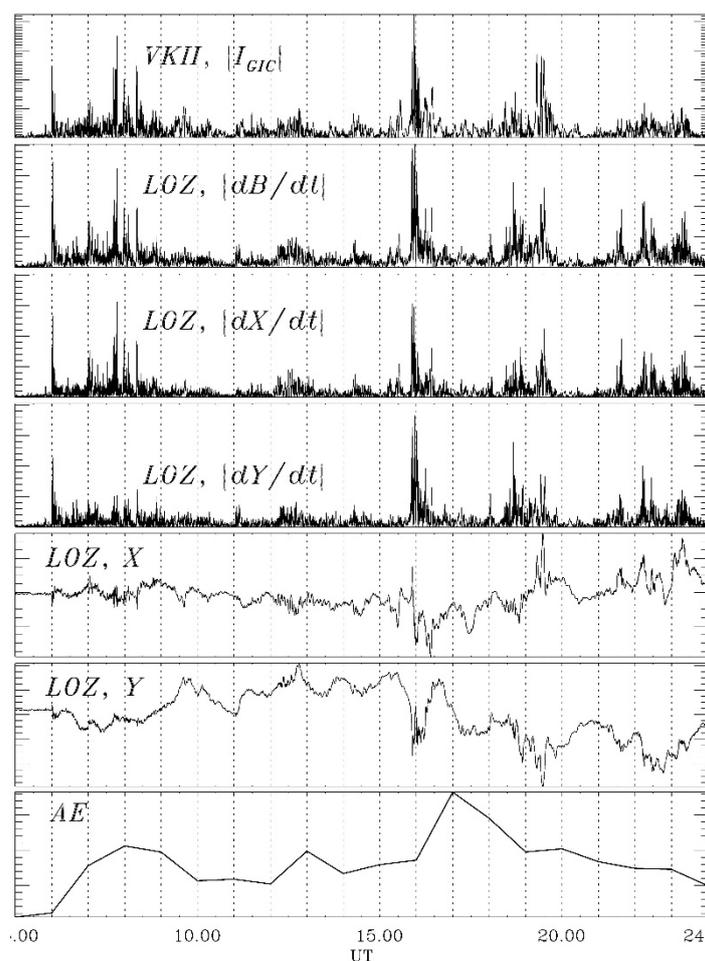


Рисунок 22.3 – Сопоставление амплитуд ГИТ, амплитуд полной производной $|dB/dt|$, амплитуд производных $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$, и магнитных возмущений ΔX и ΔY на близких станциях VKH и LOZ за период 05-10 UT, 17 марта 2013. На нижней панели показаны вариации AE индекса. Правая панель – карта станций ГИТ и магнитных обсерваторий

По данным более чем 20 лет наблюдений геомагнитного поля на станциях сети IMAGE изучены частоты появления и пространственные масштабы экстремальных значений модуля производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля $|dB/dt|$ [8]. Наряду с успешно прогнозируемыми возмущениями во время сильных магнитных бурь, экстремальные значения $|dB/dt|$ могут возникать во время умеренных бурь, и даже вне бури. В настоящее время прогноз таких возмущений невозможен, и необходим анализ апостериори с целью выявления факторов космической погоды, благоприятных для возникновения экстремальных значений ГИТ. Выполнен анализ геомагнитных возмущений на основе данных регистрации магнитного поля на сети европейских авроральных станций, которая по сути является первым этапом создания эмпирической модели геомагнитных возмущений, потенциально опасных для промышленных электрических сетей.

Данные системы регистрации геомагнитно-индуцированных токов Полярного геофизического института РАН в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии и данные магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик variability геомагнитного поля [7]. Векторная техника представления

вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля и его производной для магнитной бури 17 марта 2013 года показала гораздо большую вариабельность величины dB/dt по сравнению с ΔB . Количественная оценка вариабельности с помощью RB -параметра подтвердила, что вариации геомагнитного поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению [17]. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета полей мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ. Ионосферные токи и ГИТ флуктуируют не только в направлении восток–запад, но и в направлении север–юг, и представляют опасность для энергетических систем, вытянутых не только в восточно-западном, но в северно-южном направлениях (рис. 22.4).

Приобретен у НИЛ Квантовой магнитометрии УрФУ оверхаузеровский векторный магнитометр POS-4. Магнитометр предназначен для высокоточных измерений на арктических магнитных обсерваториях трех компонент и модуля геомагнитного поля и соответствует стандартам ИНТЕРМАГНЕТ.

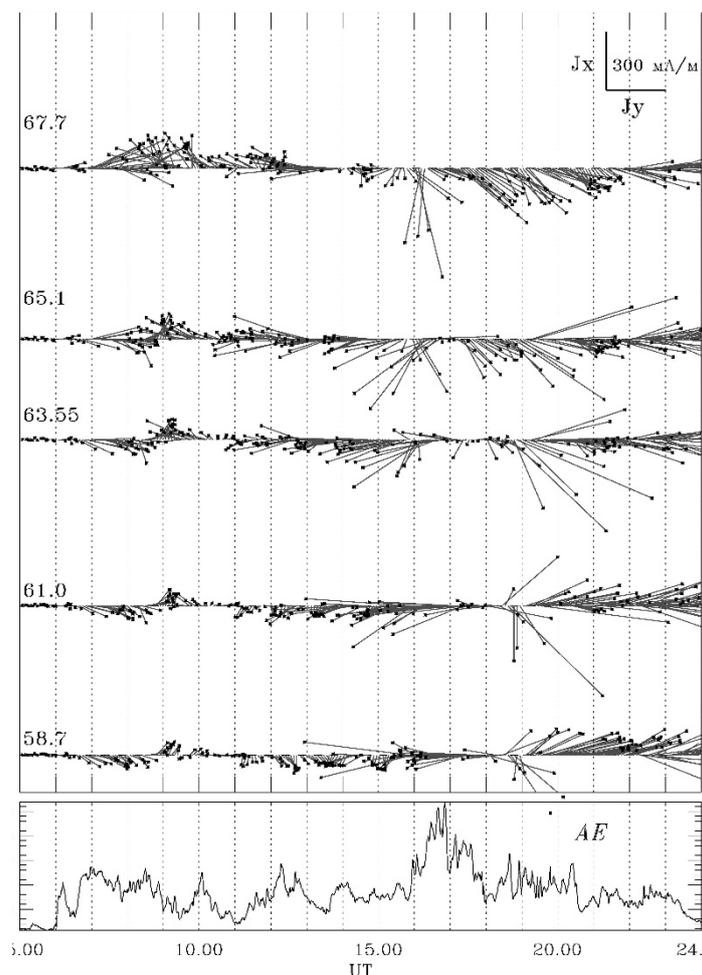


Рисунок 22.4 – Картина вариаций эквивалентных ионосферных токов J вдоль меридионального профиля за период с 05 UT до 24 UT (с шагом 5 мин.) 17 марта 2013 г. На нижней панели даны вариации аврорального индекса AE

Ионосферу можно рассматривать как основание области, занимаемой магнитосферой. Магнитосфера и ионосфера электродинамически соединены между собой через продольные токи, текущие вдоль высокопроводящих силовых линий геомагнитного поля из пограничных слоев магнитосферы в высокоширотную ионосферу, где эти токи возбуждают электрическое поле. Для математического моделирования распределения ионосферного электрического потенциала предложена модель, основанная на численном решении двумерного уравнения непрерывности ионосферно-магнитосферной токовой цепи [5]. Распределение потенциала описывается краевой задачей для эллиптической системы дифференциальных уравнений в частных производных с разделением сферической оболочки, аппроксимирующей ионосферу, на три подобласти, на границе которых ставятся краевые условия нелокального характера. Выполнение граничных условий, отражающих неразрывность общей токовой цепи и выравнивание потенциала на границах полярных шапок, приводит к взаимозависимости распределения потенциала внутри северной и южной шапок и влиянию обеих шапок на распределение потенциала в среднеширотной области. Модельные расчеты показывают возможность эффективного проникновения электрического поля от высокоширотного источника в средние широты.

Основные научные результаты

Получены важные результаты о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. В частности, установлено наличие связи между границами аврорального овала и наземными ультра-низкочастотными (УНЧ) магнитными вариациями; выявлено соотношение между крупномасштабной квазистационарной ионосферной токовой системой и наложенными на нее локализованными резко-нестационарными токовыми структурами; установлено соотношение (связь) между магнитными УНЧ флуктуациями, авроральным овалом, и вариациями фазы сигналов спутниковой навигационной системы GPS, и др.

Участниками проекта значительно усовершенствован «волновой УНЧ индекс» для характеристики среднечасового уровня турбулентности в диапазоне 2–7 мГц в системе солнечный ветер–магнитосфера–ионосфера. Для расчета глобального наземного индекса создана база скорректированных данных, включающая данные за 25 лет от всех существующих в мире магнитометров, ведущих регулярные наблюдения. При создании однородной базы геомагнитных данных применены математические методы системного анализа, построенные на базе дискретного математического анализа, для распознавания техногенных помех и их корректировки. Аналогичный УНЧ индекс, характеризующий уровень низкочастотной турбулентности и волновой активности на геостационарной орбите и в солнечном ветре, рассчитан по данным спутников GOES, WIND, ACE. Индекс уже используется в различных областях космической геофизики, в частности, он включен в статистическую модель для предсказания потоков релятивистских электронов в районе геостационарной орбиты. База данных, включающая месячные ASCII-файлы со значениями УНЧ индекса и основных параметров космической погоды, магнитограммы использованных станций и графики индекса, находится в свободном доступе через специально разработанный сайт <http://ulf.gcras.ru/>.

Для контроля устойчивости глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС важно иметь надежные методы мониторинга положения аврорального овала. Проведенный анализ мировой сети наземных геомагнитных наблюдений показал, что магнитные шумы и волны диапазона Pc5 (периоды от минуты до десятка минут) преимущественно локализованы внутри аврорального овала, полярная и экваториальная границы которого определялись по данным УФ наблюдений на спутнике IMAGE. В начальную фазу бури «эпицентр» спектральной мощности широкополосных Pc5 колебаний отображается внутри аврорального овала. Во время восстановительной фазы максимум спектральной мощности узкополосных Pc5 волн находится внутри аврорального овала или вблизи его экваториальной границы. В качестве одного из возможных механизмов теоретически рассмотрена возможность генерации альвеновских колебаний силовых линий флуктуациями магнитосферного продольного тока, связывающего авроральный ионосферный электроджет и магнитосферную токовую систему. На основании предложенной модели предложен дополнительный способ мониторинга аврорального овала по максимуму в широтном распределении мощности Pc5 колебаний.

Рассмотрены возмущения сигналов навигационной спутниковой системы GPS в высоких широтах при начале суббури. Обнаружено, что начало суббури вызывает резкий рост интенсивности вариаций фазы навигационных сигналов, характеризуемой производной полного электронного содержания (ПЭС), $dTEC$. Сопоставление 2D карт пространственного распределения спектральной мощности магнитных флуктуаций в диапазоне Pc5 и ионосферных вариаций $dTEC$ во время развития суббури показывает, что как магнитные, так и ионосферные флуктуации преимущественно концентрируются внутри границ аврорального овала. Таким образом, сигналы спутниковых навигационных систем можно использовать для изучения пространственно-временной эволюции суббури.

Резкие изменения геомагнитного поля могут приводить к сбоям в работе энергосистем, вызванным геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). С использованием мировой сети магнитометров проанализированы пространственная локализация и эволюция во времени интенсивности аврорального электроджета и вариабельности геомагнитного поля, определяемой по преобразованию Гильберта от производной поля dB/dt , во время магнитной бури. Пространственные карты в координатах широта–местное время показывают, что области с наибольшей вариабельностью геомагнитного поля не совпадают с «эпицентрами» суббури. Также не наблюдается однозначного соответствия во времени между интенсивностью суббури и уровнем вариабельности поля. Моменты наибольшей вариабельности поля совпали с периодами наибольших ГИТ, зарегистрированных в энергетических сетях Кольского полуострова.

Данные системы регистрации ГИТ в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии и магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик вариабельности геомагнитного поля. Векторная техника представления вариаций горизонтальной компоненты поля и его производной показала гораздо большую вариабельность величины dB/dt по сравнению с ΔB во время магнитной бури. Количественная оценка вариабельности подтвердила, что вариации происходят в

сравнимой степени как по величине, так и по направлению. Таким образом, ионосферные токи и вызываемые ими ГИТ флуктуируют не только в направлении восток–запад, но и в направлении север–юг, и представляют опасность и для энергетических систем, вытянутых в северно-южном направлении. Эти результаты не могут быть объяснены обычной моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета полей мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ.

По данным за более чем 20 лет наблюдений геомагнитного поля на станциях сети IMAGE изучены частоты появления и пространственные масштабы экстремальных значений модуля производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля $|dB/dt|$. Показано, что наряду с возмущениями во время сильных магнитных бурь, экстремальные значения $|dB/dt|$ могут возникать даже вне бури. Проведенный анализ является первым этапом создания эмпирической модели экстремальных геомагнитных возмущений, потенциально опасных для промышленных электрических сетей.

23. Международная деятельность ГЦ РАН

Среди основных направлений международной деятельности ГЦ РАН в 2016 г. стоит отметить развитие сотрудничества с Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA). Продолжается работа в рамках научной программы IIASA «Перспективный системный анализ», возглавляемая Е. А. Ровенской (также научный сотрудник факультета ВМК МГУ). IIASA также имеет большой опыт в области анализа и прогнозирования демографических трендов по странам, включая:

- прогнозы человеческого капитала (прогнозы населения по образовательному статусу и уровню здоровья);
- переопределение человеческого возраста и границ старости на основании меняющихся характеристик населения;
- пересмотр прогнозов старения;
- человеческий капитал и экономический рост.

В рамках этой деятельности расчеты делаются и для России. Это направление исследования крайне актуально в настоящий момент, так как может предоставить полезную практическую информацию для лиц, принимающих решения в области планирования пенсионной реформы, миграционной политики, политики по поддержке экономического роста и т.д. и будет в будущем развиваться совместными усилиями IIASA и ГЦ РАН.

Необходимо отметить, что IIASA принял участие в организации и проведении международной конференции «Системный анализ данных для изучения природных опасностей», которая прошла 18–21 июля 2016 г. в пос. Роза Хутор Адлерского района г. Сочи Краснодарского края.

Также ведется активное сотрудничество с Комитетом по данным для науки и технологий (CODATA). По результатам голосования на генеральной ассамблее CODATA, которая состоялась в г. Денвер (США) 10 сентября 2016 г., в члены исполнительного комитета на второй срок была переизбрана Рыбкина Алена Игоревна (заведующая сектором инновационных проектов Геофизического центра РАН). А. И. Рыбкина является самым молодым членом исполнительного комитета CODATA и единственным представителем из России. На настоящий момент исполнительный комитет CODATA насчитывает 8 членов – представителей России, США, Китая, ЮАР, Великобритании, Кении, Израиля, Японии, Австралии и Канады. Исполнительный комитет избирается каждые два года и является высшим руководящим органом под председательством президента CODATA. Очередные выборы состоятся в 2018 г. на 31-ой Генеральной Ассамблее CODATA.

При поддержке и участии CODATA была организована и проведена школа молодых ученых «Системный анализ и оценка сейсмической опасности» на базе Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова 12–15 июля 2016.

Геофизический центр РАН также активно участвует в работе рабочей группы CODATA «Интероперабельность данных Земли и космоса» (руководитель член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. Соловьев Анатолий Александрович), которая была успешно переизбрана на Генеральной ассамблее в 2016 г. В частности, в качестве одного из выдающихся результатов данной группы в 2016 г. были получены новейшие данные для реализации проекта создания электронного издания Атласа магнитного поля Земли (МПЗ). Данное издание представляет собой унифицированный набор физических, общегеографических, тематических, в том числе исторических карт МПЗ, а также справочных (текстовых и табличных) материалов, позволяющих тщательно и разносторонне изучать проблему МПЗ с 1500 г. по н.в. Атлас предназначен не только для ученых и специалистов в области изучения МПЗ, но и для широкого круга потребителей из смежных научных и прикладных областей и читателей, интересующихся данной проблемой. Атлас магнитного поля Земли – это фундаментальный картографический продукт с наиболее полными и научно обоснованными характеристиками картографируемого явления – геомагнетизма. Атлас содержит результаты как исторического, так и современного изучения МПЗ.

В 2016 г. было подписано соглашение о сотрудничестве ГЦ РАН с Институтом геофизики Вьетнамской академии наук и технологий в области сейсмологических и геомагнитных исследований, включающих совершенствование методов сейсморайонирования, развитие сети наземных измерений магнитного поля Земли и комплексный анализ данных геомагнитных наблюдений.

В рамках международного сотрудничества Парижского института физики Земли (IPGP, Франция) и ИФЗ/ГЦ РАН зам. директора по науке чл.-корр. РАН А. А. Соловьев и в.н.с. к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов посетили IPGP в качестве приглашенных ученых в мае–июне 2016 г.

Список научных публикаций и свидетельств о регистрации результатов интеллектуальной деятельности за 2016 г.

Монографии

1. Басманов А.В., Галаганов О.Н., Демьянов Г.В., **Кафтан В.И.**, Гусева Т.В. Изучение геодинамических процессов // В кн. ГЛОНАСС и геодезия. М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. С. 150–172.
2. **Кафтан В.И.**, Вайнберг В.Я., Майоров А.Н. Использование РСДБ // В кн. ГЛОНАСС и геодезия. М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. С. 134–149.
3. Golubkov G.V., Manzhelii M.I., Berlin A.A., **Lushnikov A.A.**, Eppelbaum L.V. The Problems of Passive Remote Sensing of Earth Surface in Atmosphere, ionosphere, safety / ed. I.V. Karpov. Kaliningrad, 2016. 549 p. ISBN 978-5-9971-0412-2
4. Абдулкаримова А.М., Абубакарова Э.А., Адиллов З.А., Айдамирова З.Г., **Дзедобоев Б.А.** и др. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Коллективная монография Том 5. Грозный: Грозненский рабочий, 2016. 698 с.

Статьи в журналах и сборниках

1. Агаян С.М., Алексанова О.В., Алешин И.М., Артюшков Е.В., Алексанов В.В., Астапенкова А.А., Барыкина Ю.В., Богоутдинов Ш.Р., Бондур В.Г., Бородин П.Б., Вавилин Е.В., Васильева О.Н., Витвицкая И.Е., Гвишиани А.Д., Гетманов В.Г., Груднев А.А., Дзедобоев Б.А., Добровольский М.Н., Жарких Ю.И., Забаринская Л.П., Ишков В.Н., **Кафтан В.И.**, Кедров Э.О., Книппер Н.И., Колесников И.Ю., Котиков А.Л., Красноперов Р.И., Крылова Т.А., Кудашин А.С., Лабунцова Л.М., Лебедев С.А., Лукьянова Р.Ю., Лушников А.А., Маневич А.И., Любовцева Ю.С., Морозов В.Н., Нечитайленко В.А., Никифоров О.В., Николов Б.П., Нисилевич М.В., Одинцова А.А., Павленко А.И., Пантелеев Д.В., Пилипенко В.А., Пятыгин В.А., Пешков А.Г., Родников А.Г., Рыбкина А.И., Самохина О.О., Сергеева Н.А., Сидоров Р.В., Соловьев Ал.А., Соловьев Ан.А., Соловьева Е.П., Султанов В.Р., Татаринов В.Н., Татаринова Т.А., Фирсова Е.Ю., Шестопалов И.П. Отчет о выполнении государственного задания на 2015 год. Soloviev, A. A., Tatarinova T.A., Eds. (2016), Report of Geophysical Center of RAS for 2015: Results of the State Task, Geoinf. Res. Papers, BS4003, DOI: 10.2205/2016BS029
2. **Agayan S., Bogoutdinov Sh., Soloviev A., Sidorov R.** The Study of Time Series Using the DMA Methods and Geophysical Applications // Data Science Journal. 2016. pp. 1–21, DOI: 10.5334/dsj-2016-014
3. **Алешин И.М.**, Холодков К.И., Гетманов В.Г., Корягин В.Н. Платформа интеграции веб-ориентированных грид-приложений // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 1. С. 84–95.
4. **Алешин И.М.**, Бургучев С.С., Передерин Ф.В., Холодков К.И. Универсальная портативная система сбора геофизических данных // Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95. № 4. С. 31–34.
5. **Aleshin I.M., Burguchev S.S., Kholodkov K.I., Perederin F.V., Soloviev A.A.** Software for realtime acquisition of geomagnetic data and station management // Russ. J. Earth Sci. 2016. Vol. 16. ES5004. DOI: 10.2205/2016ES000582
6. Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. DOI: 10.2205/SPG2012

7. **Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Агаян С.М.** Интеллектуальная система распознавания FCaZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. №4. С. 3–23. DOI:10.7868/S0002333716040013 (**Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Agayan S.M.** FCaZm intelligent recognition system for locating areas prone to strong earthquakes in the Andean and Caucasian mountain belts // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol. 52, Issue 4. P. 461–491). DOI: 10.1134/S1069351316040017
8. **Gvishiani A.D., Sidorov R.V., Lukianova R.Yu., Soloviev A.A.** Geomagnetic activity during St. Patrick's Day storm inferred from global and local indicators // *Russ. J. Earth Sci.* 2016. Vol. 16. ES6007. DOI: 10.2205/2016ES000593
9. **Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R.** Automated Hardware and Software System for Monitoring the Earth's Magnetic Environment // *Data Science Journal*. Vol. 15. P.18. DOI: 10.5334/dsj-2016-018
10. **Гвишиани А., Соловьев А.** Магнитное поле Земли онлайн // *Коммерсантъ Наука*. 2016. №2(18). С. 26-28.
11. **Гвишиани А.Д.** Реформа, которую не следует забывать (к 50-летию “Косыгинской реформы”: размышления участника. Предисловие к статье Котляра Б.А.) // *Цветные металлы*. 2016. № 4 (880). С. 82–87.
12. **Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д., Камаев Д.А., Корнилов А.С.** Алгоритмическое обнаружение аномальных временных участков в наблюдениях за уровнем океана // *Физика Земли*. 2016. №2. С. 114–126. DOI:10.7868/S0002333716020058 (**Getmanov V.G., Gvishiani A.D., Kamaev D.A., Kornilov A.C.** Algorithmic recognition of anomalous time intervals in sea-level observations // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol. 52, Issue 2. P. 259–270)
13. **Гетманов В.Г.** Методы вычисления аппроксимационных сплайновых функций для задач цифровой фильтрации // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2016. № 5. С. 47–57.
14. **Гетманов В.Г., Дабагян Р.А., Сидоров Р.В.** Исследование характеристик геомагнитных пульсаций методом локальных аппроксимаций // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56. №2. С. 209–216. DOI:10.7868/S001679401602005X (**Getmanov V. G., Dabagyan R.A., Sidorov R.V.** Studying geomagnetic pulsation characteristics with the local approximation method // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. Vol. 56, No. 2. P. 195–202. DOI: 10.1134/S0016793216020055).
15. **Getmanov V.G.** Evaluation of spline functions for digital filtering problems // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2016. Vol. 55, Issue 5. P. 725–734. DOI: 10.1134/S1064230716040079
16. **Ivanov O., Borog V.V., Kryanev A.V., Getmanov V.G., Sidorov R.V.** Comparison of abilities of two trend definition techniques for experimental data time series processing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016 (in print).
17. **Ишков В.Н.** Солнечные вспышечные суперсобытия: условия происхождения и энергетические пределы реализации // *Вестник ОНЗ РАН*. 2016. Том 8. NZ5001. DOI: 10.2205/2016NZ000126
18. **Ишков В.Н.** Солнце в декабре 2015 г. – январе 2016 г. // *Земля и Вселенная*. 2016. № 3. С. 21–24.
19. **Ишков В.Н.** Солнце в феврале 2015 г. – марте 2016 г. // *Земля и Вселенная*. 2016. № 4. С. 51
20. **Kaftan V., Komitov B., Lebedev S.** Solar-Terrestrial interaction: Case study of Caspian Sea level changes // *Bulgarian Astronomical Journal*. 2016. Vol. 25. P. 37–51.

21. **Kaftan V.**, Melnikov A. Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from Long Term GNSS Observation Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2016. Vol. 16. ES3001. DOI: 10.2005/2016ES000568
22. **Кафтан В.И.**, Мельников А.Ю. Анализ деформационных предвестников землетрясений на основе гнсс наблюдений // В сборнике: Четвертая тектонофизическая конференция в ифз ран тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием. 2016. С. 80–88.
23. Устинов А.В., **Кафтан В.И.** Суточные и полусуточные колебания в результатах локального мониторинга с использованием ГНСС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С. 3–13.
24. **Красноперов Р.И.**, **Сидоров Р.В.**, **Соловьев А.А.** ред. Инструкция по выполнению абсолютных измерений феррозондовым деклинометром/инклинометром // Исследования по геоинформатике. 2016. Т.4, №1. DOI: 10.2205/2016BS038
25. **Красноперов Р.И.**, **Соловьев А.А.**, **Николов Б.П.**, **Жарких Ю.И.**, **Груднев А.А.** 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
26. **Лебедев С.А.** Методика обработки данных спутниковой альтиметрии для акваторий Белого, Баренцева и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 6. С. 203–223.
27. Kozlovsky A., **Lukianova R.**, Shalimov S. Lester M. Mesospheric temperature estimation from meteor decay times during Geminids meteor shower // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. Vol. 121, Issue 2. P. 1669–1679. DOI: 10.1002/2015JA022222
28. **Lukianova R.Y.** Temperature, Wind, and Wave Perturbations in the Auroral Ionosphere during Sudden Stratospheric Warmings // Atmosphere, ionosphere, safety / ed. I.V. Karpov. Kaliningrad, 2016. P. 105–110.
29. **Lukianova R.** Unusual geomagnetic response to the solar wind dynamic pressure pulse during storm-time // Russ. J. Earth Sci. 2016. Vol. 16. ES6001. DOI: 10.2205/2016ES000583
30. **Lukianova R.** Thermal and dynamic perturbations in the winter polar upper atmosphere associated with a major sudden stratospheric warming // Russ. J. Earth Sci. 2016. Vol. 16. ES4003. DOI: 10.2205/2016ES000575
31. **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. Vol. 59, Issue 2. P. 557–570. DOI: 10.1016/j.asr.2016.10.010
32. Mursula K., Holappa L., and **R. Lukianova**. Seasonal solar wind speeds for the last 100 years: Unique coronal hole structures during the peak and demise of the Grand Modern Maximum // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 44, Issue 1, P. 30–36. DOI: 10.1002/2016GL071573
33. **Лукьянова Р.Ю.** Электрический потенциал в ионосфере Земли: численная модель модель // Математическое моделирование. 2017 (принято в печать).
34. **Lushnikov A.A.**, **Kagan A.I.** A linear model of population dynamics // International Journal of Modern Physics B. 2016. Vol. 30, Issue 15. Article number 1541008. DOI: 10.1142/SO217979215410088
35. Голубков Г.В., Манжелий М.И., Берлин А.А., **Лушников А.А.** Основы радиохимической физики атмосферы Земли // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 5–20. (Golubkov, G.V., Manzhelii, M.I., Berlin, A.A., **Lushnikov, A.A.** Fundamentals of Radiochemical Physics of the Earth Atmosphere // Russian Journal of Physical Chemistry. 2016. Vol. 10, Issue 1. P. 77–90.)
36. Ческидов В.В., **Маневич А.И.** Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости оползневых склонов в условиях транспортного строительства // Горные науки и технологии. 2016. №1. С. 51–59. DOI:10.17073/2500-0632-2016-1-51-57

37. Шпаков П.С., Урузбиева А.Г., **Маневич А.И.** Инженерно-геологический и геоэкологический мониторинг состояния сложных объектов горнодобывающего комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С.406–413.
38. Коликов К.С., Никитин С.Г., **Маневич А.И.** Аналитическая оценка прогноза метанообильности, рекомендуемого нормативными документами // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 8. С. 34–39.
39. Антошин В.В., **Маневич А.И.** Перспективные направления обработки данных геоэкологического мониторинга // Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2016. № 6–3 (86). С. 20–23.
40. **Морозов В.И.** Сохранить Александровскую колонну в Санкт-Петербурге // Недропользование XXI век. 2016. № 4 (61). С. 134–141.
41. **Морозов В.Н.,** Батугин А.С., **Колесников И.Ю., Татаринов В.Н., Каган А.И., Татаринова Т.А.** Прогнозирование геодинамической устойчивости геологической среды при подземной изоляции РАО // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 251–262.
42. **Морозов В.Н.** Как сохранить Александровскую колонну в Санкт-Петербурге // Науки о Земле. 2016. № 2. С. 52–59.
43. **Морозов В.Н., Маневич А.И.** Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентрального района землетрясения 26.01.2001 г., М=6.9 (Индия) // Геофизические исследования. 2016. Т. 17, № 4. С. 23–36.
44. **Нечитайленко В.А.** Технологии документирования научного контента. II. Электронная книга // Geoinf. Res. Papers. 2016. Vol. 4. BS1001. DOI: 10.2205/2016BS028
45. **Никифоров О.В., Рыбкина А.И., Соловьев А.А., Бобков А.Е.** Визуализация геомагнитных наблюдений спутников SWARM с использованием цифрового демонстрационного комплекса со сферическим дисплеем // Исследования по геоинформатике. 2016. Т. 4, №1. BS4016. DOI: 10.2205/2016BS040
46. Петрукович А.А., **Никифоров О.В.** Исследование солнечно-земных связей и околоземной плазмы с помощью малых космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 429–434.
47. **Pilipenko V.A., Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Engebretson M.J., Kozyreva O.V.** Generation of resonant Alfvén waves in the auroral oval // Annales Geophysicae. 2016. Vol. 34. P. 241–248. DOI: 10.5194/angeo-34-241-2016
48. **Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Engebretson M.J., Soloviev A.A.** ULF wave power index for space weather applications: A review // Russ. J. Earth. Sci. 2017. Vol. 17, N 2. ES1004. DOI: 10.2205/2017ES000597
49. Kozyreva O.V., **Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Engebretson M.J.** GPS-TEC response to the substorm onset, GPS Solutions, DOI: 10.1007/s10291-016-0581-6, 2016a.
50. Kozyreva O.V., **Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Klimushkin D.Yu., Mager P.N.** Correspondence between the ULF wave power distribution and auroral oval // Solar-Terrestrial Physics. 2016. Vol.2, №2. P. 46–65.
51. **Пилипенко В.А.,** Белаховский В.Б., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Билин В.А. Оценка вариаций геомагнитного поля, характеризующая возбуждение геомагнитно-индуцированных токов в линиях электропередач // Труды Кольского Научного Центра РАН. Серия “Телиогеофизика”. 2016. Т. 38 (4). С. 31–40.
52. Белаховский В.Б., **Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н.** Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2017 (принято в печать).
53. **Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Сергеева Н.А.** Глубинное строение Южно-Карской осадочной впадины // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35, № 1. С. 31–36. (**Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Sergeeva N.A.** Deep structure of the

South Kara sedimentary basin // Russian Journal of Pacific Geology. 2016. Vol. 10, № 1. P. 28–33.) DOI: 10.1134/S1819714016010073

54. **Родников А.Г., Забаринская Л.П., Сергеева Н.А.** Геодинамические модели глубинного строения Японской островной дуги // *Материалы XLVIII Тектонического совещания. Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Том 1.* М.: ГЕОС, 2016. С. 177–181.
55. **Rybkina A.I., Odintsova A.A., Gvishiani A.D., Samokhina O.O., Astapenkova A.A.** Development of geospatial database on hydrocarbon extraction methods in the 20th century for large and super large oil and gas deposits in Russia and other countries // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2016. Vol. 16. ES6002. DOI: 10.2205/2016ES000584
56. **Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Хохлов А.В.** Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2016. Т. 56, № 3. С. 365–377. (**Soloviev A.A., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I., Grudnev A.A., Khokhlov A.V.** Klimovskaya: A new geomagnetic observatory // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. Vol. 56, No. 3. P. 342–354). DOI: 10.1134/S0016793216030154
57. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В., **Соловьев А.А.** Современная геодинамика горнопромышленных регионов востока азиатской части России и ближнего зарубежья // *Электронное научное издание Альманах Пространство и Время.* 2016. Т. 12, № 2. С. 15.
58. **Soloviev A.,** Kopytenko Yu., Kotikov A., **Kudin D., Sidorov R.** 2015 definitive data from geomagnetic observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG): minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field. ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. DOI: 10.2205/SPG2015min-def
59. **Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S.** Estimation of Geomagnetic Activity Using Measure of Anomalousness // *Annals of Geophysics.* 2016. Vol. 59, Issue 6. Article number G0653. DOI: 10.4401/ag-7116
60. **Soloviev A., Dobrovolsky M.,** Kudin D., **Sidorov R.** Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Saint Petersburg (IAGA code: SPG). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. DOI: 10.2205/SPG2012min
61. **Soloviev A.A., Zharkikh J.I., Krasnoperov R.I., Nikolov B.P., Agayan S.M.** GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2016. Vol. 16. ES6004. DOI: 10.2205/2016ES000587
62. Sapunov V.A., Denisov A.Y., Saveliev D.V., **Soloviev A.A.,** Khomutov S.Y., Borodin P.B., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Shirokov A.N. New vector/scalar Overhauser DNP magnetometers POS-4 for magnetic observatories and directional oil drilling support // *Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal.* 2016. Vol. 18, No 2. Paper No.16209 (9 pp.)
63. **Соловьев А.А., Горшков А.И., Соловьев А.А.** Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // *Физика Земли.* 2016. № 6. С. 21–27. (**Soloviev A.A., Gorshkov A.I., Soloviev A.A.** Application of the Data on the Lithospheric Magnetic Anomalies in the Problem of Recognizing the Earthquake Prone Areas // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2016, Vol. 52, No. 6. P. 803–809. DOI: 10.1134/S1069351316050141)
64. **Татаринов В.Н., Кафган В.И.,** Сеелев И.Н. Изучение современной геодинамики Нижне-канского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов // *Атомная энергия.* 2016. Т. 121, № 3. С. 157–160.
65. **Шестопалов И.П.** Нейтроны земного происхождения и солнечная активность // *Труды семинара “Система «Планета Земля»”.* М.: ЛЕНАНД, 2016. С. 121–128.
66. **Shestopalov I.P.** Neutrons of terrestrial origin and the endogenous activity of the Earth // *Russ. J. Earth Sci.* 2016. Vol. 16. ES5003. DOI: 10.2205/2016ES000580

Тезисы докладов конференций

1. **Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P., Piip V.B.** Deep Structure Model of the South Kara Basin // EGU General Assembly 2016. Geophysical Research Abstracts. V. 18. EGU2016-5977.
2. **Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р.** Математические методы выделения структурных неоднородностей. Материалы школы молодых ученых "Современные проблемы геофизики и геоэкологии (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды)". Майкоп–2016. С.134–141.
3. **Aleshin I.M., Burguchev S. S., Kholodkov K.I., Perederin F.V., Soloviev A.A.** Real time data acquisition and remote control system for stationary geomagnetic observations // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies" / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
4. **Astapenkova A.A., Kedrov E.O., Nechitailenko V.A., Nisilevich M.V., Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P.** Data publishing under the "Earth Science Database" project // Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
5. **Bogoutdinov Sh.R., Agayan S.M.** The Studying of Time series by methods of discrete mathematical analysis // Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol.4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
6. **Getmanov V.G., Kornilov A.S.** Spectral-time analysis of «Serpentine Emission» geomagnetic pulsations // Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol.4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
7. **Иванов И.О., Борог В.В., Крянев А.В., Гетманов В.Г., Сидоров Р.В.** Сравнение возможностей двух методов выделения трендов при обработке временных рядов экспериментальных данных // V Международная конференция «Проблемы математической и теоретической физики и математическое моделирование»: сборник докладов (Москва, НИЯУ МИФИ, 5–7 апреля 2016 г.). С. 54–56.
8. **Гвишиани А.Д.** Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли // Научная конференция «Тектоника, геодинамика и петрология литосферы и мантии Земли», 14 января 2016 г., Новосибирск (устный доклад) URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/news/conf-dobretsov-2016>.
9. **Gvishiani A., Dzeboev B.** Moderate, strong and strongest earthquake-prone areas in the Caucasus, California and the Andes // EGU General Assembly 2016. Vol. 18. EGU2016-12435
10. **Gvishiani A.D., Soloviev A.A.** Geoinformatic advances in geomagnetic data studies and Russian INTERMAGNET segment // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies" / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
11. **Gvishiani A., Agayan S., Bogoutdinov Sh., Dobrovolsky M., Grudnev A., Krasnoperov R., Kudin D., Lukianova R., Petrov V., Rybkina A., Sidorov R., Soloviev A., Vavilin E.** New hardware and software complex for monitoring and analysis of the Earth's magnetic environment // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies" / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser., Vol. 4, BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
12. **Gvishiani A.D., Kopytenko Yu.A., Kotikov A.L., Sergushin P.A., Soloviev A.A., Grudnev A.A.** Magnetic station "Red Lake" (IAGA code: SPG). Continuation of a number of permanent magnetic observations in the vicinity of St. Petersburg (Russia) since 1726 // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies" / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser. Vol.4, BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi

13. **Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Sergeeva N.A., Rybkina A.I.** Recognition of moderate earthquake-prone areas in Crimea and western part of the North Caucasus // Book of Abstracts of the International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies». Poster Session. Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi.
14. **Gvishiani A., Agayan S., Soloviev A., Dzeboev B.** System and discrete mathematical analysis with geophysical applications. // Book of Abstracts of the International Conference in memory of Academician Arcady Kryazninskiy. Ekaterinburg, Russia, 3–8 October 2016. P. 54–56.
15. **Dzeboev B.A., Krasnoperov R.I., Sidorov R.V.** Recognition of earthquake-prone areas in Kamchatka based on the clusterizational research of earthquake epicenter // Book of Abstracts of the International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies». Poster Session. Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi.
16. **Dzeboev B.A., Agayan S.M., Krasnoperov R.I., Nikolov B.P.** Seismic activity monitoring of California based on the methods of discrete mathematical analysis // Book of Abstracts of the International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies». Poster Session. Geoinformatics Research Papers. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
17. **Ишков В.Н.** Сюрпризы продолжаются: 7 лет развития текущего 24 солнечного цикла и прогноз его дальнейшей эволюции // 11 ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 15–19 февраля 2016 г. ИКИ РАН. Сборник тезисов. Москва. 2016. С. 12.
18. **Ишков В.Н.** Солнечные протонные события и структура межпланетного вспышечного возмущения // 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 15–19 августа 2016 URL: <http://rerc-2016.msu.ru/node/213>
19. **Ишков В.Н.** Солнечные космические лучи в XXIV солнечном цикле // 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна 15–19 августа 2016 URL: <http://rerc-2016.msu.ru/node/213>
20. **Ишков В.Н.** Радиационная обстановка в межпланетном пространстве в 21 веке // Международная конференция «Пилотируемое освоение космоса», секция "Медико-биологические проблемы пилотируемых космических полетов. Влияние космического полета на организм человека" URL: <http://www.hse2016.com/mediko-biologicheskie-problemy-pilotiruemyh-kosmicheskikh-poletov/>
21. **Ишков В.Н.** Возможность прогноза больших и экстремальных солнечных вспышек экипажем космического корабля // Международная конференция «Пилотируемое освоение космоса», секция № 2 HSE-2016: «Научные исследования в космосе с участием человека. Задачи и перспективы», 24–26 мая 2016 года, г. Королев. URL: <http://www.hse2016.com/nauchnye-issledovaniya-v-kosmose-s-uchastiem-cheloveka/>
22. **Ишков В.Н.** Текущий 24 цикл солнечной активности после 7 лет развития // Одесский астрономический календарь: 2016, (Сб. научн.-поп. ст.) / ред. В.Г. Каретников. Астропринт, Одесса, 2016. Вып. 17. С. 226–233.
23. **Kaftan V., Melnikov A.** Deformation precursors of strong earthquakes derived from GNSS observation // Proceedings of the 1st Students Conference "Students for Agriculture", At Faculty of Agriculture, Forestry and Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 29.01.2016. P. 62–69. DOI: 10.13140/RG.2.1.4117.6729
24. **Kaftan V., Melnikov A.** Deformation earthquake precursor analysis on the ground of GNSS // VII Международная научно-практическая конференция преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные процессы в АПК», Аграрно-технологический институт Российского Университета Дружбы Народов, 15–17 апреля 2016 года.

25. **Kaftan V.I.**, Melnikov A.Yu. Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
26. **Колесников И.Ю.** Кирхгофовское согласование полевых функций в конечных элементах пластин Рейсснера-Миндлина путем управления спектральными функциями формы // Тезисы докладов XXI Всероссийской конференции и Молодежной школы-конференции «Теоретические основы конструирования численных алгоритмов и решение задач математической физики», посвященной памяти К. И. Бабенко. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук», 2016. С. 43.
27. **Kolesnikov I.Yu.** Unified non-algebraic field/geometrical approximations for computations // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
28. Kostianoy A., Litovchenko K., Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., **Lebedev S.**, Stanichny S., Soloviev D., Sirota A., Pichuzhkina O. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the Southeastern Baltic Sea: 1.5 Years experience // 2006 IEEE US/EU Baltic International Symposium. IEEE, 2016. P. 1–11. DOI: 10.1109/BALTIC.2006.7266136
29. **Lebedev S.A.** Investigation seasonal and interannual variability of the Caspian Sea dynamics based on satellite altimetry data // *Proceedings of Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic from 9-13 May 2016*.
30. **Lebedev S.A.** Investigation hydrometeorological regime of the White Sea based on satellite altimetry data // *Proceedings of Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic from 9–13 May 2016*.
31. Нижниковская О.Ю., **Лебедев С.А.** Верификация данных спутниковой альтиметрии на акватории Балтийского моря // *Геопоиск-2016: Материалы I Всероссийского конгресса молодых ученых-географов, Тверь, 3–9 октября 2016 г. / Тверской государственный университет. Тверь: Изд-во ТвГУ, 2016. С. 194–202.*
32. Нижниковская О.Ю., **Лебедев С.А.** Верификация данных спутниковой альтиметрии на акватории Балтийского моря // *Материалы Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 14–16 ноября 2016, Москва, Россия. С. 276.*
33. **Lukianova R.** Extremes in the Substorm auroral electrojet during the to exceptionally high solar wind streams // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI:10.2205/2016BS08Sochi
34. **Lukianova R.** Thermal and dynamic perturbations in the winter polar atmosphere associated a major sudden stratospheric warming // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI:10.2205/2016BS08Sochi
35. **Lukianova R.**, Kozlovsky A. Temperature, wind, and wave perturbations in the auroral ionosphere during sudden stratospheric warmings // *Proceedings of V International conference «Atmosphere, Ionosphere, Safety (AIS-2016)», ed. I.V. Karpov. Kaliningrad, 2016. P. 105–109.*
36. **Лукьянова Р.Ю.**, Уваров В.М. Численная модель F-области высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды // 11 Всероссийская конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 6–10 февраля 2016, г. Москва.
37. Cheskidov V.V., **Manevich A.I.** Landslide areas engineering-geological assistance development. Book of Abstracts of the International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies» // *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
38. **Morozov V.N.**, **Manevich A.I.** Stress-strain state of the epicentral area of the 1992 M=6,8 Erzigan Earthquake (Turkey). Book of Abstracts of the International Conference «Data

- Intensive System Analysis for Geohazard Studies» // Geoinf. Res. Papers Ser. 2016. Vol. 4. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
39. **Морозов В.Н.** Подземная изоляция РАО: надежды и иллюзии // Международная научно-практическая конференция «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих и новых технологий». 22–23 марта. ВНИИПромтехнологии, 2016. С. 109–121.
 40. **Нечитайленко В.А.** Технологии документирования научного контента. II. Электронная книга // Geoinf. Res. Papers. 2016. Vol. 4. BS1001. DOI: 10.2205/2016BS028
 41. **Никифоров О.В.** Принципы подготовки картографической информации и формирования изображений для визуализации на устройстве со сферическим экраном // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, 2016. С. 48.
 42. **Nikolov B.P., Zharkikh J.I., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M.** Integration of data mining methods for Earth science data analysis in GIS environment // Modern Information Technologies in Earth Sciences: Proceedings of the IV International Conference, 7–11 August 2016, Yuzhno-Sakhalinsk, 2016. – Vladivostok: Dalnauka, 2016. – P. 84.
 43. **Pilipenko V.A., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A.** Charactering the geomagnetic field variability for the study of magnetic storm impact on electric power lines instruments // 11th International Conference «Problems of Geocosmos». St. Petersburg, October 3–7, 2016 .
 44. **Пилипенко В.А.,** Белаховский В.Б., Сахаров Я.А. Характеристики варибельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь на электроэнергетические системы // Конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19–23 сентября 2016, г. Мурманск.
 45. Belakhovsky V.B., **Pilipenko V.A.,** Baddeley L., Sakharov Ya.A., Samsonov S.N. Geomagnetic and ionospheric response to SSC as observed by the complex of instruments // 11th International Conference «Problems of Geocosmos». St. Petersburg, October 3–7, 2016.
 46. Белаховский В.Б., **В.А. Пилипенко,** Л. Бэддли, Я.А. Сахаров, С.Н. Самсонов Геомагнитный и ионосферный отклик на SSC событие по данным комплексных наблюдений, «Гелиогеофизические исследования в Арктике» // Всероссийская конференция, 19–23 сентября 2016, г. Мурманск.
 47. **Pilipenko V.A.,** Kozyreva O.V., **Soloviev A.A.** Updated ULF wave power index for space weather applications // VarSITI General Symposium, Bulgaria, 2016.
 48. Kozyreva O.V., **Pilipenko V.A., Soloviev A.A.** Updated ULF Wave Power Index for Space Weather Applications // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies" / Editor Kedrov E. 2016. Geoinf. Res. Papers Ser. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS02Sochi
 49. Ягова Н.В., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П., **Пилипенко В.А.,** Федоров Е.Н. Анализ фоновых и экстремальных вариаций горизонтальных компонент геомагнитного поля как источника геоиндуцированных токов на авроральных и субавроральных широтах // Конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, сентябрь 2016.
 50. Ягова Н.В., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П., **Пилипенко В.А.,** Федоров Е.Н. Частоты появления экстремальных значений производных по времени геомагнитного поля, потенциально опасных для промышленных электрических сетей, по данным многолетних наблюдений на сети IMAGE // Труды всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Апатиты, 19–23 сентября 2016. Полярный Геофизический Институт РАН, 2016. С. 81–84.
 51. **Рыбкина А.И.** Experience in geomagnetic data processing on the territory of Russian Federation // Международная конференции «GEO-XIII Plenary» в г. Санкт-Петербург 7–10 ноября 2016 г. (URL: <http://www.earthobservations.org/geo13.php>).

52. **Rybkina A.I., Odintsova A.A., Gvishiani A.D., Samokhina O.O., Astapenkova A.A.** Development of geospatial database on hydrocarbon extraction methods in the 20th century for large and super large oil and gas deposits in Russia and other countries // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
53. **Sergeyeva N.A., Nisilevich M.V., Panteleyev D.V., Zabarinskaya L.P.** Development of the user interface for geomagnetic database // *Geoinformatics Research Papers*. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
54. **Sidorov R.V., Getmanov V.G., Gvishiani A.D.** Application of generalized regression analysis technology for geomagnetic data filtering // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"*. Poster Session. *Geoinf. Res. Papers Ser.* Vol. 4, BS4002. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi
55. **Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Soloviev A.A.** Construction and validation of ULF wave indices as indicators of turbulent energy transfer into the magnetosphere // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"* *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
56. **Narkhov E.D., Sergeev A.V., Sapunov V.A., Denisov A.U., Soloviev A.A., Fedorov A.L., Milyukov D.N., Sapunov A.V.** Geomagnetic monitoring of gas and oil pipelines for prevention of technogenic accidents // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"*. *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
57. **Sapunov V., Denisov A., Saveliev D., Narkhov E., Milyukov D., Soloviev A., Khomutov S., Dumbrava Z., Kusonsky O., Borodin P.** Absolute vector Overhauser magnetometers POS-3 & 4 for geomagnetic monitoring // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"*. *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
58. **Sapunov V., Rasson J., Soloviev A., Rubinstein B., Sergeev A., Narkhov E., Saveliev D., Denisov A., Sapunov A.** On perspectives of INTERMAGNET observatories usage for research in spin gravitational interactions and cosmology // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"*. *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
59. **Soloviev A.A., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I., Grudnev A.A., Vavilin E.V., Solovieva E.N.** Klimovskaya: a new geomagnetic observatory // *Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies"*. *Geoinf. Res. Papers Ser.* 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
60. **Tatarinov V., Morozov V., Manevich A., Tatarinova T.** Simulation of stress-strain state epicentral area of Earthquake 26.01.2001, M = 6.9 (India). «GeoMod» 2016.
61. **Татаринов В.Н.** Роль геодинамики при обосновании безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов. Международная научно-практическая конференция «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих и новых технологий». 22–23 марта. М.: ВНИПИПромтехнологии, 2016. С. 223–229.
62. **Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И.** Прогноз устойчивости геологической среды при выборе мест подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов // X международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Апатиты, 7–11 июня 2016 г. Тезисы докладов. С. 83.
63. **Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Селеев И.Н.** Цикличность современных движений в южной части енисейского кряжа как результат релаксации тектонических напряжений // X международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Апатиты, 13–17 июня 2016 г.

64. **Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Морозов В.Н.** Результаты геодинамических исследований в пределах Нижнеканского массива (Красноярский край) // XXIV Международный научный симпозиум «Неделя горяка-2016». 25–29 января 2016.
65. **Zharkikh J.I., Nikolov B.P., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M.** Methods of data mining for Earth science data analysis in GIS environment // Book of Abstracts of the International Conference "Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies". Geoinf. Res. Papers Ser. 2016. Vol. 4. BS4002. DOI: 10.2205/2016BS00Sochi
66. **Шестопалов И.П.** Нейтроны земного происхождения и солнечная активность // Семинар-конференция «Система Планета Земля» 2–4 февраля 2016, Геологический факультет МГУ, Москва.
67. **Шестопалов И.П.** Нейтроны земного происхождения и солнечная активность // Труды семинара «Система «Планета Земля»». М.: ЛЕНАНД, 2016. С. 121–128.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016663255 «ПГМ15 (Полигармоническая модель 2015) PGM15»
Авторы: **Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д., Корнилов А.С.**
Заявка № 2016661170 от 18.10.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29 ноября 2016 г.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662573 «Программа интерполяции часовых вариаций полной напряженности магнитного поля»
Авторы: **Соловьев А.А., Каган А.И.**
Заявка № 2016619607 от 15.09.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15 ноября 2016 г.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662324 «Программа расчета и визуализации меры аномальности по геомагнитным данным»
Авторы: **Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А.**
Заявка № 2016660036 от 27.09.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07 ноября 2016 г.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660508 «TEX2XHTML (Конвертер LaTeX к HTML5 и EPUB3)»
Автор: **Нечитайленко В.А.**
Заявка № 2016616773 от 27.06.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 сентября 2016 г.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619536 «Расчет напряженно-деформированного состояния в изгибаемом тонком пластинчатом слое геологической среды от действия заданных вертикальных смещений точек прямоугольного контура GEOPLATE-W.01»
Автор: **Колесников И.Ю.**
Заявка № 2016616745 от 27.06.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 августа 2016 г.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619481 «APRS_ORTP»
Авторы: **Гетманов В.Г., Орлов С.Е., Сидоров Р.В.**
Заявка № 2016616742 от 27.06.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 августа 2016 г.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619537 «APRS_SQWP»
Авторы: **Гетманов В.Г., Орлов С.Е., Сидоров Р.В.**
Заявка № 2016616743 от 27.06.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 августа 2016 г.
8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2016621106 «База данных по современным движениям земной коры в пределах Нижнеканского массива, полученная по данным наблюдений ГНСС «Data on modern geodynamic movements»
Авторы: **Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Морозов В.Н., Маневич А.И., Татарина Т.А.**
Заявка № 2016620856 от 27.06.2016 г.
Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 15 августа 2016 г.